



САМАРСКИЙ  
ПОЛИТЕХ  
Опорный университет



АО «СО ЕЭС»



Российский  
Национальный  
Комитет

ФСК



ЕЭС



РОССЕТИ



НАДЕЖНАЯ  
СМЕНА



VIII Международная молодежная научно-техническая конференция

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2017

2–6 октября



Самара, 2017

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 3

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВО «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
АО «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»  
ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»  
ПАО «РОССТЕТИ»  
РОССИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕТА ПО  
БОЛЬШИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ (РНК СИГРЭ)  
БЛАГОТВОРИТЕЛЬНЫЙ ФОНД «НАДЕЖНАЯ СМЕНА»

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2017



Материалы  
VIII Международной молодёжной научно-технической конференции  
02 – 06 октября 2017 года

Том 3

Самара  
2017

УДК 621.31  
ББК 31.2  
Э45

**Электроэнергетика глазами молодежи:** материалы VIII Международной научно-технической конференции, 02 – 06 октября 2017, Самара. – В 3 т. Т 3. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 342 с.

В третий том сборника трудов включены доклады, принятые программным комитетом конференции, в которых отражены результаты исследований по основным научным направлениям секций «Перспективные направления развития и экономика электроэнергетики»: распределенная энергетика и собственная генерация потребителей энергии, альтернативные источники энергии, экология в электроэнергетике, рыночные механизмы в электроэнергетике; «Образовательные технологии и программы подготовки специалистов для электроэнергетики»: программы и методики повышения квалификации работников, реновация образовательных процессов профильных кафедр вузов по подготовке специалистов для электроэнергетической отрасли, развитие систем тренажерной подготовки; «Промышленная энергетика. Энергоэффективность»: энергоэффективность и энергоснабжение при транспортировке энергетических ресурсов и выработке тепловой и электрической энергии, энергосберегающие технологии в инженерных системах промышленных предприятий, зданий и сооружений, энергоэффективное оборудование, устройства, изделия и материалы, системы учета и мониторинга для энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов. В работе конференции приняли участие инженеры, ученые и специалисты отраслевых научно-исследовательских, проектных, эксплуатационных электроэнергетических организаций и компаний, а также академических институтов и высших учебных заведений России и других стран. Материалы сборника предназначены для научных работников и специалистов в сфере энергетики.

ISBN 978-5-7964-2030-0  
ISBN 978-5-7964-2033-1

**Ответственный редактор:**

Е.М. Шишков, к.т.н., заместитель директора по науке, информатизации и инновациям филиала ФГБОУ ВО «СамГТУ» в г. Новокуйбышевске.

**Редакционная группа:** И.А. Москвин, Я.В. Макаров.

**Рецензенты:**

В.И. Полищук, д.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «СамГТУ»;  
В.Г. Гольдштейн, д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «СамГТУ»;  
А.Г. Сорокин, к.т.н., доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «СамГТУ»;  
В.Н. Козловский, д.т.н., заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ФГБОУ ВО «СамГТУ»;  
П.М. Ерохин, д.т.н., советник директора по управлению персоналом АО «СО ЕЭС»;  
Д.А. Ивановский, ведущий эксперт отдела научно-технического сотрудничества Технической инспекции ЕЭС;  
М.С. Долматова, главный специалист отдела разработки правил и процедур службы развития рынков АО «СО ЕЭС»;  
Ю.А. Макаричев, д.т.н., заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное оборудование» ФГБОУ ВО «СамГТУ»;  
А.А. Шутенко, заместитель начальника Департамента управления персоналом АО «СО ЕЭС»;  
Е.В. Власюк, начальник Службы управления персоналом филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги;  
Т.А. Фадеева, главный специалист отдела развития персонала Службы управления персоналом филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Средней Волги;  
М.Ю. Деревянов, к.т.н., руководитель Регионального учебно-научного центра энергетической эффективности Самарской области;  
В.М. Дашков, к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ФГБОУ ВО «СамГТУ».

ISBN 978-5-7964-2030-0  
ISBN 978-5-7964-2033-1

## Организаторы конференции



ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный  
технический университет»



АО «Системный  
оператор Единой  
энергетической системы»



Российский национальный  
комитет Международного  
Совета по большим  
электрическим системам  
высокого напряжения  
(РНК СИГРЭ)



ПАО «Федеральная сетевая  
компания Единой  
энергетической системы»



ПАО «Россети»



Благотворительный фонд  
«Надежная смена»

## При поддержке



Министерства энергетики Российской  
Федерации



Министерства образования и науки  
Российской Федерации

## Информационные партнёры конференции



Журнал «Электроэнергия.  
Передача и распределение»



Журнал  
«Энергия единой сети»



Журнал «Электрические  
станции»



Журнал «Вестник  
СамГТУ»



Журнал «Вестник КГЭУ»



Журнал «ИВУЗ. Проблемы  
энергетики»



Журнал «Вести в  
электроэнергетике»



Журнал  
«Промышленная энергетика»



Журнал «Энергетик»

## **Секция № 6**

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ЭКОНОМИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

- Распределенная энергетика и собственная генерация потребителей энергии
- Альтернативные источники энергии
- Экология в электроэнергетике
- Рыночные механизмы в электроэнергетике



## **Section № 6**

### **ELECTRICITY MARKETS AND FUTURE POWER SYSTEM DEVELOPMENT**

- Distributed energy generation and power consumers' auxiliary generation
- Alternative energy sources
- Ecology in power engineering
- Market mechanisms in power engineering

# Исследование влияния температуры на КПД солнечных модулей

А.С. Лысова, А.Г. Васьков

ФГБОУ ВО НИУ "Московский энергетический институт", Москва, Россия

E-mail: nyutaly@yandex.ru, int696@mail.ru

**Аннотация** — с увеличением температуры выше номинальной (25°C) КПД солнечных модулей снижается. Однако, для условий России ключевым воздействием являются низкие температуры. Существующие математические модели практически неприменимы к таким условиям. В работе проанализированы существующие математические модели, описывающие влияние температуры на КПД солнечных модулей, показаны их особенности при учете низких температур. В результате статистического анализа данных получена температура ниже 25°C. Предложена математическая модель изменения КПД при температуре ниже 25°C.

**Ключевые слова** — солнечный модуль, эффективность, коэффициент полезного действия, температура

## Investigation of the temperature influence on the solar modules efficiency

A.S. Lysova, A.G. Vaskov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation

E-mail: nyutaly@yandex.ru, int696@mail.ru

**Abstract** — when the temperature rises above the nominal value (25 °C) the efficiency of solar modules decreases. However, the key impact for Russian conditions is the low temperature. Existing mathematical models are practically inapplicable to such conditions. The paper analyzes existing mathematical models, which describes the effect of temperature on the solar modules efficiency. Their features are shown with allowance for the lowest temperatures. A temperature below 25 °C is obtained as a result of the statistical analysis of the data. A mathematical model of the efficiency change at a temperature below 25 °C is proposed.

**Keywords** — solar module, efficiency, efficiency factor, temperature

### I. НАЗНАЧЕНИЕ СТЕНДА

Для проведения исследований использовался комплект типового лабораторного оборудования «Нетрадиционная электроэнергетика – Модель фотоэлектрической солнечной электростанции» (далее - комплект), внешний вид которого представлен на рисунке 1. Допускаемый диапазон температур для работы с данным комплектом от +10 до +40 °C, относительная влажность воздуха до 80 % при +25 °C.



Рис. 1. Модель солнечной электростанции

### II. ФОТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии (ФЭП) – это полное название солнечных батарей. Солнечные батареи – это экологичный и автономный источник электроэнергии, преобразующий в электроэнергию солнечный свет[1]. Помимо экологичности, перспективность этого способа в независимости от центральных электросетей – что важно как с финансовой точки зрения, так и для тех, кто живет вне доступа к ним[2].

В данной работе проводится анализ эффективности солнечного модуля в зависимости от его температуры.

#### A. Идеальная модель ФЭП.

Солнечный модуль является идеальной диодной моделью, эквивалентная схема которой представлена на рисунке 2. Эта модель состоит из источника тока и диода, включенных параллельно. Данная схема описывает работу идеального солнечного модуля [4].

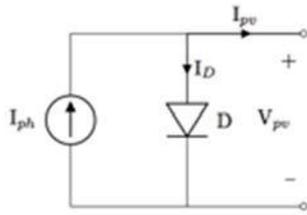


Рис 2. Эквивалентная схема модели ФЭП.

Уравнение (1) описывает вольт-амперные характеристики солнечного модуля [4]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_{pv}}{a N_c U_{th}}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

где  $I_{pv}$  общий ток (А);  $I_{ph}$  фототок (А);  $I_0$  насыщенный переменный диодный ток (А);  $U_{pv}$  выходное напряжение (В);  $a$  - эмпирический коэффициент;  $U_{th}$  тепловое напряжение. На рисунке 3 представлены вольт-амперные характеристики солнечного модуля, выраженные уравнением (2) [4].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (2)$$

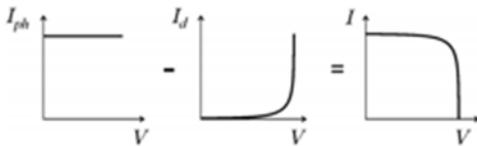


Рис 3. Вольт - амперные характеристики солнечного модуля.

Параметры, характеризующие фотогальванический модуль [4]:

1) Ток короткого замыкания  $I_{cs}$  (short circuit current) - максимальный ток солнечной батареи при напряжении  $U=0$ . Для многих солнечных батарей это значение близко к фототоку и поэтому часто характеризуется как ток максимума.

2) Напряжение холостого хода  $U_{os}$  (open circuit voltage) - это напряжение зависит от температуры солнечного модуля. С повышением температуры напряжение уменьшается.

3) Коэффициент заполнения  $FF$  (fill factor)

$$FF = \frac{U_{mpp} * I_{mpp}}{U_{os} * I_{cs}} \quad (3)$$

где  $U_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$  напряжение (В) и ток (А) в точке максимальной мощности.

4) Эффективность  $\eta$

$$\eta = \frac{U_{mpp} * I_{mpp}}{P_{in}} = \frac{U_{os} * I_{sc} * FF}{P_{in}} \quad (4)$$

5) Номинальная температура солнечного модуля  $t=25^\circ\text{C}$ .

### В. Теоретическая предпосылка.

Вольт-амперная характеристика ФЭП – важнейший параметр солнечной батареи, функциональная зависимость между напряжением на электрической нагрузке и током, потребляемым этой нагрузкой, т.е. зависимость  $I=I(U)$  при постоянном световом потоке  $E$  и температуре  $T$ . Это основная энергетическая характеристика, позволяющая определять рабочую характеристику  $\eta=\eta(P)$ , а также оптимальную зону электрической нагрузки по критерию максимального КПД, т.е.  $\eta \rightarrow \max$ . В общем случае при переменном световом потоке  $E$  вольт-амперную характеристику ФЭП при постоянной температуре  $T$  представляют функциональной зависимостью двух переменных  $I=I(U,E)$ , где  $U$  – непрерывно изменяющийся аргумент, а  $E$  – дискретно задаваемый параметр. Графический вид этой характеристики представлен на рисунке 4 [1].

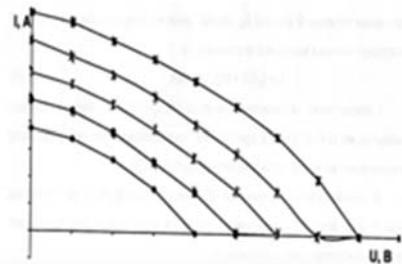


Рис. 4. Вольт - амперная характеристика ФЭП.

На рисунке 5 также показаны и другие энергетические характеристики СФЭУ: рабочая или зависимость КПД ( $\eta$ ) от  $I$ ;  $N(I)$ . Из анализа представленных графических зависимостей следует, что точки на ВАХ с максимумом  $N_{CЭ}$  ( $I$ ) соответствуют и максимуму  $\eta(I)$ .

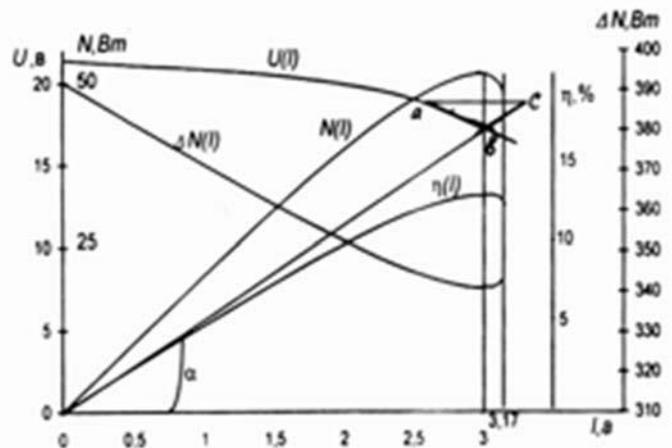


Рис 5. Энергетические характеристики СФЭУ.

### С. Экспериментальная часть.

Электрическая схема соединений аппаратуры представлена на рисунке 6.

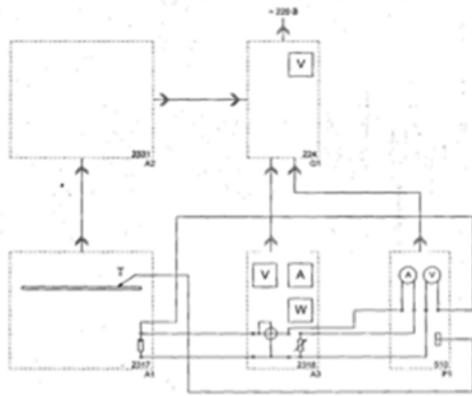


Рис.6. Электрическая схема соединений, предназначенная для снятия ВАХ и энергетической характеристик.

Нагружая элемент, регулируется значение освещенности, а также поддерживается постоянность этого значения в ходе эксперимента. Проводится эксперимент для значения освещенности  $1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$ . Контролируется температура поверхности фотоэлектрического модуля ( $25^\circ\text{C}$ ). Регулируя нагрузку, изменяется ток нагрузки и напряжение на нагрузке фотоэлектрического модуля. Опыт повторяется аналогично для значений освещенности  $200 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ,  $400 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ,  $600 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ,  $800 \text{ Вт} / \text{м}^2$ . Получается семейство вольт-амперных характеристик, которые представлены на рис 7.

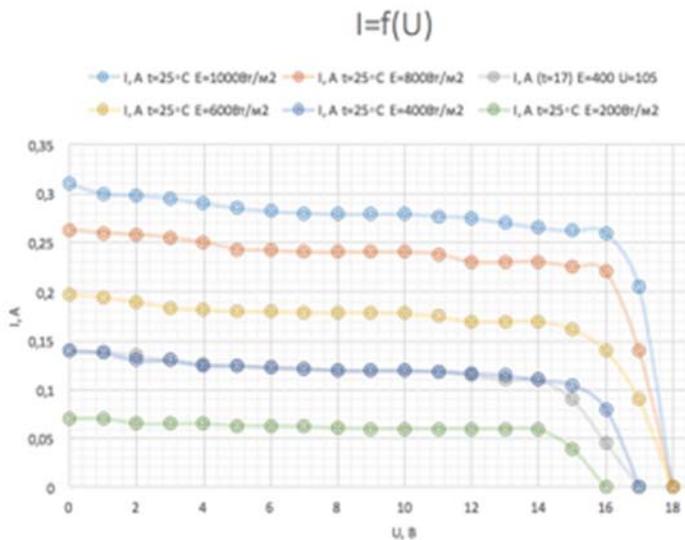


Рис 7. Семейство ВАХ солнечного модуля при различных освещенностях.

Соединив аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений, приведенной на рисунке 8, аналогично проводится опыт для снятия мощностной и рабочей характеристик, при этом фиксируются значения мощности.

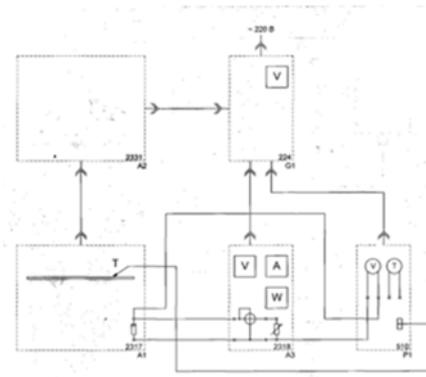


Рис. 8. Электрическая схема соединения для снятия мощностной и рабочей характеристик.

В результате проведения измерений строится зависимость  $P=f(U)$  (рисунок 9), а также рабочая характеристика солнечного элемента  $\eta=f(U)$  (рисунок 10). КПД рассчитывается по формуле (5).  $\eta = \frac{U * I}{E * F}$  (5), где

$F = 152,375 \text{ см}^2$  - площадь солнечного элемента,  
 $E = 1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ;  $U = \text{const} = 16 \text{ В}$ ;

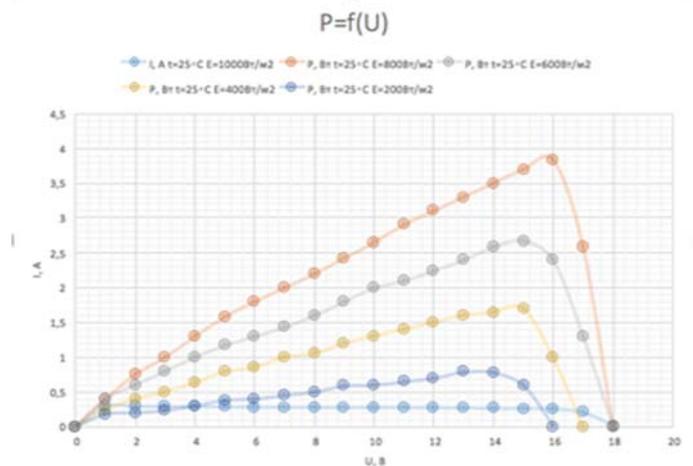


Рис 9. Мощностные характеристики при различных освещенностях.

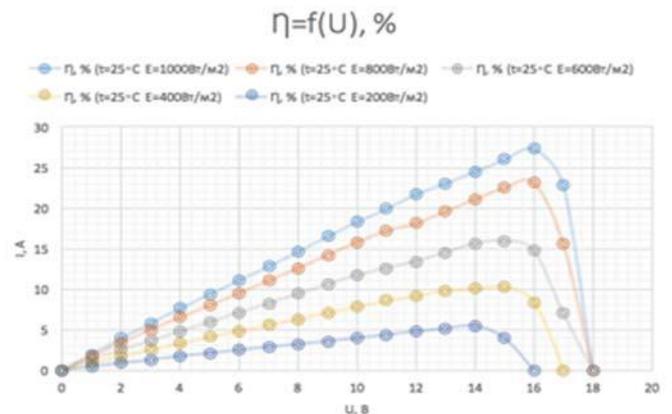


Рис 10. Рабочие характеристики солнечного модуля при различных освещенностях.

Таким образом, уровень освещенности  $E$  влияет на ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. С понижением уровня освещенности ток короткого замыкания уменьшается прямо пропорционально, а напряжение холостого хода уменьшается незначительно. Графические результаты экспериментов совпадают с теоретической предпосылкой.

### III. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

Для получения зависимости эффективности солнечного модуля для температур ниже  $25^{\circ}\text{C}$  проводилось исследование влияния высоких температур ( $25^{\circ}\text{C}$  -  $40^{\circ}\text{C}$ ), а также температуры ниже данного диапазона -  $20^{\circ}\text{C}$ .

Для снятия вольт-амперной характеристики в зависимости от температуры поддерживается освещенность, равная  $E = 1000 \text{ Bm} / \text{m}^2$ , при этом изменяется температура солнечного элемента. Получив семейство соответствующих вольт-амперных характеристик, представленных на рисунке 11, видно, что с повышением температуры напряжение холостого хода уменьшается, а ток короткого замыкания практически совпадает.

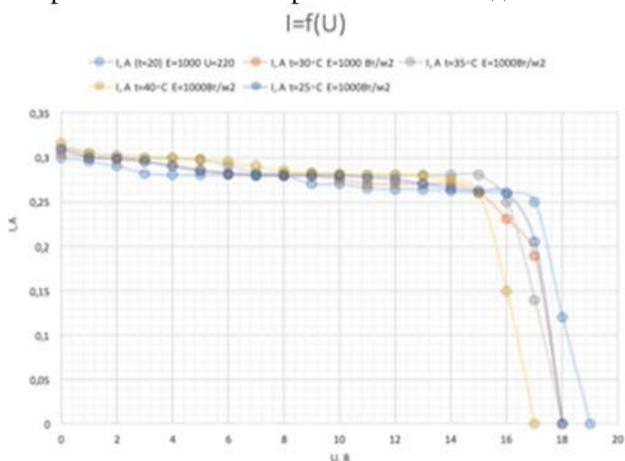


Рис. 11. Семейство ВАХ при постоянной освещенности и различных температурах.

Аналогично строится мощностная и рабочая характеристики. По полученным мощностным характеристикам, представленных на рисунке 12, можно сделать следующий вывод: напряжение холостого хода снижается с повышением температуры, а увеличение температуры влияет на положение точки максимальной мощности. С повышением температуры максимальная мощность снижается.

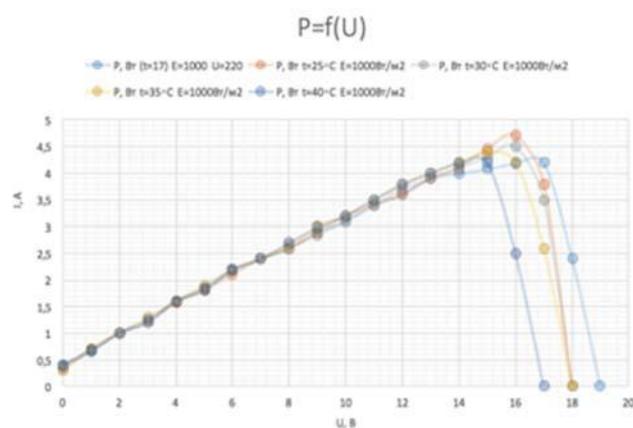


Рис. 12. Мощностные характеристики солнечного элемента при постоянной освещенности и различных температурах.

Для солнечного модуля при освещенности  $E = 1000 \text{ Bm} / \text{m}^2$  и температурах  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  определяется значение КПД по формуле (5). Из полученной зависимости КПД от температуры солнечного модуля, представленной на рисунке 13, видно, что с повышением температуры, эффективность солнечного модуля снижается.

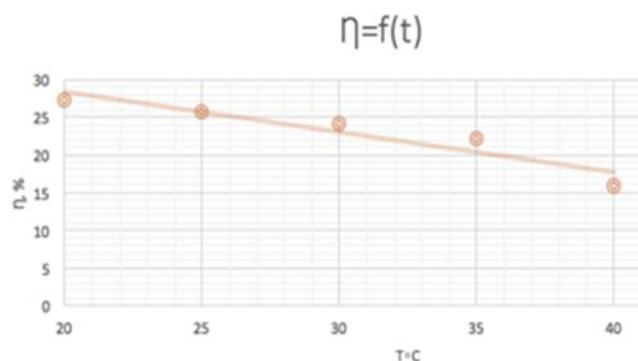


Рис.13. Зависимость КПД от температуры солнечного модуля.

### IV. ВЫВОДЫ

Приведена методика построения вольт – амперных и энергетических характеристик солнечного модуля, в результате анализа которых получена математическая модель изменения КПД от температур выше и ниже номинальной ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Полученная зависимость КПД от температуры нелинейная. С повышением температуры КПД значительно уменьшается на высоком диапазоне температур по сравнению с диапазоном ниже номинальной температуры.

#### Список литературы

- [1] Либра М., Пулек В. Физические принципы преобразование фотогальванической энергии, Чешский агротехнический университет, Инженерный факультет, Прага
- [2] Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
- [3] Сенигов П.Н., Модель фотоэлектрической солнечной электростанции. Базовые эксперименты. Челябинск: Издательско-полиграфический центр «Учебная техника», 2009.-23с.
- [4] Хавард Б.В., «Моделирование фотоэлектрических модулей в Simulink/Matlab

# Ценообразование на реактивную мощность для субъектов рынка системных услуг

Е.А. Кротков. М.В. Сапунов

Самарский государственный технический университет  
Самара, Россия  
golf\_10@mail.ru

*Аннотация* - Компенсация реактивной мощности потребителей является важным условием для безаварийной, эффективной и экономичной работы электрической системы. Потери активной мощности из-за недостаточной компенсации реактивной мощности составляют значительную долю общих потерь в электрической сети. Минимизация потерь активной мощности возможна при экономической стимуляции субъектов конкурентного рынка. Статья посвящена оценке услуги по компенсации реактивной мощности в электрической системе, оказываемой электрическими станциями, распределительными сетями, потребителями электроэнергии. Компенсация реактивной мощности потребителей в большей части выполняется время синхронными генераторами электрических станций. Стоимость реактивной мощности складывается из капитальных затрат на установку компенсирующих устройств и пренебрежимо малых фактических затрат на производство реактивной мощности. Высокая капитальная стоимость генераторов и большие эксплуатационные затраты обуславливают высокую цену получаемой реактивной мощности. Для рынка резерва реактивной мощности необходимо распределение компенсации между генераторами и другими средствами регулирования, такими как конденсаторные батареи, шунтирующие реакторы или устройствами на силовой электронике.

*Ключевые слова* — реактивная мощность; системные услуги; ценообразование.

## Price determinations for reactive power for consumers of system services market

E.A. Krotkov, M.V. Sapunov

Samara State Technical University  
Samara, Russian Federation  
golf\_10@mail.ru

*Abstract* - Compensation of reactive power of consumers is a very important factor for accident-free, effective and efficient functioning of electrical system. Loss of active power caused by insufficient compensation of reactive power compose a significant portion of overall losses in electrical grid. Minimization of active power losses is possible by economical stimulation of competitive market subjects. Description and evaluation of pricing methods for reactive power compensation services in electrical system provided by electric generating stations, distribution networks and consumers of electric energy. Compensation of consumers' reactive power for the most part is performed by synchronous generators of electric generating stations. The cost of reactive power is composed of capital expenses for installation of compensating devices and negligibly small actual expenses for production of reactive power. High capital cost of generators and high exploitative expenses determine the high cost of received reactive power. For reserve of reactive power market distribution of compensation between generators and other regulation devices, such as capacitor banks, shunt reactors or devices, based on power electronics is necessary.

*Keywords* — reactive power; system services; price determination.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Системный оператор в условиях рынка несет ответственность за поддержание устойчивости электрической системы и надежности ее функционирования. Для ограничения потоков мощности в линиях электропередачи и поддержания напряжения в шинах потребителей необходим достаточный объем реактивной мощности. Генерирующая компания стремится продать максимальные объемы активной мощности. Синхронный генератор может выдавать активную мощность, только при наличии достаточного объема реактивной мощности для поддержания его работы. Иначе он не выработает необходимую активную мощность из-за системных ограничений. То есть, необходимо ввести рыночный механизм компенсации реактивной мощности.

Механизмы работы рынка реактивной мощности различны для разных энергосистем. Например, для Австралии установлены границы на коэффициенты мощности генераторов от 0,9 с недокомпенсацией до 0,93 с перекомпенсацией. Если генератор работает с коэффициентом мощности вне этого диапазона, то это расценивается как дополнительная услуга, и производителю должна возмещаться сумма в размере упущенной выгоды.

На рынке электроэнергии Скандинавии, куда входят Швеция, Норвегия, Финляндия и Дания, ввиду больших расстояний между электростанциями и нагрузкой реактивная мощность производится в месте потребления локально. Например, в Швеции нет организованного рынка реактивной мощности, а в Норвегии производителю оплачивают реактивную мощность только за время работы генератора с коэффициентами мощности вне диапазона коэффициента мощности от 0,92 с недокомпенсацией до 0,98 с перекомпенсацией.

## II. АСПЕКТЫ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ

Ценообразование основывается на модели активной и реактивной мощностей, гарантирующей стремление производителя и потребителя использовать столько энергии, сколько требуется. Если цена реактивной мощности будет ниже ее реальной стоимости, это может послужить мотивом для отказа от ее производства. Недостаток же реактивной мощности приведет к невозможности передачи активной мощности, снижению надежности электроснабжения, и, в конечном счете, к лавине напряжения. Если же цена будет выше реальной, генерирующая компания будет стремиться произвести как можно больше реактивной мощности, тогда как потребитель будет сокращать расход, что приведёт к нестабильности напряжения в сети. Цена реактивной мощности зависит от места ее генерации, удаленное расположение производителя неблагоприятно даже в случае наличия дешевого источника реактивной мощности. Отсюда вытекает необходимость согласования ценообразования с местоположением производителей.

В России цена покупной электрической энергии и плата за присоединение к электрическим сетям не учитывают расходы субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии на оплату услуг по компенсации реактивной энергии. Тарифы на услуги по передаче электрической энергии устанавливаются с учетом нормативной величины расхода электрической

энергии на ее передачу по электрическим сетям (нормативных потерь) и в этой части не учитывают дополнительные расходы субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии на оплату услуг по компенсации реактивной энергии

Формирование цены реактивной мощности – многокритериальная задача, при решении которой надо учесть все оказывающие влияние факторы. Нужно отметить, что ценообразование по аналогии с активной мощностью нелогично из-за особых характеристик реактивной мощности.

## III. МЕХАНИЗМ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ

Как известно, стоимость реактивной мощности складывается из явных и скрытых издержек. К первым относятся капитальные затраты и издержки производства реактивной мощности. В отличие от активной мощности, производственные издержки малы, поэтому за явные издержки считают капитальные расходы. Скрытые издержки, в основном относятся к стоимости недополученной выгоды. Если системный оператор требует от генерирующих компаний производить такое количество реактивной мощности, которое вынуждает снижать выработку активной мощности, производитель будет терять доход. Такие потери должны быть финансово скомпенсированы.

Существуют различные способы формирования цены на реактивную мощность.

Централизованный механизм. Он рассчитывается на основе модели оптимальных потоков. Издержки, рассчитанные таким способом, включают переменную величину издержек на производство, привязанную к стоимости топлива. Однако, переменная составляющая издержек производства реактивной мощности пренебрежимо мала, в отличие от капитальных затрат, которые просто не включены в эту модель. Поэтому централизованный метод формирования цены является неэффективным.

Из-за этой особенности, в тариф на реактивную мощность необходимо также включать затраты на установленную мощность. С течением времени платёж за установленную мощность исчезает и выплата происходит только за фактически потребленную реактивную мощность. Рассмотрим варианты таких рынков.

Модель конкурентного объединенного рынка электроэнергии (используется в Австралии, Англии, Аргентине) формирует цену на реактивную мощность из двух частей. Первая состоит из внутренних затрат на оборудование для производства, выработки и потребления реактивной мощности и имеет плавно изменяющуюся по времени цену спот. Вторая состоит из услуг по регулированию напряжения в системе для обеспечения надежной работы системы, обычно составляет очень малую долю цены спот. Однако, эта цена серьезно возрастает, когда устойчивость функционирования системы находится под угрозой. Из-за различного поведения цены этих двух составляющих говорят о двух различных рынках реактивной мощности.

Первый - рынок, базирующийся на спот-цене, рассчитываемой на основании потерь, второй - рынок установленной реактивной мощности, способной

регулировать баланс реактивной мощности в системе. Предложение цены состоит из максимальной и минимальной мощности, вырабатываемой производителем и кривой издержек. Эта кривая отображает внутренние потери генерирующей компании, вызванные необходимостью выработки реактивной мощности. Цена формируется по предельной цене почасовой оплаты. Системный оператор ведет режим системы, считая потери реактивной мощности в элементах системы, как новое условие комплексной функции. Стоимость реактивной мощности считается умножением её величины на цену спот, полученную методом минимизации потерь. Оплата каждого элемента производится по таким факторам, как выполнение поставки соответствующего объема, а также возможным последствиям от недопоставки энергии в систему. Во избежание возникновения рыночной власти, можно обязать заключать оба рынка контракты на длительный срок.

К примеру, соглашение для рынка реактивной мощности Великобритании основано на определении оптимального потока реактивной мощности методами линейного программирования. Рынок основывается на комбинированной плате за реактивную мощность и энергию. Определяется объем реактивной мощности, который каждый субъект должен произвести или потребить. Для модели конкурентного рынка и дальнейшего построения системы цен используется кривая производительности генератора. Рынок основывается на едином аукционе цены с применением оптимального потока мощности. Функция цены состоит из трех частей: цены установленной мощности, величины потерь электроэнергии и стоимости упущенной выгоды.

Генератор имеет три зоны работы (рис. 1.). В области I вырабатываемая реактивная мощность используется для работы самого генератора, поэтому выработка реактивной мощности в этой зоне оплачиваемой услугой не считается. В области II при производстве и потреблении реактивной мощности потери растут, следовательно, генерирующая компания должна получать за это денежную компенсацию, а в цене энергии кроме стоимости установленной мощности будет содержаться стоимость потерь. В области III генератор работает со снижением выработки активной мощности, что вызывает соответствующие потери, следовательно, функция платежа будет содержать все три составляющие.

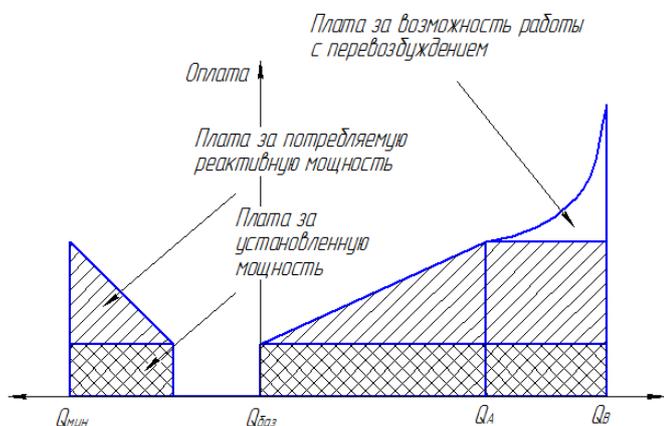


Рис. 1. Структура ценообразования для производителей реактивной мощности.

Ещё один вариант - использование зон регулирования напряжения. Для их определения используется принцип расстояний передачи электроэнергии. Для каждой из зон устанавливается единая цена на реактивную мощность по аналогии с описанной ранее методикой. Наличие мощности в одной зоне управления не влияет на цену в другой зоне энергосистемы. Результаты показывают, что наличие локализованного рынка более предпочтительно, чем единое образование цены на реактивную мощность для всей системы.

Также возможен механизм конкурентного образования цены на реактивную мощность. Для выбора производителей предлагается двухэтапный конкурс, график приведен на рис. 2.

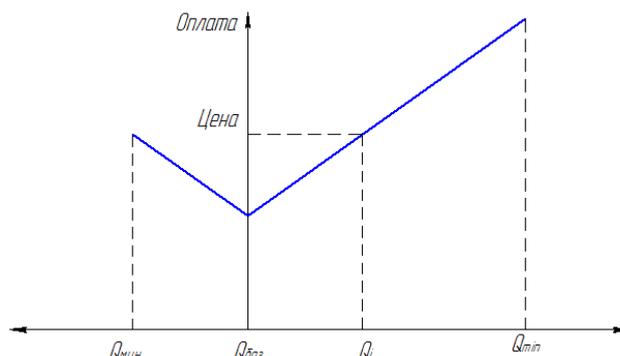


Рис. 2. Порядок ценообразования на реактивную мощность для устройств, установленных в распределительной сети.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы компенсации реактивной мощности в основном решаются имеющимися в электрической системе синхронными генераторами. Однако, ограничения на случай аварийной ситуации не дают полностью загружать их реактивной мощностью, что требует наличие резерва, доли участия в компенсации всех участников рынка. В настоящее время для поддержания баланса реактивной мощности системным оператором рассматриваются только синхронные генераторы и компенсаторы, использование других компенсирующих устройств не учитывается. Хотя генераторы и являются наиболее важным элементом для поддержания баланса реактивной мощности, их использование неэкономично из-за высокой капитальной стоимости и стоимости эксплуатации.

#### Список литературы

- [1] Раби А., Шаянфар Х.А., Амажади Н., Цена реактивной мощности: проблемы и предложения в условиях конкурентного рынка. Энергоэксперт, №2, 2009.
- [2] И. Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро, Справочник по проектированию электрических сетей - М: НИЦ ЭНАС, 2006.
- [3] Ю. Вэнг, В. Сей, Исследование потребности службы поддержки реактивной мощности для производителей электроэнергии. IEEE Trans. Power Syst., 2004, февраль, том 19, стр. 586-593.
- [4] В. Онгсакий, К. Чайкулкери, Координация оптимальных поставок электроэнергии для двусторонних контрактов, балансировка электроэнергии, вспомогательные рынки. IEEE Trans. Power Syst., 2006, май, том 21, стр. 593-604.

# Оценка влияния режима работы распределенной генерации на график нагрузки питающей подстанции

В.В. Дубайлова, Н.Д. Мухлынин

ФГАОУ ВО «Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия  
E-mail: lera35110@gmail.com

*Аннотация* – Сегодня, когда установки распределенной генерации приобретают все большую актуальность, у потребителей-собственников генераторных установок появляется возможность влиять на свой график нагрузки, регулируя генерируемую мощность. Управляя высокоманевренными источниками генерации (дизель-генераторными и газотурбинными установками) для снижения своих суммарных затрат на электроэнергию, потребитель действует в рамках своих интересов и оказывает негативное влияние на изменение формы графика нагрузки питающих подстанций. В статье изучено влияние различных режимов работы источников распределенной генерации на график нагрузки питающей подстанции. Эффективность сглаживания графика питающей подстанции в зависимости от стратегии управления режимами работы генерации оценивалась с использованием стандартных статистических выражений, а также потерь энергии в сети.

*Ключевые слова* — распределительная сеть; оптимизация режима работы; распределенная генерация; график нагрузки.

## Estimating the influence of the distributed generation operation mode on the load curve of supply substations

V.V. Dubailova, N.D. Mukhlynin

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russian Federation  
E-mail: lera35110@gmail.com

*Abstract* - Today, when distributed generation becomes more and more relevant, consumers' generators have an opportunity to influence on their load curve by means of regulating generated power. By controlling highly maneuverable sources of generation (diesel-generator and gas-turbine plants) for reducing the electricity costs, the consumer acts within his interests and has a negative impact on changing the shape of the load curve of supply substations. The influence of various operation modes of distributed generation sources on the load curve of the supply substation was studied in this paper. The efficiency of smoothing the load curve of the supply substation depending on the strategy of controlling the operation modes of generation was estimated using standard statistical expressions and also energy losses in the grid.

*Keywords* — distribution grid; operation mode optimization; distributed generation; load curve.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Появление распределенной генерации (РГ) в распределительных сетях связано с желанием потребителей снизить их суммарные затраты на электроэнергию (ЭЭ). Уменьшение себестоимости выработки ЭЭ собственными генерирующими установками в целом способствует снижению объемов ее покупки из сети общего пользования и увеличению выработки ЭЭ собственными генерирующими установками. Для этого используются высокоманевренные установки, работающие на доступном топливе. Среди них можно выделить: дизель-генераторные (ДГУ), газотурбинные (ГТУ), газопоршневые (ГПУ) и возобновляемую энергетику.

Режимы работы потребительских установок РГ могут значительно изменяться в зависимости от текущих экономических и технических показателей, а также климатических условий. Как правило, малые установки РГ (до 25 МВт) получившие широкое распространение, не находятся в ведении диспетчерских центров, поэтому

резкие изменения их режимов работы могут оказывать негативное влияние на питающую распределительную сеть при условии их параллельной работы. Кроме того, появление установок РГ в распределительных сетях приводит к рискам быстрого изменения графиков нагрузок крупных питающих подстанций (ГПП). В таких условиях реакция на нарушение баланса нагрузки и генерации со стороны крупных электростанций может не быть достаточно оперативной.

В связи с этим, появляется необходимость оперативной оценки изменения графиков нагрузок питающих подстанций с подключенными к ним участками распределительных сетей и наличия в них источников РГ.

### II. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ГРАФИК НАГРУЗКИ ПИТАЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ

Для демонстрации влияния различных режимов работы источников РГ на график нагрузки главной понижающей подстанции использовался тестовый участок

сети размерностью 58 узлов с добавлением трех источников РГ различного типа и мощности. К узлу 3 подключена газопоршневая установка мощностью 0.6 МВт, в узел 4 – газотурбинная установка мощностью 1 МВт, в узел 5 – дизель-генераторная установка мощностью 1.5 МВт. Мощности установок выбраны таким образом, чтобы их работа в минимальном режиме сети не приводила к реверсу потоков на ГПП. Упрощенная схема сети приведена на рис. 1.

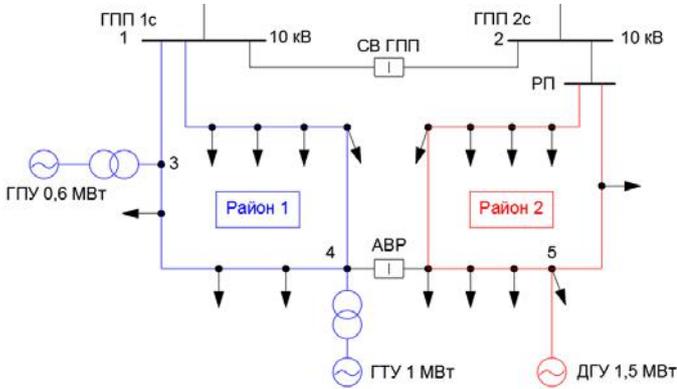


Рис. 1. Упрощенная схема тестовой распределительной сети

Представленная на рисунке 1 схеме сети содержит два питающих кольцевых участка. Потребители в рамках каждого из колец получают питание по двум фидерам, подключенным к одной секции одного и того же центра питания (ГПП). При наличии РГ такая схема является наиболее оптимальной [2]. С одной стороны, надежность питания потребителей обеспечивается кольцевой структурой сети, а с другой – эффективность работы с источниками РГ определяется минимумом потерь ЭЭ.

Для каждого нагрузочного узла был задан суточный график нагрузки. Этот график разбит на 48 получасовых интервалов, т.е. задано усредненное значение мощности на каждом интервале 0.5 часа.

Эффективность сглаживания графика нагрузки в зависимости от режима работы РГ можно оценить, используя следующие выражения [3]:

- Коэффициент неравномерности графика - отношение минимальной суточной нагрузки  $W_{\min}$  к максимальной  $W_{\max}$  за установленный интервал времени:

$$\alpha = \frac{W_{\min}}{W_{\max}}; \quad (1)$$

- Коэффициент заполнения - отношение средней суточной нагрузки  $W_{\text{ср}}$  к максимальной  $W_{\max}$  за установленный интервал времени:

$$\beta = \frac{W_{\text{ср}}}{W_{\max}}; \quad (2)$$

- Максимальный диапазон регулирования нагрузки - наибольшая разность между максимальной  $W_{\max}$  и минимальной  $W_{\min}$  нагрузками энергосистемы, которая определяет требуемую маневренность работающего оборудования электростанций:

$$\Delta W_{\max} = W_{\max} - W_{\min}; \quad (3)$$

- Скорость изменения графика нагрузки – максимальное увеличение или снижение нагрузки  $\Delta W_{i_{\max}}$  за короткий промежуток времени  $\Delta t$ . Характеризуется тангенсом угла наибольшего наклона графика нагрузки:

$$\text{tg } \varphi_{\max} = \frac{\Delta W_{i_{\max}}}{\Delta t}; \quad (4)$$

- Дисперсия – среднееквадратическое отклонение нагрузки на каждом промежутке времени  $P_T$  от среднего значения мощности  $P_{\text{ср}}$ :

$$D = \frac{\sum_{t=1}^T (P_T - P_{\text{ср}})^2}{T}; \quad (5)$$

Кроме этого, влияние РГ на работу сети будет оцениваться путем сравнения потерь энергии, полученных методом оперативных расчетов.

Рассмотрим изменение суточного графика нагрузки на шинах ГПП при различных режимах работы РГ.

#### А. В сети отсутствуют или отключены источники РГ

Для каждого из 48 интервалов времени, на основе заданных графиков нагрузки был посчитан установившийся режим (УР). На основе результатов расчетов УР, были получены суточные графики нагрузки для обеих секций ГПП, состоящие из получасовых значений энергий. Эти графики нагрузки изображены на рис. 2 – для узла 1, на рис. 3 – для узла 2. Пунктиром указана граница базовой части графика.

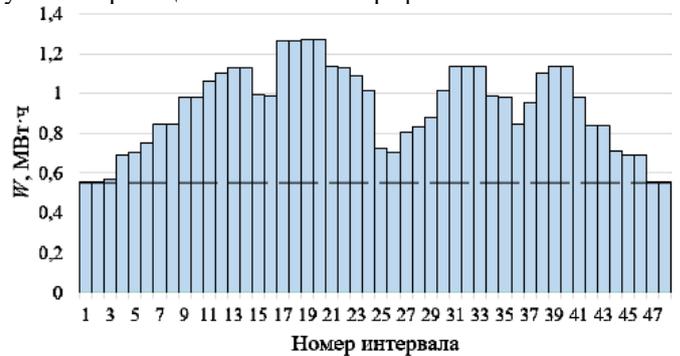


Рис. 2. График нагрузки в узле 1 без РГ в сети

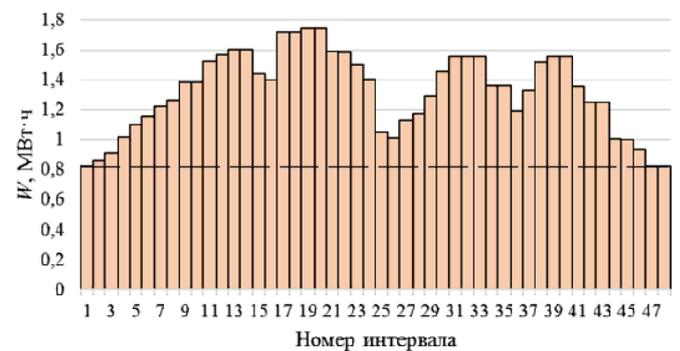


Рис. 3. График нагрузки в узле 2 без РГ в сети

Характеристики полученных графиков нагрузки без РГ в сети приведены в таблице I.

Таблица I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ БЕЗ РГ В СЕТИ

Номер узла	Узел 1	Узел 2
Максимальный объем ЭЭ за полчаса, (МВт·ч)	1.272	1.746
Минимальный объем ЭЭ за полчаса, (МВт·ч)	0.554	0.825
Средний объем ЭЭ в течение суток, (МВт·ч)	0.931	1.320
Коэффициент неравномерности графика, %	0.435	0.473
Коэффициент заполнения графика, %	0.732	0.756
Диапазон регулирования, (МВт·ч)	0.719	0.920
Тангенс угла наибольшего наклона графика	0.570	0.708
Дисперсия	0.044	0.071
Потери ЭЭ, (МВт·ч)	1.625	0.692

**В. РГ работает в режиме выдачи постоянной мощности**

Известно, что для ДГУ оптимальной считается загрузка в диапазоне от 40 % до 75 % от номинального значения. Если загрузка составляет менее 40 % или более 75% от номинальной мощности, удельный расход топлива ДГУ значительно возрастает [4].

Эффективность использования ГТУ обеспечивается в более широком диапазоне их загрузок: от минимальных 1–3 % до максимальных 100 % [5].

Нагрузка ГПУ для эффективной работы должна составлять от 50 до 100 % от номинальной мощности [6].

Для примера примем, что загрузка всех генераторных установок составляет 60 % от их номинальной мощности. Получим графики их работы, показанные на рис. 4:

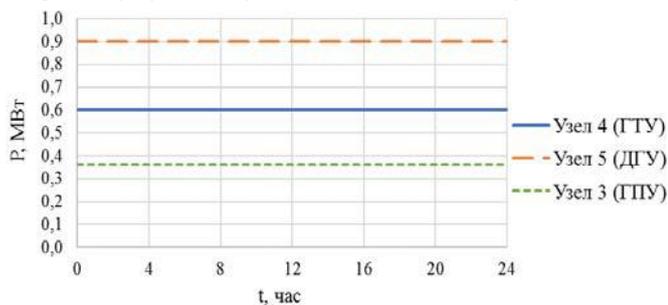


Рис. 4. Графики выдачи постоянной мощности источниками РГ

Суточные графики нагрузки для данного режима изображены на рис. 5 – 6 для узлов 1 и 2 соответственно.

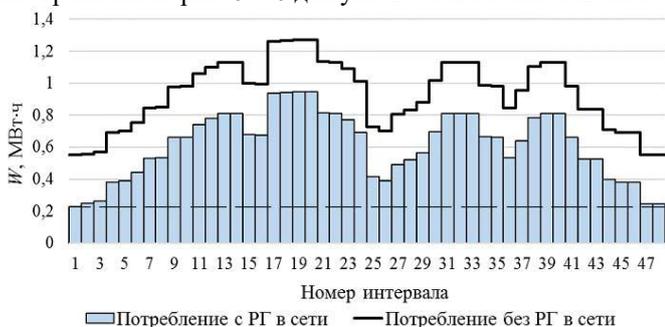


Рис. 5. График нагрузки в узле 1 с выдачей постоянной мощности РГ

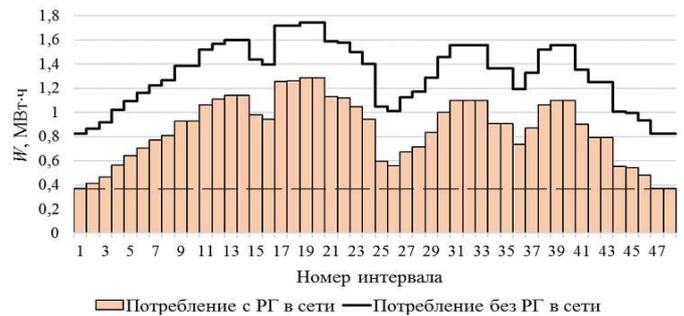


Рис. 6. График нагрузки в узле 2 с выдачей постоянной мощности РГ

Из графиков видно, что базовая часть снизилась на 0.32 МВт·ч в узле 1 и на 0.45 МВт·ч в узле 2. Крупные электростанции вынуждены смещаться в пиковую и полупиковую части. В таблице II приведены характеристики графиков нагрузки питающей подстанции при выдаче постоянной мощности источниками РГ, установленными в сети.

Таблица II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ С ВЫДАЧЕЙ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКАМИ РГ В СЕТИ

Номер узла	Узел 1	Узел 2
Максимальный объем ЭЭ за полчаса, (МВт·ч)	0.948	1.287
Минимальный объем ЭЭ за полчаса, (МВт·ч)	0.229	0.373
Средний объем ЭЭ в течение суток, (МВт·ч)	0.614	0.864
Коэффициент неравномерности, %	0.242	0.290
Коэффициент заполнения, %	0.648	0.672
Диапазон регулирования, (МВт·ч)	0.719	0.914
Тангенс угла наибольшего наклона графика	0.556	0.704
Дисперсия	0.042	0.070
Потери ЭЭ, (МВт·ч)	1.380	0.406

С добавлением в сеть РГ, работающей в режиме постоянной выдачи мощности, снизилась суммарная нагрузка сети. Разгрузка питающих линий приведет к снижению потерь на них.

Потери ЭЭ в районе 1 уменьшились на 0.245 МВт·ч (15.1 %), а в районе 2 – на 0.286 МВт·ч (41.3 %), что приведет к снижению затрат сетевой компании на транспорт ЭЭ в данной сети. Коэффициенты неравномерности и заполнения снизились. Остальные характеристики остались прежними или изменились незначительно.

**С. В сети осуществляется регулирование выдачи мощности РГ**

При регулировании режима работы источников РГ нужно учитывать, что для ДГУ и ГПУ недопустим резкий сброс/наброс нагрузки более чем на 30 %. Высокоманевренные ГТУ позволяют мгновенно увеличивать нагрузку на 50-100 % [7].

Исходя из графика нагрузки питающей подстанции, а также особенностей регулирования режима работы рассматриваемых установок, составлены графики выдачи регулируемой мощности источниками РГ, представленные на рис. 7.

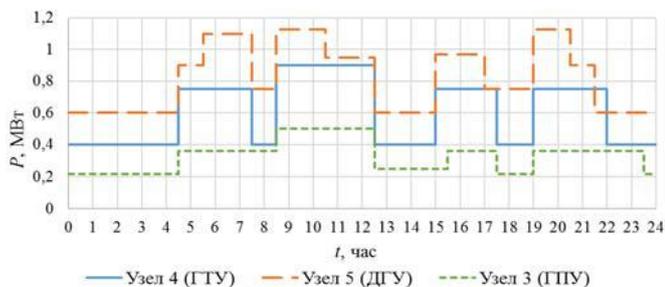


Рис. 7. Графики выдачи регулируемой мощности источниками РГ

Суточные графики нагрузки для данного режима изображены на рис. 8 – для узла 1, на рис. 9 – для узла 2.

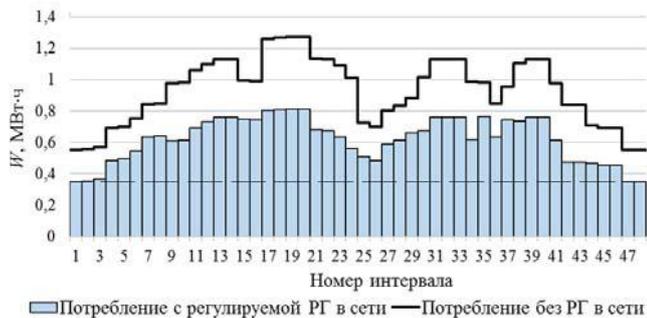


Рис. 8. График нагрузки в узле 1 с выдачей регулируемой мощности РГ в сети

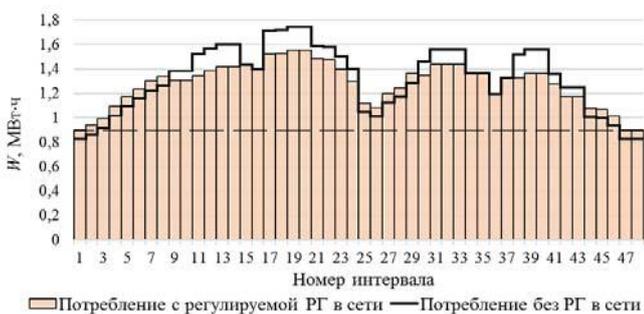


Рис. 9. График нагрузки в узле 2 с выдачей регулируемой мощности РГ в сети

Характеристики графиков нагрузки при регулировании выдаваемой мощности РГ в сети приведены в таблице III.

Таблица III. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ВЫДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ РГ В СЕТИ

Номер узла	Узел 1	Узел 2
Максимальный объем ЭЭ за полчаса, (МВт·ч)	0.814	1.552
Минимальный объем ЭЭ за полчаса, (МВт·ч)	0.349	0.901
Средний объем ЭЭ в течение суток, (МВт·ч)	0.621	1.278
Коэффициент неравномерности, %	0.428	0.580
Коэффициент заполнения, %	0.762	0.824
Диапазон регулирования, (МВт·ч)	0.466	0.652
Тангенс угла наибольшего наклона графика	0.298	0.352
Дисперсия	0.020	0.032
Потери ЭЭ, (МВт·ч)	1.406	0.548

Управление потребительскими генераторными установками привело к следующим результатам:

- Увеличились коэффициенты неравномерности и заполнения, что ведет к снижению расходов топлива на электростанциях внешней энергосистемы от неравномерности графика;
- Тангенс угла наибольшего наклона графика снизился вдвое, что говорит о снижении скорости изменения графика нагрузки. К тому же, уменьшился диапазон регулирования нагрузки, что облегчает работу маломаневренных электростанций;
- Способность мгновенного набора нагрузки ГТУ и наличие большего числа установок РГ в районе 1 расширяет возможности коррекции графика в узле 1;
- Потери ЭЭ удалось снизить относительно режима без генерации на 0.219 МВт·ч (13.5 %) в районе 1 и на 0.144 МВт·ч (20.8 %) в районе 2.

### III. ВЫВОДЫ

1. Наличие в сети РГ, работающей с постоянной мощностью, приводит к сокращению базовой части графика нагрузки на шинах ГПП. При этом происходит вытеснение крупных электростанций из базовой части графика в пиковые и полупиковые части.

2. Управление потребительскими генераторными установками позволяет сгладить график нагрузки питающей подстанции, облегчая работу маломаневренных электростанций.

3. Применяя высокоманевренные ГТУ и увеличивая количество РГ в сети, можно усилить влияние на график нагрузки.

### Список литературы

- [1] Гура, К. Ю. Выравнивание графика нагрузки и применение многотарифных электросчетчиков – реальный путь экономии энергоресурсов // Электрик. Международный электротехнический журнал. – 2010. – № 1–2.
- [2] Мухлянин Н.Д., Паздерин А.В. Решение задачи управления распределительными сетями для оптимизации режимов их работы // Электроэнергетика глазами молодежи: труды 6-й Международ. науч.-техн. конф. – Иваново, 2015. – С. 332–337.
- [3] Гуртовцев, А. Электрическая нагрузка системы. Выравнивание графика // Новости электротехники. – 2008. – № 5. – С. 31–37.
- [4] Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б. Способы снижения расхода топлива дизельных электростанций // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 1. – С. 237–238.
- [5] Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций / Цанев С., Бузов В.Д., Ремезов А.Н. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 с.
- [6] Платонов А.С., Пихлецкий В.В. Оценка эффективности работы мини-ТЭЦ на базе газопоршневых установок // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – № 11–12.
- [7] Lebedev, A. S., Kostennikov, S. V. Trends in increasing gas-turbine units efficiency // Thermal Engineering. 2008, Vol. 55, No. 6, pp. 461 – 468.

# Топливные элементы использования водорода в энергетике

О.М. Стефановская<sup>1</sup>, А.В. Чемезов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Иркутский национально исследовательский технический университет"

Иркутск, Россия

E-mail: olyastefanovskaya@mail.ru

**Аннотация** - одной из проблем современной энергетики выступает ограниченность существующих источников энергии. Для того чтобы получать топливо, когда на Земле будут исчерпаны запасы нефти и газа, необходимо переходить к новым источникам энергии и иметь "чистую энергетику". Главным решением этой проблемы выступает водородная энергетика: использование водорода как основного энергоносителя и топливных элементов как генераторов электроэнергии. Одновременно резко сократится потребление ископаемых топлив, потому что водород можно получать из воды, разлагая ее на водород и кислород. Энергию для этого будут давать ядерная энергетика и возобновляемые источники. Фактически задача состоит в том, чтобы создать топливные элементы и использовать водород для получения электрической энергии. Главная цель – получение водорода из различных источников. Один из таких - природное топливо: метан, уголь, древесина и т.д. При взаимодействии топлива с парами воды или воздухом образуется синтез-газ - смесь CO и H<sub>2</sub>. Из нее затем выделяется водород. Другой источник - отходы сельскохозяйственного производства, из которых получают биогаз, а затем - синтез-газ. Выработка электроэнергии с использованием водорода связана непосредственно с топливными элементами. Топливные элементы представляют собой гальванические ячейки, в которых вырабатывается электроэнергия за счет протекания окислительно-восстановительных превращений реагентов, непрерывно поступающих к электродам извне. Топливные элементы применяются при использовании одновременно и электрической и тепловой энергии, в распределительных сетях, в автономной энергетике, в мегаваттных установках для децентрализованной энергетики. Также, топливные элементы использования водорода могут быть основой функционирования электромобилей. Приоритетными работами по данной теме могут стать: создание твердополимерных и твердооксидных топливных элементов, разработка комплексов по производству водорода, создание высокоэффективных энергетических установок на основе топливных элементов, разработка перспективных технологических процессов и изготовление высокотехнологичной продукции на основе использования палладия и металлов платиновой группы.

**Ключевые слова** - топливные элементы; альтернативные источники энергии; водородная технология; высокий кпд; инновационность.

## Fuel cells use hydrogen to energy

O.M. Stefanovskaya<sup>1</sup>, A.V. Chemezov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State Technical University

Irkutsk, Russian Federation

E-mail: olyastefanovskaya@mail.ru

**Abstract** - one of the problems of modern energy is the scarcity of existing energy sources. In order to receive fuel, when oil and gas reserves are exhausted on the Earth, it is necessary to move on to new sources of energy and have "clean energy". The main solution to this problem is hydrogen energy: the use of hydrogen as the main energy carrier and fuel cells as electricity generators. Simultaneously, the consumption of fossil fuels will decrease drastically, because hydrogen can be obtained from water, decomposing it into hydrogen and oxygen. Energy for this will be provided by nuclear power and renewable sources. In fact, the task is to create fuel cells and use hydrogen to generate electrical energy. The main goal is to obtain hydrogen from various sources. One such is natural fuel: methane, coal, wood, etc. When the fuel interacts with water vapor or air, a synthesis gas is formed - a mixture of CO and H<sub>2</sub>. Then hydrogen is extracted from it. Another source is waste from agricultural production, from which biogas is obtained, and then - synthesis gas. The generation of electricity using hydrogen is directly related to the fuel cells. Fuel cells are galvanic cells in which electricity is generated through the flow of oxidation-reduction transformations of reagents that continuously enter the electrodes from the outside. Fuel cells are used when using both electric and thermal energy, in distribution networks, in autonomous power engineering, in megawatt plants for decentralized energy. Also, hydrogen fuel cells can be the basis for the operation of electric vehicles. Priority work on this topic can be: the creation of solid polymer and solid oxide fuel cells, the development of complexes for the production of hydrogen, the creation of highly efficient power plants based on fuel cells, the development of promising technological processes and the manufacture of high-tech products based on the use of palladium and platinum group metals.

**Key-words** - fuel cells; Alternative energy sources; Hydrogen technology; High efficiency; Innovativeness.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современный мир характеризуется острой нехваткой существующих источников энергии. По проведённым исследованиям, можно сказать, что таких источников получения электроэнергии, как нефть и газ - хватит меньше, чем на 100 лет, угля - примерно на 400 лет, ядерного топлива - на 1000 лет. Использование водорода как основного энергоносителя и топливных элементов как генераторов электроэнергии – позволит решить поставленную проблему.

Топливные элементы использования водорода отличаются от других способов получения энергии особой эффективностью, надёжностью, долговечностью и экологичностью.

Изначально данные элементы использовались только в космической отрасли, но сейчас топливные элементы обретают все большую популярность в разных сферах и областях. Так, первая электроэнергия была получена указанным способом в 1839 г. В России же такие установки разрабатывались для программы «Буран» в НПО «Энергия». С 1990-х годов и по настоящее время идет разработка топливных элементов мощностью от 1 кВт до 1 МВт для стационарной автономной энергетики [1].

### II ВЫРАБОТКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПЛИВНЫХ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА

Водород – удобное вещество для аккумуляции и более рационального использования энергии, получаемой от солнца, ветра и других возобновляемых источников энергии. Главная цель – получение водорода из различных источников. Один из таких - природное топливо: метан, уголь, древесина и т.д. При взаимодействии топлива с парами воды или воздухом образуется синтез-газ - смесь CO и H<sub>2</sub>. Из нее затем выделяется водород. Другой источник - отходы сельскохозяйственного производства, из которых получают биогаз, а затем - синтез-газ. Промышленно-бытовые отходы так же используются для производства синтез-газа, что способствует одновременно и решению экологических проблем, поскольку отходов много и их нужно утилизировать. В конечном счете, образуются углекислый газ, водород и окись углерода. Далее идет каталитическая очистка, электрохимическая конверсия и т.д. Водород можно получать также электролизом воды, то есть разложением ее под воздействием электрического тока [2]. Очень важным элементом при преобразовании газа, содержащего водород, является очистка газа на палладиевых мембранах. В итоге, получается чистый водород.

Выработка электроэнергии с использованием водорода связана непосредственно с топливными элементами. Топливные элементы представляют собой гальванические ячейки, в которых вырабатывается электроэнергия за счет протекания окислительно-восстановительных превращений реагентов, непрерывно поступающих к электродам извне. Причем, в процессе электрохимической реакции это происходит напрямую, в отличие от традиционных источников, при которых используется сжигание твердого, жидкого и газообразного топлива. Такой способ преобразования топлива весьма эффективен с экологической стороны рассмотрения, так как в процессе преобразования выделяется минимальное количество вредных отходов, а также отсутствуют разрушающие шумы и вибрации. В простейшем топливном элементе, где используются чистый водород и чистый кислород, на аноде происходит разложение

водорода и его ионизация. Из молекулы водорода образуются два иона водорода и два электрона. На катоде водород соединяется с кислородом и возникает вода. Фактически в этом и состоит главный экологический выигрыш: в атмосферу выбрасывается водяной пар вместо огромного количества углекислого газа, образующегося при работе традиционных тепловых электростанций [2].

Одно из достоинств топливных элементов состоит в том, что они энергетически более эффективны, чем двигатели внутреннего сгорания, так как для топливных элементов нет термодинамического ограничения коэффициента использования энергии. КПД топливных элементов составляет 50 %, а КПД двигателей внутреннего сгорания составляет 12—15 %, в то время как КПД паротурбинных энергетических установок с натяжкой достигает 40 %. Также, мощность топливных элементов можно увеличить добавлением отдельных блоков, при этом КПД не изменится.

Топливные элементы получения энергии можно размещать в зданиях, снижая потери при транспортировке энергии, а тепло, которое образуется в самом процессе, можно использовать для теплоснабжения здания.

В топливном элементе отсутствуют движущиеся части, что обеспечивает высокую надежность, то есть долговечность и простоту использования. Также, топливные элементы отличаются быстрой реакцией на перепады мощности.

Но среди всех достоинств топливных элементов, есть весомый недостаток их эксплуатации - высокая стоимость.

### III ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЯЧЕЕК

Топливные элементы наиболее эффективны при использовании одновременно и электрической и тепловой энергии. Но, возможность использования тепловой энергии существует не на каждом объекте. В случае использования топливных элементов только для выработки электрической энергии их КПД уменьшается, хотя превышает КПД «традиционных» установок [2].

Применение данного способа получения энергии используется и в *распределительных сетях*: малые теплоэнергетические установки предназначены для работы в распределенной сети выработки энергии, состоящей из большого числа малых генераторных установок вместо одной централизованной электростанции. Потери эффективности при централизованной выработке включают потери с электростанции, низковольтной и высоковольтной передачи, а также потери при распределении.

Для автономной энергетики предназначаются твердооксидные топливные элементы. Вырабатываемый ими 1 кВт установленной мощности стоит сейчас 3 тыс. долл., приемлемая для водородной энергетики стоимость - 1 тыс. долл. - может быть вскоре достигнута. Примером может стать энергоустановка, основой которой является солнечная батарея. Наличие солнечного света и потребность в энергии не всегда совпадают. Когда потребление энергии незначительное, электрическая энергия от солнечной батареи может использоваться для электролиза воды и получения водорода. Водород поступает в накопитель и по мере необходимости используется для выработки электроэнергии в водородных электрохимических генераторах. Такая гибридная система, возможно, и будет основой для будущей автономной электроэнергетики.

В мегаваттных установках для децентрализованной энергетики используются фосфорноокислые и расплавокарбонатные топливные элементы и метан в качестве топлива с последующим преобразованием его в водород химическими методами.

В Японии создана энергетическая установка на топливных элементах мощностью 100 кВт, в Германии - установка мощностью 250 кВт, функционирующая как небольшая автономная электростанция. Фирма "Сименс Вестингаус" разработала гибридную энергетическую установку на твердоокисных топливных элементах. В ней мощная струя выходящих газов используется для работы газовой турбины, то есть к электрической энергии, вырабатываемой топливными элементами, добавляется электрическая энергия, вырабатываемая турбиной.

Так, топливные элементы использования водорода стали основой функционирования электромобилей. Так, компания «Audi» презентовала электромобиль с водородными топливными элементами. Электромобиль дебютировал на автосалоне в Лос-Анджелесе. Он оснащен электрическим приводом, использующим в качестве источника энергии водородные топливные элементы, а также гибридной тяговой батареей и дополнительным электродвигателем. Суммарная мощность составляет 170 кВт [5].

Топливная батарея установлена под капотом и представляет собой блок из 300 топливных элементов. Основной деталью конструкции каждого элемента является полимерная мембрана, на обе стороны которой нанесен слой катализатора, изготовленного на основе платины. На анод элемента поступает водород, который расщепляется на протоны и электроны, затем протоны проходят через мембрану к катоду, где реагируют с атмосферным кислородом с образованием паров воды. Электроны, оказывающиеся за пределами батареи элементов, обеспечивают электропитание - в зависимости от точки подключения нагрузки напряжение отдельного элемента составляет от 0,6 до 0,8 вольт, а общее напряжение батареи варьируется от 230 до 360 вольт. Зарядить батарею можно либо от промышленной розетки с напряжением 360 вольт - за два часа, либо от бытовой розетки с напряжением 230 вольт - за четыре часа. Силовая электроника преобразует постоянный ток, генерируемый топливным элементом и аккумуляторной батареей, в переменный для питания электродвигателей передней и задней оси. Четыре водородных баллона расположены под полом багажного отсека концепта, перед задней осью и в центральном тоннеле. Внутренняя часть баллона изготовлена из алюминия, а внешний слой — из углепластика. Баллоны вмещают около пяти килограммов водорода при давлении 700 бар, что обеспечивает запас хода около 500 км. Расход топлива при этом составляет примерно один килограмм водорода на 100 км пути, что с энергетической точки зрения эквивалентно 3,7 литра бензина на 100 км [4].

В России на протяжении 20 лет десятки академических институтов ведут исследования в этой области. В Институте катализа им. Г.К.Борескова СО РАН изучается возможность использования металлов платиновой группы (палладия, платины и др.) для получения водорода. Создан ряд катализаторов для получения водорода из метана с последующей его очисткой с помощью мембран. В Институте электрофизики УрО РАН по совместной программе с Институтом высокотемпературной

электрохимии УрО РАН разработаны методы получения нанопорошков и нанокерамики путем магнитного прессования. Генерация электрической энергии в твердоокисных топливных элементах происходит при температуре 950о С и плотности мощности 470 МВт/см<sup>2</sup>. В 1999 г. для космического аппарата "Ямал" были созданы модули из двух никель-водородных аккумуляторных батарей то есть водород можно использовать не только для топливных элементов, но и для аккумуляторов энергии.

Существуют и приоритетные направления работ академических институтов в рамках Генерального соглашения между Российской академией наук и ОАО "Горно-металлургическая компания «Норильский никель»" [3]:

- создание твердополимерных и твердоокисных топливных элементов, а также дальнейшее изучение возможностей щелочных топливных элементов, топливных процессоров для получения водорода из углеводородных топлив;
- разработка комплексов по производству, очистке, аккумулированию, хранению и транспортировке водорода;
- создание высокоэффективных экологически чистых энергетических установок и электрохимических генераторов широкого класса на основе топливных элементов, в том числе для использования в бытовых электронных устройствах;
- разработка ключевых элементов инфраструктуры водородной энергетики;
- разработка перспективных технологических процессов и изготовление высокотехнологичной продукции на основе использования палладия и металлов платиновой группы.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главная цель водородной технологии - снижение зависимости от существующих энергоносителей. Топливные элементы представляют собой весьма рациональный и надежный способ получения энергии. Не смотря на дорогостоящее оборудование, данные элементы обретают все большую популярность и инновационность. К числу достоинств относятся: высокий КПД, низкая токсичность, бесшумность, модульная конструкция, многообразие первичных видов топлива, широкий интервал мощности.

#### Список литературы

- [1] Сулов К.В., Конохов В.Ю., Субанова Н.В. Экономика и электроэнергетика две вершины развития России// Информатизация и виртуализация экономической и социальной жизни Материалы II Межвузовской студенческой научно-практической конференции с международным участием. Иркутский национальный исследовательский технический университет. 2017. С. 76-81.
- [2] Шамарова Н.А., Крупнев Д.С., Конохов В.Ю. Влияние возобновляемых источников энергии на надежность электроснабжения ПОТРЕБИТЕЛЕЙ//Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 423-428.
- [3] Конохов В.Ю., Чарушина С.В. Основы Системы Энергоменеджмента//Научные Стратегии Современных Государств Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. 2016. С. 44-47.
- [4] Шамарова Н.А., Сулов К.В., Конохов В.Ю. Управление инновационной деятельностью в российских энергокомпаниях//Энергия-2016 Экономические аспекты развития энергетики. 2016. С. 78-80.

# СХЕМЫ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ И ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ЭНЕРГОСИСТЕМЕ «МАЛЫХ» СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВАРЬИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

А.И.Гаврилов<sup>1</sup>, М.Е. Гольдштейн<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал АО «СО ЕЭС» Челябинское РДУ, <sup>2</sup>Южно-Уральский Государственный Университет (НИУ)  
Челябинск, Россия

E-mail: GavrilovAI@chelrdu.so-ups.ru

*Аннотация - В ряде случаев по технологическим или технико-экономическим причинам целесообразна эксплуатация приводных двигателей синхронных генераторов с варьiruемой скоростью вращения. Подключение таких синхронных генераторов к энергосистеме возможно при включении между ними согласующих устройств, обычно выполняемых на основе элементов силовой электроники, в частности активных фильтров. Исследования схем таких энергоблоков, их функциональных возможностей сегодня недостаточно, не разработаны дополнительные условия к требованиям на технологическое присоединение таких блоков к электрическим сетям. Для анализа функциональных возможностей энергоблоков, включающих синхронный генератор с варьiruемой частотой и активный фильтр, согласующий частоты генератора и сети, определения параметров их элементов применялось сочетание методов математического моделирования энергосистем с методами моделирования и расчета элементов силовой электроники. Рассмотрены различные варианты энергоблоков с активными фильтрами на базе преобразователей напряжения, определены их функциональные возможности и параметры. Выполнено сравнение вариантов. Сформулированы дополнительные условия к требованиям на технологическое присоединение таких блоков к электрическим сетям. Определены области применения различных вариантов энергоблоков с активными фильтрами на базе преобразователей напряжения и показано, что фильтрам кроме функций согласования частоты синхронного генератора и энергосистемы целесообразно передать и функции регулирования напряжения и реактивной мощности энергоблока.*

*Ключевые слова - технологическое присоединение, синхронный генератор, активный фильтр, преобразователь напряжения, математическое моделирование.*

## THE SCHEME OF POWER DISTRIBUTION AND CONNECTION TO THE POWER SYSTEM "SMALL" SINCHRONOUS GENERATORS WITH VARIABLE SPEED

A.I.Gavrilov<sup>1</sup>, M.E. Gol'dshtein<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«SO UPS», ОИС Chelaybinskoe RDU, JSC, <sup>2</sup>South Ural State University (NIU),  
Chelyabinsk, Russia

E-mail: GavrilovAI@chelrdu.so-ups.ru

*Abstract - In some cases, due to technological or technical and economic reasons, there is suitable to operate the drive motors of synchronous generators with variable speed. Connecting these synchronous generators to the grid is possible when coupling with some matching devices, typically based on the elements of power electronics, in particular active filters. There are no sufficient research of the schemes of such units and their functionality, there are no developed additional conditions to the requirements of the technological connection those power units to grid. To analyze the functionality of the units, including the synchronous generator with variable frequency and active filter, which matches generator frequency and networks, and definition of the parameters of their elements there was applied a combination of mathematical modeling of power systems with methods of modeling and calculation of elements of power electronics. Different options of power units with active filters based on the voltage source converters are considered, their functionality and parameters are defined. The comparison of options was done. There were formulated additional conditions to the requirements of the technological connection of the units to grid. Areas of application of different options for power units with active filters based on VSC were define. It is shown that in addition to coordination functions of the synchronous generator and the power system frequency and voltage it is advisable to transfer to the filters the functions of power unit voltage and reactive power regulation.*

*Key words - Technological connection, synchronous generator, active filter, VSC, mathematical modelling.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

По технологическим или технико-экономическим причинам может быть целесообразна эксплуатация приводных двигателей синхронных генераторов с варьiruемой скоростью вращения. Подключение таких

синхронных генераторов к энергосистеме возможно при включении между ними согласующих устройств, обычно выполняемых на основе элементов силовой электроники. Обладая более высоким быстродействием и более широкими функциональными возможностями, эти элементы позволяют эффективно решать задачи

управления в энергосистеме, как в рабочих, так и в аварийных режимах [1-7]. В заявке на технологическое присоединение таких систем предлагается объявлять присоединение не генератора, а энергоблока, включающего и схему его связи с электрическими сетями. В этом случае сетевым предприятиям не придется анализировать процессы, внутри блока, а решать только типовые задачи присоединения [6]. При этом на этапе внестадийных работ следует определить схему выдачи мощности, включающую и элементы силовой электроники [8].

В зависимости от типа источников генерации, их мощности, допустимых режимов при вариациях скорости вращения СГ и отличии частоты его напряжения от частоты сети применяются различные структурные схемы присоединения генератора к энергосистеме [6,7]. При большом отношении частот напряжений генератора и энергосистемы обычно применяется преобразователь частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока, содержащий выпрямитель и инвертор, которые сегодня обычно выполняются на основе преобразователей напряжения (ПН) [6,7]. Уже эксплуатируется большое количество энергоблоков с ПЧ. Установленная мощность силового

оборудования на основе СЭ в этих блоках обычно более чем в два раза превышает мощность самого блока.

При небольших отклонениях частоты напряжения генератора от синхронной можно между ним и сетью включить активный фильтр (АФ), обычно выполняемый на основе преобразователей напряжения (ПН) [7]. АФ (рис.1) может также оказаться полезным и в случаях, когда номинальная частота СГ равна синхронной, но в некоторых режимах энергосистемы отличается от синхронной. Это происходит при резком изменении нагрузки генератора либо при изменении условий работы приводного механизма, либо при быстрых увеличениях или снижениях мощности потребителей, а также, если при коротких замыканиях в сети скорость вращения СГ отличается от синхронной, но отличается незначительно. На АФ можно возложить не только функцию поддержания частоты блока, но и регулирования напряжения и реактивной мощности. При этом, рассмотрим не будет ли ожидаемая установленная мощность оборудования АФ определяться разностью частот напряжений СГ и энергосистемы и не будет ли она ниже, чем установленная мощность оборудования,

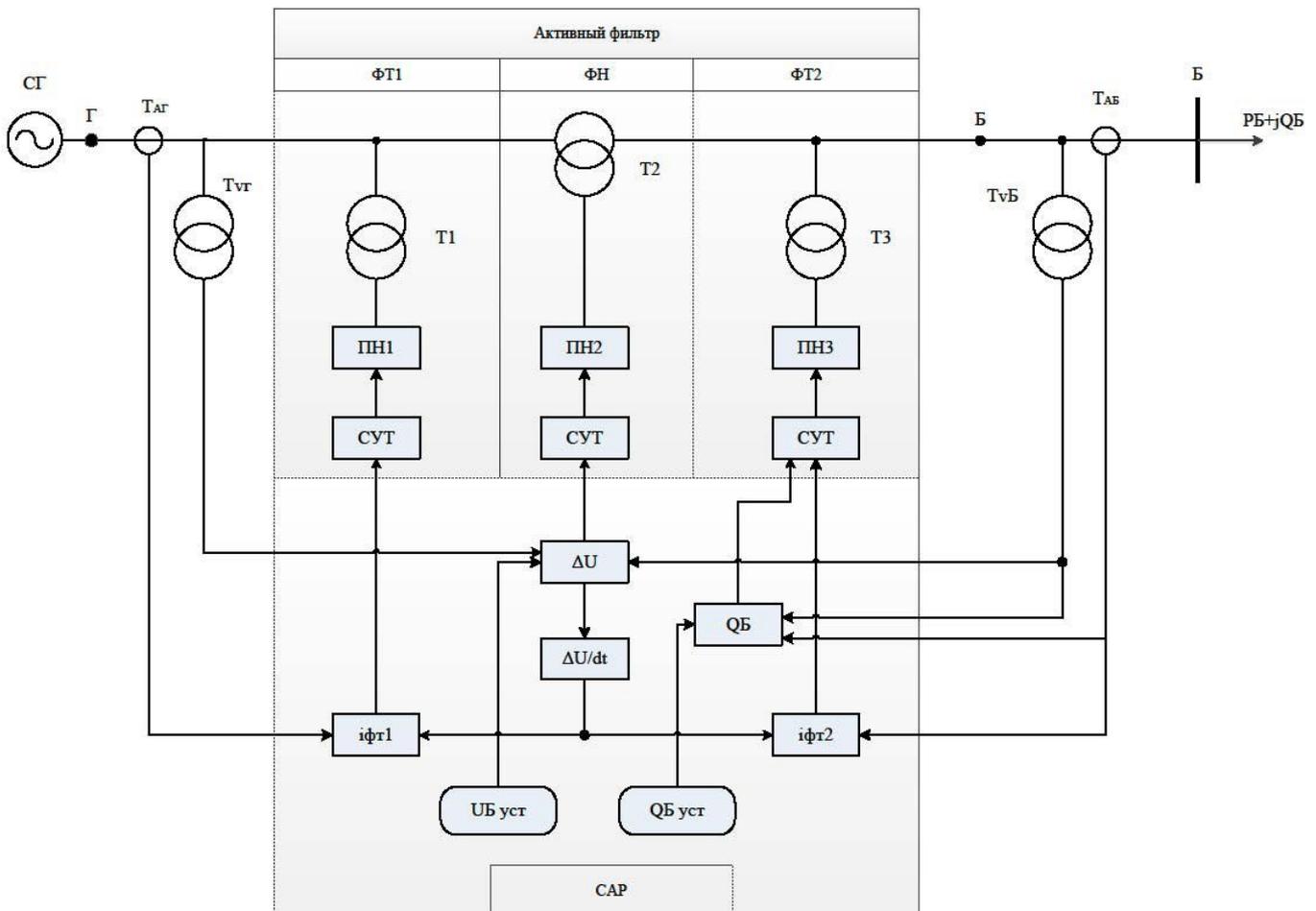


Рис.1 Схема энергоблока: «Синхронный генератор – Активный фильтр»

входящего в ПЧ. В схемах с ПН функцию регулирования реактивной мощности лучше передать ПН, подключенному на выход блока [1-5]. При этом, наряду со снижением требований к регулятору скорости вращения приводного двигателя СГ существенно снижаются требования и к его системе возбуждения. Снижаются

требования к функциям регуляторов, и их конструкция и схема могут быть упрощены, и, следовательно, повышается надежность блока в целом.

Полный комплект АФ состоит из фильтра напряжения (ФН) на базе ПН2 (рис.1), согласующего

мгновенные значения напряжения -  $u_{\Gamma}$  СГ и напряжения, нормируемого на выходе блока -  $u_{\text{Б}}$  и двух фильтров тока: ФТ1 на базе ПН1, согласующего мгновенные значения тока СГ -  $i_{\Gamma}$  и тока ФН -  $i_{\text{ФН}}$  и ФТ2 на базе ПН3, согласующего мгновенные значения тока нагрузки блока -  $i_{\text{Б}}$  и ток ФН -  $i_{\text{ФН}}$ . Кроме того, ПН3 может быть использован для регулирования реактивной мощности энергоблока, определяемой его нагрузкой в узле Б присоединения к энергосистеме.

При рассмотрении варианта присоединения к сети энергоблока, содержащего СГ несинхронной частоты  $f_{\Gamma}$  и АФ, в первую очередь, следует определить установленную мощность оборудования АФ, в частности, найти соотношение этой мощности и установленной мощности оборудования схемы на базе ПЧ. Стоимость системы регулирования АФ при этом не принципиальна, так как она не зависит от соотношения частот -  $f_{\Gamma}/f_{\text{С}}$ . Сегодня это контроллер с различным программным обеспечением, и разница в стоимости АФ и ПЧ определяется в основном стоимостью его силового оборудования.

Установленная мощность оборудования АФ находится, как сумма мощностей ФН -  $S_{\text{ФН}}$  и двух ФТ:  $S_{\text{ФТ1}}$  и  $S_{\text{ФТ2}}$ . Для определения установленной мощности оборудования АФ от соотношения частот СГ и энергосистемы  $f_{\Gamma}/f_{\text{С}}$  предварительно определим такие зависимости для каждого из элементов АФ. Исследование можно выполнить традиционным методом, создавая в каком-либо специализированном программном комплексе (*Matlab Simulink*, *АМТР* или других) модель, включающую энергоблок, состоящий из СГ несинхронной частоты и АФ, связывающего параметры режима СГ с параметрами режима энергоблока в энергосистеме. Но этот кажущийся быстрым путь для решения поставленной задачи требует в последующем большого количества опытов и тщательного их анализа. Привлекательней является аналитическое решение, которое позволит быстро найти ответы на поставленные вопросы, а кроме того, получить также зависимости, обосновывающие эти ответы. В дальнейшем для анализа конкретных вариантов АФ, анализа электромагнитных процессов в схеме и для выбора элементов АФ можно перейти и к применению специализированного программного обеспечения.

## II. МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ.

Схема замещения связи энергоблока СГ - АФ с энергосистемой (рис.2) содержит три независимых контура.

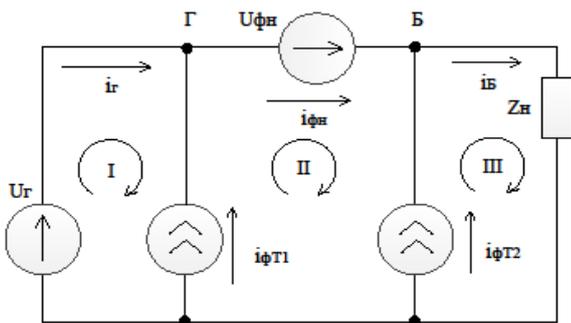


Рис.2. Схема замещения связи энергоблока СГ - АФ с энергосистемой

Первый включает СГ и источник тока -  $i_{\text{ФТ1}}$ , второй - источник тока -  $i_{\text{ФТ1}}$ , источник напряжения -  $u_{\text{ФН}}$  и источник тока -  $i_{\text{ФТ2}}$ . Третий контур включает эквивалент- $Z_{\text{Н}}$  нагрузки блока в энергосистеме и источник тока -  $i_{\text{ФТ2}}$ .

Напряжение  $U_{\Gamma}$  и  $U_{\text{Б}}$  соответственно на фильтрах тока ФТ1 и ФТ2. Напряжение фильтра напряжения -  $u_{\text{ФН}}$  находим из уравнения Кирхгофа для контура II (рис.2).

$$\sqrt{2}U_{\Gamma}\sin\omega_{\Gamma}t - U_{\text{ФН}} - \sqrt{2}U_{\text{Б}}\sin\omega_{\text{С}}t = 0 \quad (1)$$

Допустив, что напряжение блока и генератора одинаковые, получим

$$u_{\text{ФН}} = 2\sqrt{2}U_{\text{Б}}\sin[(\omega_{\Gamma}t - \omega_{\text{С}}t)/2] \cdot \cos[(\omega_{\Gamma}t + \omega_{\text{С}}t)/2] \quad (2)$$

Мгновенные значения напряжения активного фильтра - это синусоидальное напряжение с частотой  $(\omega_{\Gamma}t + \omega_{\text{С}}t)/2$ , амплитуда которого изменяется, как синусоида, с частотой  $(\omega_{\Gamma}t - \omega_{\text{С}}t)/2$  и может достигать значения  $\sqrt{2}(U_{\text{Б}} + U_{\Gamma})$ . На такое напряжение должна быть рассчитана продольная изоляция (межвитковая, межкатушечная) обмотки высшего (генераторного) напряжения последовательного трансформатора Т2 ФН. Блоки малой генерации обычно подключаются на напряжение (0,4 - 10) кВ. Изоляция на этих напряжениях обычно рассчитана на напряжения, в 3-4 раза превышающие номинальные, и поэтому не требуются дополнительные вложения в изоляцию трансформатора активного фильтра. Для снижения напряжений на полупроводниковых приборах, критичных к повышенным напряжениям, выбирается соответствующий коэффициент трансформации, согласованный с допустимыми напряжениями полупроводниковых приборов. При конструктивном выполнении ФН аналогично малогабаритному УПК, разрабатываемому НТЦ ФСК [9,10] нет необходимости в усилении главной изоляции трансформатора Т2.

После того, как определены напряжения элементов АФ:  $u_{\text{ФТ1}} = u_{\Gamma}$ ;  $u_{\text{ФН}}$  (2) и  $u_{\text{ФТ2}} = u_{\text{Б}}$  для нахождения мощности элементов АФ определим их токи. Учитывая, что активные фильтры не генерируют активную мощность, а напряжение ФН синусоидальное (2), получаем, что ток ПН2 сдвинут по отношению к напряжению на 90 град. эл.

$$i_{\text{ПН2}} = k(u_{\text{ФН}}/dt) \quad (3)$$

С другой стороны, для узла Г

$$i_{\text{ФН}} = i_{\Gamma} + i_{\text{ФТ1}}, \quad (4)$$

а для узла Б

$$i_{\text{ФН}} = i_{\text{Б}} - i_{\text{ФТ2}}. \quad (5)$$

Следовательно, при активной нагрузке блока

$$i_{\Gamma} + i_{\text{ФТ1}} = i_{\text{Б}} - i_{\text{ФТ2}} \quad (6)$$

и токи фильтров тока

$$i_{\text{ФТ1}} = i_{\text{ФТ2}} = i_{\text{ФТ}} = i_{\Gamma} - i_{\text{Б}} =$$

$$- (\sqrt{2}U_{\text{Б}}/R_{\text{Н}})\sin[(\omega_{\Gamma}t + \omega_{\text{С}}t)/2] \cdot \sin[(\omega_{\Gamma}t - \omega_{\text{С}}t)/2], \quad (7)$$

а в выражении (3)  $k = \sqrt{2}U_B / R_H$ . Если на фильтр ФТ2 возлагается и задача генерации реактивной мощности (нагрузка блока носит индуктивный характер), в его токе появляется дополнительное слагаемое, связанное с реактивной мощностью блока.

Определив для ФН действующие значения, тока  $I_{ФН}$  и напряжения  $U_{ФН}$  за период повторяемости его напряжения

$$T=2/(f_c-f_r) \quad (8)$$

Найдем мощность фильтра

$$S_{ФН} = U_{ФН} \times I_{ФН} \quad (9)$$

Для определения мощностей ФТ1 и ФТ2, также предварительно находятся действующие значения их токов и напряжений и затем их мощности:

$$S_{ФТ1} = U_G \times I_{ФТ1} \quad (10)$$

$$S_{ФТ2} = U_B \times I_{ФТ2} \quad (11)$$

Полная установленная мощность оборудования АФ:

$$S_{АФ} = S_{ФН} + S_{ФТ1} + S_{ФТ2} \quad (12)$$

### III. ЗАВИСИМОСТИ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ОТ СООТНОШЕНИЯ ЧАСТОТ НАПРЯЖЕНИЙ ГЕНЕРАТОРА И СЕТИ.

Выполненные в ПК *MatCad* исследования показали практическое отсутствие зависимостей установленной мощности элементов АФ от соотношения частот напряжений СГ и сети. При близких частотах напряжения генератора и сети мощность ФН равна мощности СГ, а мощности каждого из ФТ составляют 70% от мощности СГ. При этом суммарная мощность оборудования АФ в 2,4 раза превышает мощность генератора, т.е. практически такая же, как установленная мощность оборудования ПЧ. При изменении частоты СГ от 5 до 100 Гц эти мощности меняются в диапазоне от -2,5% до + 4%, что практически не принципиально.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана аналитическая методика определения установленной мощности оборудования активного фильтра, применяемого для связи синхронного генератора несинхронной частоты и энергосистемы в схемах выдачи мощности электростанций с такими блоками.

Результаты исследований установленной мощности оборудования блоков с ПЧ и с АФ показали, что они практически одинаковы при соотношении частот СГ и сети от 0,1 до 2. С предпочтительной областью применения блоков на базе СГ и АФ можно будет определиться только после исследования работы блоков при коротких замыканиях в энергосистеме.

### Список литературы

- [1] Гаврилов, А.И., Гольдштейн М.Е., Особенности присоединения малой генерации к электрическим сетям средствами на основе элементов силовой электроники // Научные труды 5-ой международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», том 2, Томск, 2014, С. 514 – 517.
- [2] Рыжов, Ю. Л. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю.П. Рыжов. — М: Издательский дом МЭИ, 2007. — 488 с.
- [3] Hingorani, Narain G. Understanding FACTS : concepts and technology of flexible AC transmission systems / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.
- [4] Xiao-Ping Zhang Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control / Xiao-Ping Zhang ,Christian Rehtanz, Bikash Pal – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. – 383 p.
- [5] Егоров, И.С., Гольдштейн М.Е. Регулирование напряжения энергоблока синхронный генератор – объединенный регулятор потока мощности // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2014. – Том 14. – №3. – С. 19 – 24.
- [6] Гаврилов, А.И., Егоров И.С., Функциональные свойства электротехнического комплекса «синхронный генератор - объединенный регулятор потоков мощности» // Научные труды 4-ой международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», том 1, Новочеркасск, 2013, С. 313–316.
- [7] Гаврилов, А.И., Гольдштейн М.Е., О присоединении к электрическим сетям синхронных генераторов с варьруемой скоростью вращения // Научные труды 6-ой международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», том 1, Иваново, 2015, С. 628 – 631.
- [8] Ерохин П.М., Ерошенко, С.А.,Самойленко В.Щ. Процессы подключения собственной генерации., // Энергоназор, – 2014. – № 8(60), С. 20 – 21.
- [9] Асташев, М.Г. Применение двухтактного преобразователя в малогабаритном устройстве распределённой продольной компенсации для воздушных линий электропередачи / Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Рашитов ПА., Рожков А.Н. // Известия РАН. Энергетика. - 2016. - №4.
- [10] Асташев, М.Г. Анализ режимов работы автономного последовательного регулятора потоков мощности для воздушных линий электропередачи / Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Серегин Д.А., Чернышев А.А. // Известия РАН. Энергетика. - 2017. - №1.

# Оценка надежности систем электроснабжения при интеграции возобновляемых источников энергии

Д.С. Крупенев<sup>1</sup>, Н.А. Шамарова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГБОУВПО "Иркутский национальный исследовательский технический университет"  
Иркутск, Россия

<sup>1</sup>ФГБУН "Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук"  
Иркутск, Россия

**Аннотация** — Надежность характеризуется такими факторами как безотказностью, долговечностью, живучестью, ремонтпригодностью, сохраняемостью и др., которыми пользуются в зависимости от назначения и условий применения объекта. Не смотря на возрастающее количество энергоисточников на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), объемы ввода которых в ряде развитых стран опережают объемы ввода традиционной генерации, вопросы надежности поставки нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов остаются недостаточно изучены. В настоящее время существует пробел в применении законов теории вероятностей и случайных процессов. Также, для расчета показателей надежности СЭС применялась методы математического анализа. В качестве инструмента обработки материала данных использовались методы математической статистики. Для оценки надежности использовался FMEA метод.

**Ключевые слова** — электроэнергетическая система, возобновляемые источники энергии, ветроэлектростанции, солнечные электростанции, надежность электроснабжения, параметры надежности, нормальный закон распределения.

## Reliability assessment of power in integration of renewable energy sources

D.S. Krupenev<sup>1</sup>, N.A. Shamarova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Irkutsk Nation Technical University  
Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Irkutsk, Russian Federation

**Abstract** — Reliability is characterized by such factors as reliability, durability, tenacity, maintainability, keeping et al., Which are depending on the purpose and conditions of use of the object. Despite the increasing number of energy sources based on renewable energy sources (RES), the amount of input that in a number of developed camp ahead of the volume input of traditional generation, delivery reliability issues of alternative and renewable energy resources remain insufficiently studied. Currently there is a gap in the mathematical formalism evaluation reliability of power systems (SES) including RES, in connection with which it seems necessary to the development in this direction.

**Keywords** — power system, renewable energy, wind farm, solar power, electricity reliability, reliability parameters, normal distribution.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности электроснабжения потребителей было и остается важнейшей задачей. Актуальность повышения надежности электроснабжения возрастает в связи с усложнением структуры сетей, появления в них новых элементов (распределенная генерация, использование возобновляемых источников энергии)[1].

Особую актуальность приобретает проблема обеспечения бесперебойного электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии. Решение указанной проблемы имеет большое значение для бесперебойного и

качественного энергообеспечения территорий, удаленных от крупных электростанций, не охваченных электрическими сетями, испытывающих недостаток существующих мощностей.[2] В настоящее время из-за постоянного роста энергопотребления в мегаполисах и крупных промышленных регионах, происходит снижение резерва генерирующих мощностей, а в некоторых случаях растет их дефицит. Развитию систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), и в частности на основе ветро-солнечной энергетик, в регионах с большим ветровым и солнечным энергопотенциалом, уделяется особое внимание.[3]

Особенностью возобновляемых источников энергии является нестабильность выходной мощности, связанная с непостоянством характеристик энергоносителя (ветра, солнца). Последствия от данных рисков заключаются в высокой вероятности нарушения электроснабжения потребителей [4].

Существуют различные методы оценки надежности электроэнергетических систем, однако они не учитывают работу СЭС совместно с возобновляемыми источниками энергии.

Актуальной остается задача разработки и совершенствования методик оценки надежности систем электроснабжения, включающих возобновляемые источники энергии обеспечивающей бесперебойное питание ответственных потребителей электрической энергией требуемого качества [5].

Как известно, отличительной особенностью возобновляемой энергетики, а именно энергия ветра и солнца, является нестабильность выходной мощности и даже ее отсутствие, это связано с непостоянством ветровой активности и отсутствием солнца в ночные часы и в период облачности. В таком случае отсутствие выходной мощности электроагрегата принимается как отказ.

## II. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ СЭС

Целью работы является разработка метода оценки надежности системы электроснабжения, включающие возобновляемые энергетические установки. На данном этапе отсутствует четкого подхода к оценке надежности и ее эффективности системы, использующие ВИЭ.

Отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надежности систем электроснабжения показывает, что показатели надежности в общем случае образуют три группы [2, 3]:

1. Вероятность какого-либо события, например, отказа;
2. Интенсивность событий, например, число отказов в единицу времени;
3. Средняя продолжительность события (математическое ожидание), например, средняя продолжительности времени между отказами, средняя продолжительность времени восстановления после отказа.

Для анализа надежности из существующих методов можно выделить два основных подхода. Первый – использование аналитических методов. Второй – моделирование. Преимущества аналитических методов: короткое время вычислений, меньшая затрата сил для моделирования. Методы, использующие моделирование дают практически одинаковые результаты, но требует больше времени на расчет. Энергосистему можно моделировать с большой детализацией.

Для определения вероятности отказа необходимо обработать статистику ветряной активности по часам в годовой период. Далее найденная величина вероятности используется в расчете в качестве дополнительной аварийности ВЭУ. Для этого необходимо с помощью тестового примера определить показатели надежности для схемы электроснабжения. Расчет надежности проводится

одним из аналитических методов. Рассчитывается вероятность безотказной работы ветроэнергетических установок и солнечных электростанций и дизельной установки. Далее с помощью биномиального распределения определяется суммарная вероятность безотказной работы системы. Кроме этого необходимо произвести оценку экономической эффективности СЭС с возобновляемыми источниками энергии путем определения условного ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям.

И в завершении производится анализ критичности отказов каждого элемента система методом FMESA анализа, что подразумевает под собой выявление самого слабого звена системы с помощью параметра риска.

## III. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЭС С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

Для расчетного примера была взята существующая СЭС п. Батакан Забайкальского края, Читинской области. Внешнее электроснабжение поселка – автономное, работает основная электростанция на дизельном топливе через поселковую сеть 10кВ. Электростанция 2×200кВт установлена в центр поселка, рядом с администрацией, и работает на шины 10кВ ПС Батакан. Так же имеются 2 резервных дизель-генератора мощностью по 25кВт и котельные. При работе генераторов имеются бестоковые паузы и перерывы электроснабжения, длительность которых в течение года составляет до 1000 часов.

Для анализа надежности СЭС, имеющую в своей структуре ВИЭ, было смоделирована в программе Homer Pro 3.8.7 схема электроснабжения п. Батакан с ветро-солнечной установкой, показанной на рисунке 1.

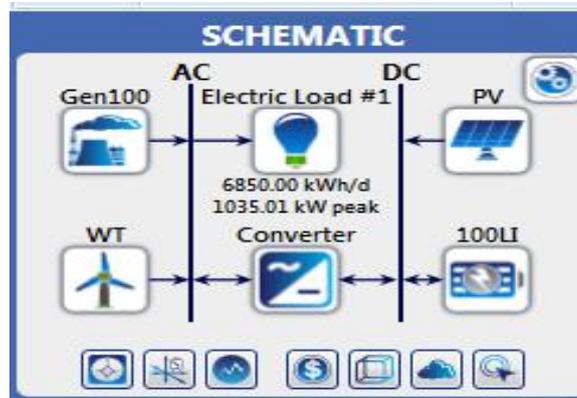


Рис. 1 Схема электроснабжения, модулируемая в программе Homer Pro 3.8.7

В результате расчетов автономной электростанции, работающей на ДЭС и ВИЭ, в программе Homer Pro 3.8.7 для п. Батакан, были получены следующие результаты:

Суммарная установленная мощность 1,8 МВт.

Средняя цена за 1 кВт\*ч э/э равна 0.134\$

Капитальные затраты на установку электростанции составили \$1,7 млн.

Цена капитальных затрат – \$1,8 млн.

График электрической нагрузки представлен на рисунке 2

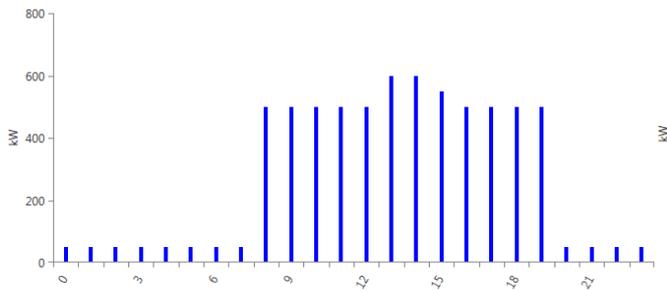


Рисунок 3.2.4 - График электрической нагрузки (Среднее потребление 285кВт\*ч/сут)

Использование ветрогенераторов обосновано при скорости ветра свыше 3-4 м/с. использование ВГ обосновано тем, что это дает дополнительный источник энергии, следовательно увеличение надежности питания.

Как видно из графика на рисунке 3 генерация солнечной энергии примерно равномерно распределена на протяжении всего года. Это связано с повышением КПД фотоэлементов зимой, в связи с низкой температурой, а также с повышенной облачностью во 2-й половине лета и осенью, в связи с сезоном дождей.

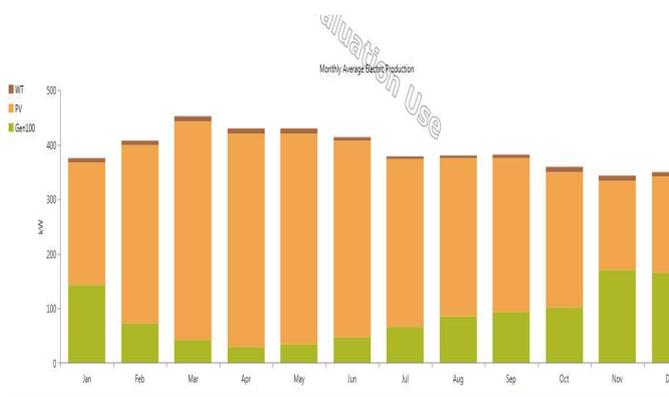


Рис. 3 Средний объем производства электрической энергии по месяцам

Как видно из диаграммы (рисунок 4) наибольший процент стоимости составляют фотоэлектрические модули. Важно заметить, что если капитальная стоимость 1 кВт установленной мощности на сегодняшний день составляет 1.25\$, то к 2020 году план DOE (Department of Energy USA) состоит в том, чтобы сократить эту стоимость на 20% до 1\$/кВт.

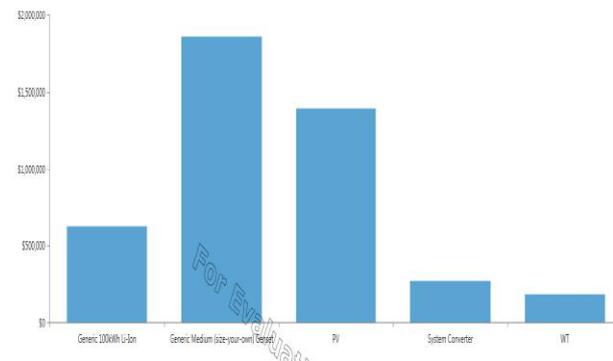


Рисунок 4 - Сравнение затрат на элементы системы

Установки на ветровых и солнечных источниках энергии работают неравномерно и отсутствие ветра и солнца принимается, как отказ. Выработка

электроэнергии на данной ВЭС как видно из графика (рисунок 5) осуществляется только от 4 м/с, ниже этого значения агрегат находится в отключенном состоянии.

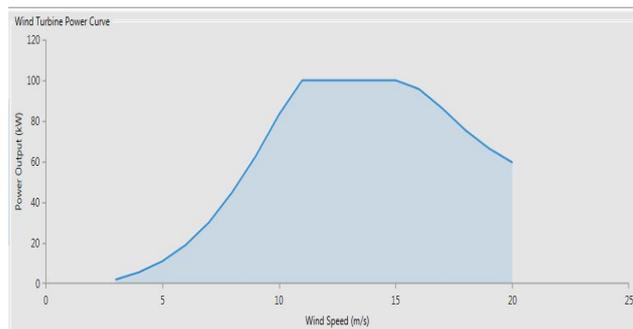


Рис. 5 Зависимость вырабатываемой мощности ветрогенератора от скорости ветра

Согласно статистическим данным ветровой активности была просчитана выходная мощность ВЭС по часам в течение года в программе Homer Pro. Суммарное количество часов простоя оборудования ветроэнергетических установок составляет 3474 ч.

Аналогично суммарное количество бестоковых пауз фотоэлектрических элементов - 4469 ч. Следовательно вероятность безотказной работы ветроэнергетических установок и фотоэлектрических элементов составит 0,6 и 0,8 соответственно.

Расчет надежности системы произведем биномиальным методом распределения:

$$(p+q)^n=1$$

По результатам решения функции определяется суммарная вероятность состояний схемы электроснабжения, при которых осуществляется бездефицитное питание потребителя, которое составит  $P_c=0,7$ .

Произведем оценку экономической эффективности системы путем определения условного ущерба от недоотпуска электроэнергии у потребителей:

Ущерб за год представим как:

$$Y_t = y_0 \cdot \Delta \mathcal{E}$$

где  $y_0$  - удельный ущерб руб./кВтч

$\Delta \mathcal{E}$  - недоотпущенная электроэнергия

$$Y_t = 1,93 \cdot (1-0,7) \cdot 1035 \cdot 8760 = 5\,249\,561 \text{ руб.}$$

#### IV. АНАЛИЗ КРИТИЧНОСТИ ОТКАЗОВ FMESA-МЕТОДОМ

FMEA представляет собой метод, позволяющий идентифицировать тяжесть последствий видов потенциальных отказов, и обеспечить меры по снижению риска. В некоторых случаях FMEA также включает в себя оценку вероятности возникновения видов отказов. Это расширяет анализ.

FMEA-анализ можно использовать на различных уровнях разделения системы и в разные моменты её жизненного цикла.

При проведении FMEA-анализа выявляются возможные виды отказов и их последствия от отдельных элементов к подсистемам и системы в целом.

Применение FMEA-анализа, а также регулирование и управление качеством поставок электроэнергетических ресурсов в логистической системе электроэнергетической системы (ЭЭС) позволят повысить надежность и качество поставок электроэнергии потребителям. Анализ вида отказов приводит также к анализу критичности. Определение критичности подразумевает использование качественной меры последствий видов отказа.

Критичность имеет множество определений и способов измерения, большинству из которых присущ близкий смысл: воздействие или значимость вида отказа, который необходимо устранить или смягчить его последствия.

Цель анализа критичности состоит в качественном определении относительной величины каждого последствия отказа. Значения этой величины используют для установления приоритетности действий по устранению отказов или снижению их последствий на основе комбинаций критичности отказов и тяжести их последствий.

Группы факторов, влияющих на компоненты электроэнергетических систем:

1. факторы окружающей среды, включающие интенсивность грозовой и ветровой деятельности, гололедные отложения, обложные дожди, мокрый снег, густой туман, изморозь, роса, солнечную радиацию и другие.
2. эксплуатационные факторы, включающие перегрузки элементов электроустановок, токи коротких замыканий (сверхтоки), различные виды перенапряжений (дуговые, коммутационные, резонансные и др.).
3. факторы, косвенно влияющие на надежность работы электроустановок, включающие ошибки проектирования и монтажа: несоблюдение руководящих материалов при проектировании, неучет требований надежности, неучет величины емкостных токов в сетях, некачественное изготовление элементов электроустановок, дефекты монтажа и др.
4. случайные факторы: наезд транспорта и сельскохозяйственных машин на опоры, перекрытие на движущийся транспорт под проводами ВЛ, обрыв провода и т.п.

Анализ производится с использованием приоритетного коэффициента риска

$$K = S * O * D,$$

S – коэффициент, учитывающий значение последствий отказов (тяжесть последствий проявления причин отказов) для потребителя. При анализе процесса потребителем считают того, кто принимает результат предыдущего этапа (и, в конце концов, конечного потребителя).

O – коэффициент, учитывающий вероятность P<sub>n</sub>, с которой отказ или его причина не могут быть обнаружены до возникновения последствий непосредственно у потребителя. Нужно отметить, что вероятность пропуска (необнаружения) причины численно равна среднему выходному уровню дефектности.

D – коэффициент, учитывающий вероятность P<sub>o</sub> отказа. При определении P<sub>o</sub> исходят из того, что отказ не обнаружится до тех пор, пока не подключится первый потребитель.

В результате наиболее «слабым» элементов системы являются ВЭС.

Анализ причин и последствий отказов позволяет выявить именно те дефекты, которые обуславливают наибольший риск потребителя, определить их потенциальные причины и выработать корректирующие действия по их устранению еще до того, как эти дефекты проявятся и, таким образом, предупредить затраты на их исправление.

## V. ВЫВОДЫ

В работе составлен алгоритм методики оценки надежности и экономической эффективности системы электроснабжения, имеющую в своем составе ВИЭ.

Представлена апробация данной методики на основе данных системы электроснабжения п. Батакан. Было выполнено моделирование и оптимизация энергосистемы с ВИЭ в программе Homer Pro 3.8.7. Произведена оценка надежности СЭС, в результате суммарная вероятность безотказной работы системы составила 0.7. Для сглаживания пиков нагрузки в энергосистемах и регулирования частоты напряжения применяются литий-ионные аккумуляторы. Годовой ущерб от недоотпуска энергии составил 5, 2 млн руб./год.

Был произведен анализ критичности отказов каждого элемента система методом FMECA анализа, что подразумевает под собой выявление самого слабого звена системы с помощью параметра риска. Наиболее слабым элементом системы являются ВЭС.

## Список литературы

- [1] Энергетическая стратегия России до 2030 г. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source>
- [2] Шушпанов И.Н., Суслов К.В., Воропай Н.И. Математическая модель и топологический метод расчета надежности распределительной электрической сети Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 6 (65). С. 137-141.
- [3] Солонина Н.Н., Степанов В.С., Суслов К.В. Информационные технологии в интеллектуальных электрических сетях: монография – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014.
- [4] Полуботко А. А. Надежность и качество поставок электроэнергии категории эффективности логистической системы // Вестник Томского государственного университета. 2009. №321. С.142-146
- [5] ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов

# Оценка перспектив применения гибридного сетевого накопителя электроэнергии на основе Ni-Cd аккумуляторов и топливных элементов

А.В. Проничев<sup>1</sup>, Е.О. Солдусова<sup>1</sup>, Е.М. Шишков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "СамГТУ"

Самара, Россия

<sup>2</sup>филиал ФГБОУ ВО "СамГТУ" в г. Новокуйбышевске

Новокуйбышевск, Россия

E-mail: teyoma@bk.ru, esoldusova@inbox.ru, e.m.shishkov@ieec.org

*Аннотация* - Суточный график потребления электроэнергии региональной энергосистемы, как правило, имеет ярко выраженные пики утреннего и вечернего максимумов, во время которых цена на электроэнергию на балансирующем рынке имеет наибольшее значение. Поскольку значительная часть генерирующего оборудования работает в базовой части графики генерации, возникает необходимость обеспечить потребление энергии на участках, когда её рыночная стоимость является отрицательной. В качестве технического решения для приведения в соответствие графиков потребления и графиков генерации электроэнергии в энергосистеме предлагается использовать мощные системы накопления электрической энергии – сетевые накопители электроэнергии. С целью анализа технических решений по накоплению электроэнергии в работе использованы методы математического анализа и технико-экономического сравнения применительно к различным конструкциям сетевых накопителей электроэнергии. В качестве инновационного решения в области сетевых накопителей электрической энергии в данной работе рассматривается возможность создания гибридного сетевого накопителя электроэнергии на основе аккумуляторных батарей и водородных топливных элементов. Для реализации данной конструкции необходимо использование никель-кадмиевых аккумуляторных батарей, работающих в режиме управляемого теплового разгона. В работе рассчитано увеличение мощности существующего аккумуляторного сетевого накопителя за счет комбинирования Ni-Cd аккумуляторов вместе с топливными элементами. Для сетевого накопителя мощностью 27 МВт увеличение составляет порядка 7,5%.

*Ключевые слова* — гибридный СНЭ; водородная энергетика; топливные элементы; Ni-Cd аккумулятор; тепловой разгон

## Evaluation of the perspectives of using a hybrid network storage device based on Ni-Cd batteries and fuel cells

A.V. Pronitchev<sup>1</sup>, E.O. Soldusova<sup>1</sup>, E.M. Shishkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University

Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Novokuybyshevsk Branch of Samara State Technical University

Novokuybyshevsk, Russian Federation

E-mail: teyoma@bk.ru, esoldusova@inbox.ru, e.m.shishkov@ieec.org

*Abstract* - The daily schedule of electricity consumption of the regional energy system, as a rule, has brightly expressed peaks of the morning and evening highs, during which the price of electricity in the balancing market is of the greatest importance. Since a significant part of the generating equipment operates in the base part of the generation schedules, it is needed to consume energy when its price is negative at the wholesale market. As a technical solution for harmonizing consumption schedules and energy generation schedules in the power system, it is proposed to use powerful electric energy storage systems - network power storage units. For the purpose of analyzing technical solutions for the accumulation of electricity, mathematical analysis and a technical and economic comparison are used in the work in connection with various designs of network power storage devices. As an innovative solution in the field of networked storage of electric energy in this paper, the possibility of creating a hybrid network storage of electric power on the basis of storage batteries and hydrogen fuel cells is considered. To implement this design, it is necessary to use nickel-cadmium batteries operating in the controlled thermal runaway mode. The work calculates an increase in the capacity of the existing accumulator network drive by combining Ni-Cd batteries together with fuel cells. For a network drive with a capacity of 27 MW, the increase is about 7.5%.

*Key-words* — hybrid ESS; hydrogen energy; fuel cells; Ni-Cd batteries; thermal runaway

## I. ВВЕДЕНИЕ

Потребление электроэнергии в течение суток происходит неравномерно, в связи с чем возникает необходимость постоянно регулировать ее выдачу в сеть. При этом значительная часть генерирующего оборудования, работающего в базовой части графика нагрузки энергосистемы – КЭС и АЭС – является маломаневренным, что приводит к необходимости для генерирующих компаний продавать на мощность по нулевой, а зачастую, и отрицательной цене в часы, когда естественное электропотребление находится на низком уровне.

Цена электроэнергии на оптовом рынке становится отрицательной и в энергосистемах со значительным процентом «зелёной» генерации. На энергетических рынках Германии и США с 2010-го по 2014-й гг. подобное было зафиксировано несколько раз, в 2015-м — уже десятки [1].

Описанная выше ситуация позволяет участникам оптового рынка электроэнергии извлекать прибыль из разницы в цене электроэнергии на разных интервалах суточных графиков нагрузки. Основным техническим препятствием для этого является отсутствие эффективных способов накопления и хранения электроэнергии.

Известен ряд хорошо отработанных технических решений указанной проблемы. В частности, в России и в мире ежегодно увеличивается величина вводимых мощностей гидроаккумулирующих электростанций. Однако, такой способ аккумулирования электроэнергии требует значительных капитальных затрат и применим, главным образом в мощных централизованных энергосистемах.

В локальных энергосистемах находят своё применение системы накопления электрической энергии (СНЭ) с накопителями конденсаторного, маховичного, пневматического, а также аккумуляторного типов [2].

Традиционно применяемые в СНЭ Ni-Cd аккумуляторно-конденсаторные батареи (АКБ) характеризуются известным по эксплуатации в составе бортовых систем электроснабжения явлением теплового разгона – лавинным нарастанием температуры электролита при зарядке. Этот процесс сопровождается выделением атомарного водорода

В серии статей за 2012-2016 г. ученые Шахтинского филиала Донского государственного технического университета описывают процессы при управляемом тепловом разгоне Ni-Cd АКБ - технологии, позволяющей без повреждения АКБ большое количество водорода, примерно  $10 \text{ л}(\text{А}\cdot\text{ч})^{-1}$  [3-5]. При этом предлагается использовать АКБ в качестве эффективного средства хранения атомарного водорода в связанном состоянии.

В данной работе предлагается являться разработкой концепции гибридного сетевого накопителя электрической энергии.

В качестве СНЭ в энергосистемах в настоящее время широко используются АКБ. Современные Ni-Cd АКБ могут служить до 25 лет. Данный тип аккумуляторов

обладает повышенными удельными характеристиками, устойчивостью к низким температурам [2].

В качестве инновационного решения в области сетевых накопителей электрической энергии в данной работе предлагается концепция создания гибридного СНЭ на основе аккумуляторных батарей и водородных топливных элементов.

Предлагаемый гибридный СНЭ решает вопрос хранения энергии более эффективно в сравнении с известными конструкциями за счёт высокой маневренности и энергоэффективного преобразования энергии химической связи электролита АКБ в электрическую и обратно.

## II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СНЭ

В период избыточного предложения электроэнергии на оптовом рынке, характеризующийся низкими, вплоть до отрицательных, равновесными ценами, собственник СНЭ осуществляет закупку энергии, которая потребляется в процессе восстановления электролита. Запасаемая при этом энергия продаётся собственником СНЭ в период более высоких равновесных цен. Включение в цикл преобразования энергии водородных топливных элементов позволяет в некоторой степени увеличить установленную мощность СНЭ.

Фактически АКБ играют роль устройства для хранения водорода. В момент дефицита электрической энергии в энергосистеме, помимо разрядки аккумуляторных батарей будет так же происходить подача водорода на топливный элемент, который в свою очередь будет отдавать вырабатываемую электроэнергию в сеть. При каждом при каждом цикле заряда-разряда АКБ процесс будет повторяться (Рис. 1).

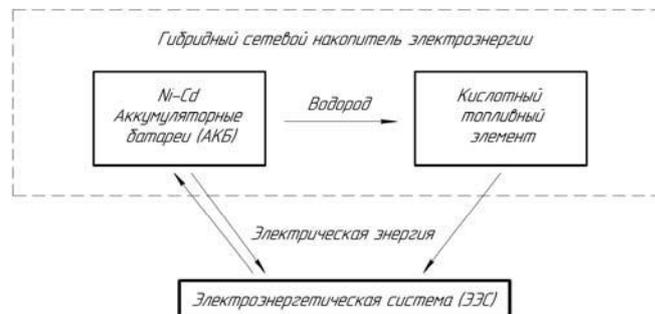


Рис. 1. Структурная схема гибридного СНЭ

## III. ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО СНЭ

С целью определения потенциала использования гибридного СНЭ рассмотрим возможность модификации действующего СНЭ комплексом водородных топливных элементов.

В качестве примера рассмотрим СНЭ на никель-кадмиевых АКБ (BESS – Battery energy storage system) компании GVEA (Аляска, США). В нормальных условиях BESS может выдавать мощность  $P=27 \text{ МВт}$  в течение  $t_1=15$  минут. Напряжение DC  $U=240 \text{ В}$ .

Рассчитаем емкость BESS в А·ч ( $t_2=1$  час,  $I=1$  А):

$$E'_1 = P \cdot t_1 = 27 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 60 = 24,3 \text{ ГДж} \quad (1)$$

$$E_1 = U \cdot I \cdot t_2 = \frac{24,3 \cdot 10^9}{240 \cdot 1,3600} = 28125 \text{ А} \cdot \text{ч} \quad (2)$$

Рассчитаем объем водорода, который выделится при тепловом разгоне:

На 1 А·ч емкости в среднем выделяется 10 л водорода.

$$V = 28125 \cdot 10 = 281250 \text{ л} = 281,25 \text{ м}^3(3)$$

С учетом КПД  $\eta=50\%$  рассчитаем количество электроэнергии, которую ТЭ отдаст в сеть:

Высшая объёмная теплотворная способность водорода составляет:  $Q=13\,000$  кДж/м<sup>3</sup>

$$E_2 = Q \cdot \eta \cdot V = 13 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 281,25 = 1828 \text{ МДж} \quad (4)$$

$$= 508 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Рассчитаем увеличение мощности СНЭ при комбинировании АКБ и ТЭ:

$$\Delta P = \frac{E_2}{t_1} = \frac{1828 \cdot 10^6}{15 \cdot 60} = 2,03 \text{ МВт} \quad (5)$$

Таким образом, при использовании комбинации Ni-Cd аккумуляторных батарей и кислотных топливных элементов мощность рассмотренного сетевого накопителя электроэнергии увеличивается на 2 МВт (примерно на 7,5% от первоначальной мощности).

Очевидно, что экономические показатели рассчитанной модификации будут определяться следующими факторами:

- стоимость единицы установленной мощности водородных топливных элементов;
- неравномерность графика нагрузки энергосистемы, в которой установлен гибридный СНЭ;
- разность равновесных цен на этапах покупки и продажи электроэнергии на этапах суточного цикла графика нагрузки энергосистемы.

Вторым направлением применения предложенной концепции является оснащение стационарных водородных энергетических установок Ni-Cd аккумуляторными батареями, что позволит решить проблему эффективного хранения водорода.

С учётом действующих государственных программ по развитию водородной энергетики возможность технического воплощения предложенной в работе концепции окупаемого за период эксплуатации гибридного СНЭ станет доступной в течение ближайшего десятилетия[6-7].

#### IV. Выводы

В работе предложена схема работы гибридного сетевого накопителя электрической энергии на основе Ni-Cd аккумуляторов и водородных топливных элементов. Представленная схема носит исключительно

концептуальный характер и при техническом воплощении должна быть пересмотрена с учётом технологических особенностей энергообъектов, на которых планируется ввод в эксплуатацию СНЭ.

В работе произведена оценка увеличения мощности существующего аккумуляторного СНЭ за счёт комбинирования Ni-Cd аккумуляторов вместе с топливными элементами. Для СНЭ мощностью 27 МВт увеличение составляет порядка 7,5%.

На текущий момент подобное увеличение мощности СНЭ за счёт установки топливных элементов не является экономически оправданным, однако в условиях постоянно снижающейся стоимости установленной мощности топливного элемента [8] может стать окупаемым в течение ближайшего десятилетия.

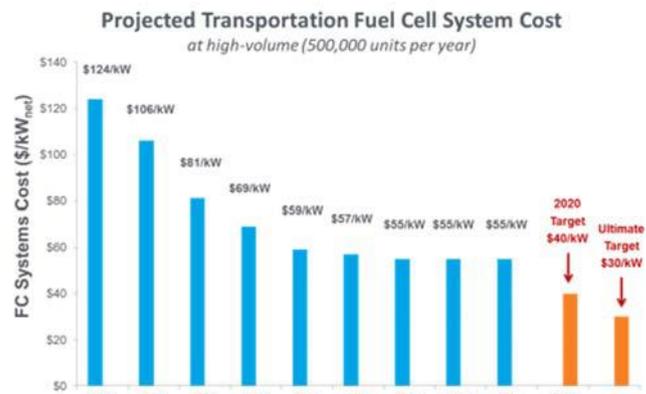


Рис. 2. Динамика стоимости установленной мощности топливного элемента[8].

#### Список литературы

- [1] Е. Золотов «Чистая энергия: парадокс отрицательных цен», Компьютерра, 2016, Режим доступа: <http://www.computerra.ru/144848/negative-sun/>.
- [2] Н.И. Смоленцев «Накопители энергии в локальных электрических сетях», журнал «Ползуновский вестник» 2013 №4-2176-181 с.
- [3] Галушкин Д.Н., Галушкин Н.Е., Язвинская Н.Н. «Тепловой разгон в никель кадмиевых аккумуляторах», Журнал «Фундаментальные исследования» №11, 2012 г. 116-119 с.
- [4] Патент RU (11) 2 573 439(13) Галушкин Н.Е. (RU), Язвинская Н.Н. (RU), Галушкин Д.Н. (RU) «Способ аккумуляирования водорода в ламельных электродах»
- [5] Н. Галушкина, Н. Галушкин. «Исследование процесса теплового разгона в никель-кадмиевых аккумуляторах», журнал «Электрохимическая энергетика», 2005 Т.5 № 1 С 40-42.
- [6] Roadmap on Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy, 2005, режимдоступа: <https://www.hydrogen.energy.gov/manufacturing.html>
- [7] Ю.В. Сняк «Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро- и теплоснабжения», журнал «Проблемы прогнозирования» 2007 №3 42-61 с.
- [8] S. Grinwis «Fuel Cell Economics vs Batteries», Режимдоступа: <https://cleantechnica.com/2014/12/01/fuel-cell-economics-vs-batteries/>.

# Определение резерва активной мощности в энергосистеме с высокой долей СЭС

П.А. Максимов<sup>2</sup>, М.Д. Сенюк<sup>1,2</sup>, И.В. Чунарев<sup>2</sup>, С.А. Шевчук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

<sup>2</sup>Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Урала  
Екатеринбург, Российская Федерация

E-mail: [mdsenuk@gmail.com](mailto:mdsenuk@gmail.com)

**Аннотация** — На конец мая 2017 года суммарная установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) объединенной энергосистемы Урала (ОЭС Урала) составила 110 МВт (примерно 0,2% от установленной мощности генерации ОЭС Урала). При столь низкой доле генерации СЭС они не способны оказывать существенного влияния на режим работы ОЭС Урала в целом, однако их влияние на режимы энергорайонов (энергоузлов), в которых они установлены, довольно заметно. К 2019 году планируется увеличение установленной мощности СЭС в ОЭС Урала до 265 МВт, что приведёт к влиянию не только на режимы работы отдельных энергоузлов, но и на баланс энергосистемы в целом. Главной особенностью СЭС является стохастичность их режимов работы, из чего вытекает основная проблема планирования режимов энергосистемы при высокой доле генерации СЭС: определение плановой мощности генерации энергорайона и задание соответствующих ограничений генерации, обеспечивающих надежность работы энергорайона.

В данной статье использован статистический анализ архивных данных о фактической и плановой мощности СЭС в энергосистеме Урала. На основе изучения статистических данных генерации СЭС были выявлены ее характерные особенности, позволяющие судить о величине и характере отклонений фактической генерации СЭС от плановой в зависимости от сезона и периода суток.

Исходя из исследования, представленного в данной статье, была предложена дополненная методика к определению ожидаемых отклонений мощности генерации энергорайона с высокой долей генерации СЭС. Применение данного подхода может позволить модифицировать существующий метод задания ограничений, используемый Системным оператором на этапе выбора состава включенного генерирующего оборудования для обеспечения надежности режима энергорайона, с учетом нерегулярных колебаний генерации СЭС.

**Ключевые слова** — солнечные электростанции, резерв активной мощности, описательная статистика, выбор состава включенного генерирующего оборудования, нерегулярная генерация

## Determining the Active Power Reserve in the Power System with High Penetration of Solar Power Stations

Igor V. Chunarev<sup>2</sup>, Pavel A. Maksimov<sup>2</sup>, Mihail D. Senyuk<sup>1,2</sup>, Sergey A. Shevchuk<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin»

<sup>2</sup>System Operator of United Power System, JSC «Branch Interregional Dispatching Office, Energy System of Ural»  
Ekaterinburg, Russian Federation  
E-mail: [mdsenuk@gmail.com](mailto:mdsenuk@gmail.com)

**Abstract** — to the late of May of 2017 the installed capacity of solar power stations of the Ural power system was 110 MW, which approximately equals to 0.2% of total power system installed capacity. Given such a low solar power stations penetration, they are unable to influence the operating mode of the Ural power system as a whole, but their impact on the system areas where they are installed is quite noticeable. It is planned to increase the installed capacity of solar power stations in the Ural power system to 265 MW by 2019, which will lead to their influence not only on operating modes of individual power nodes, but also on the whole power system balance. The most significant feature of solar power stations is stochasticity of their operation, which causes the main problem of planning modes of the power system with a high penetration of solar power stations: determination of planning generation capacity of power system and reliability restrictions imposition.

In this paper statistical analysis of the actual and planned solar power stations capacity archive data for the Ural power system is presented. Based on researched archive generation data features were identified, allowing determination of magnitude and nature of solar power plants actual deviation from plan depending on season and period of day.

Based on the research presented in this paper, an augmented approach was developed to determine expected generation capacity deviations in power system with high penetration of solar power stations. The approach allows modification of existing method for determination of restrictions, which are being imposed by System Operator during unit commitment for ensuring system reliability with solar power plants irregular fluctuations taken into account.

**Key-words** — solar power stations, active power reserve, descriptive statistics, unit commitment, variable generation

## I. ВВЕДЕНИЕ

На конец мая 2017 года установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) энергосистемы Урала составила 110 МВт, что примерно равно 0,2% от установленной мощности генерации всей энергосистемы. СЭС представлены в следующих энергосистемах (ЭС) Урала (в скобках приведена установленная мощность):

Башкирская ЭС:

- Бурибаевская СЭС (20 МВт);
- Бугульчанская СЭС (15 МВт);

Оренбургская ЭС:

- Грачевская СЭС (10 МВт);
- Переволоцкая СЭС (5 МВт);
- Плешановская СЭС (10 МВт);
- Сакмарская СЭС (25 МВт);
- Соль-Илецкая СЭС (25 МВт).

СЭС с наибольшими установленными мощностями являются Сакмарская и Соль-Илецкая (по 25 МВт).

При столь низкой доле генерации существующих СЭС они не оказывают существенного влияния на режим работы энергосистемы Урала в целом, однако их влияние на режимы энергорайонов, в которых они установлены, может быть оценено.

Основной особенностью СЭС является стохастичность выдаваемой ими мощности, вызванная невозможностью точного прогнозирования освещенности. Данная особенность может отрицательно сказываться как на точности планирования, так и при ведении режима. На рис. 1 показана гистограмма отклонений фактической мощности Сакмарской СЭС от запланированной в диспетчерском графике на сутки вперед за 2016 год.

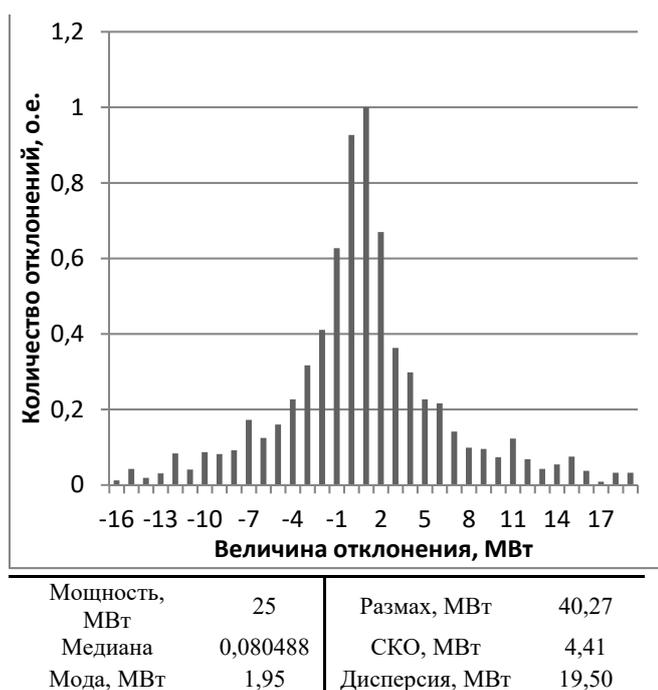


Рис. 1. Гистограмма отклонения фактической мощности от запланированной для Сакмарской СЭС

Из гистограммы можно заметить следующие закономерности:

- характер распределения погрешности прогноза несколько отличается от нормального (распределение смещено в область положительных значений);
- дисперсия отклонения прогнозной мощности от фактической соизмерима с установленной мощностью СЭС.

Из представленного графика можно видеть, что на сегодняшний день прослеживается закономерность превышения фактически выдаваемой мощности относительно прогнозной (плановой).

К 2019 году планируется увеличение мощности СЭС в энергосистеме Урала до 265 МВт. Столь высокая доля стохастичной генерации может потребовать дополнения применяемой методологии формирования резервов ЭС.

Целью данной статьи является разработка дополненного подхода к определению ожидаемых отклонений мощности генерации энергорайонов с высокой долей СЭС и использование этой величины при планировании состава генерирующего оборудования.

## II. АНАЛИЗ РАБОТЫ САКМАРСКОЙ СЭС

Для данной работы в качестве исследуемой станции использовалась Сакмарская СЭС, расположенная в Оренбургской ЭС. Выбор обусловлен значительной накопленной статистикой (ввод в эксплуатацию – конец 2015 г.) и выраженным влиянием этой станции на режим работы Орского энергоузла вследствие большой установленной мощности СЭС.

### A. Характеристика Сакмарской СЭС

Сакмарская СЭС расположена в Орском энергоузле. Выдача мощности СЭС реализована по двум ВЛ 110 кВ. Максимум выдаваемой мощности в 2016 году составил 21,27 МВт, наибольший непрерывный интервал времени генерации 16 часов, число часов использования максимальной мощности 1 099. Стоит заметить, что в ночные часы Сакмарская СЭС потребляет мощность (наибольшее значение за 2016 год составило 0,11 МВт), данный факт объясняется потерями активной мощности в трансформаторах и инверторах, работающих без ночного отключения.

### B. Влияние Сакмарской СЭС на режим электрической сети Орского энергоузла

На рис. 2 показана упрощенная схема Орского энергоузла.

Орский энергоузел имеет связь с Оренбургской ЭС через несколько ВЛ 110 кВ и одну связь 220 кВ, вместе образующих контролируемое сечение (КС). В энергоузле расположены две электростанции: Сакмарская СЭС (уст. мощность 25 МВт) и Орская ТЭЦ-1 (уст. мощность 195 МВт); график генерации станции, как правило, определяется режимом теплофикации; летом мощность станции составляет около 65 МВт). Энергоузел является дефицитным. Степень дефицитности характеризуется значением перетока мощности по КС. За положительное направление перетока мощности в КС принято направление из Оренбургской ЭС в Орский энергоузел.

Основными потребителями электроэнергии Орского энергоузла являются бытовая нагрузка г. Орск и расположенные в узле промышленные предприятия.

Из-за стохастичности выдаваемой мощности и соизмеримости величины установленной мощности СЭС и перетоком по КС, генерация Сакмарской СЭС влияет на величину дефицита Орского энергоузла.

Рис. 2. Схема Орского энергоузла

На рис. 3 показана зависимость перетока в КС от выдачи мощности Сакмарской СЭС и Орской ТЭЦ-1 в разрезе трёх суток.

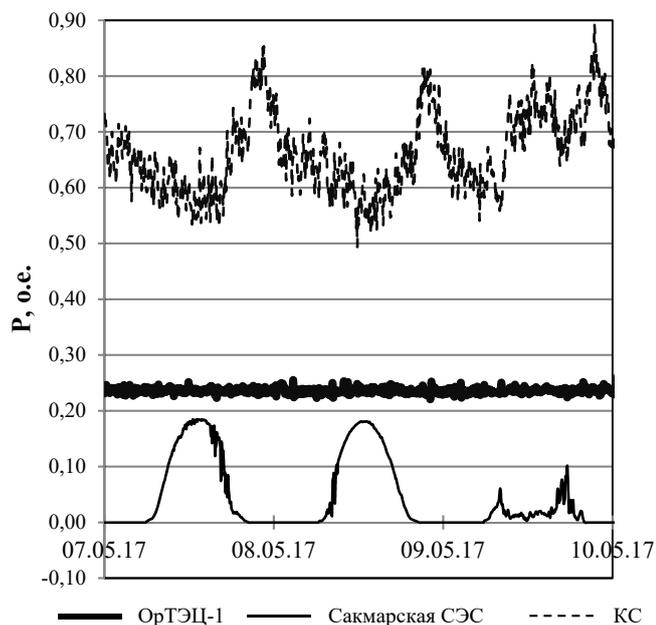


Рис. 3. Зависимость перетока в КС от выдачи мощности Сакмарской СЭС и Орской ТЭЦ-1

Из рис. 4 видна корреляция величины перетока в КС и мощности генерации Сакмарской СЭС, коэффициент корреляции составляет  $-0,4$ . Видно, что 09.05.2017 из-за высокой облачности мощность Сакмарской СЭС не превышала  $0,1$  о.е., что сказалось на характере перетока.

### С. Погрешность прогноза мощности

Для анализа влияния Сакмарской СЭС на электроэнергетический режим Орского энергоузла было проведено более детальное исследование погрешности прогноза выдаваемой мощности, для чего часовые значения прогнозной мощности СЭС были интерполированы на пятиминутных интервалах. На рис. 5 показана гистограмма отклонения фактической мощности от запланированной для Сакмарской СЭС на пятиминутных интервалах (ночные часы, в которые плановая мощность СЭС равнялась нулю, в выборке не учитывались).

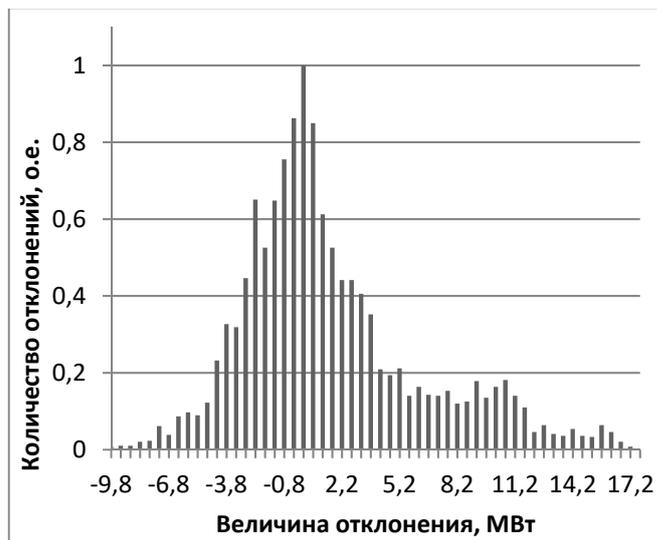


Рис. 4. Гистограмма отклонения фактической мощности от запланированной для Сакмарской СЭС на пятиминутных интервалах

В табл. I показан анализ отклонений фактической мощности от плановой.

Таблица I. АНАЛИЗ ОТКЛОНЕНИЙ ФАКТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ОТ ПЛАНОВОЙ

Параметр	Значение
Количество отклонений до часа максимума выдачи мощности:	2142
Наибольшее отклонение, МВт	16,28
Наименьшее отклонение, МВт	-13,33
Количество отклонений после часа максимума выдачи мощности:	1909
Наибольшее отклонение, МВт	0,25
Наименьшее отклонение, МВт	-3,86

Из рис. 4 и табл. I можно сделать следующие выводы:

- наибольшие отклонения характерны для интервала времени до прохождения максимума выдаваемой мощности СЭС;
- наибольшее количество отклонений также характерно для интервала времени до прохождения максимума выдаваемой мощности СЭС.

Таким образом, из части II данной статьи видно, что: Сакмарская СЭС явно влияет на режим Орского энергоузла; наибольшие отклонения фактической мощности от прогнозной характерны для интервала времени до прохождения пика выдаваемой мощности СЭС.

### III. ДОПОЛНЕННАЯ МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕЗЕРВОВ

При краткосрочном планировании режима энергосистемы первым этапом является выбор состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО). В качестве одного из ограничений оптимизационной задачи ВСВГО выступает ограничение на минимальную величину резерва перетока для какого-либо КС. Данный вид ограничений определяет состав генерирующего оборудования, величина максимальной генерации которого определяет величину перетока в КС таким образом, что расчетный переток в КС будет ниже МДП в КС на величину не менее заданного резерва. В данном разделе будет предложен дополненный метод определения ожидаемых отклонений мощности генерации

энергорайонов с высокой долей генерации СЭС при планировании состава генерирующего оборудования.

#### А. Существующая методика определения резервов ВСВГО

Резерв мощности  $P_{рез}$  определяется как максимальная из двух величин: снижение максимально допустимого перетока МДП [1] в послеаварийной схеме относительно планируемой исходной схемы или небаланса мощности, приводящего к увеличению перетока в КС (отключение наиболее крупного генератора) [2]:

$$P_{рез} = \max[(МДП_{исх.сх} - МДП_{насх} \pm \Delta P_{сеч}) / K_{эф}; P_{ген\max}], \quad (1)$$

где

$МДП_{исх.сх}$  — величина МДП в исходной схеме

$МДП_{насх}$  — величина МДП в наиболее «тяжелой» послеаварийной схеме;

$P_{ген\max}$  — величина генерации активной мощности самого крупного включенного турбогенератора,

$\Delta P_{сеч}$  — величина снижения (увеличения) перетока по КС в послеаварийной схеме относительно исходной схемы;

$K_{эф}$  — средневзвешенный коэффициент эффективности, учитывающий влияние загрузки электростанций энергорайона на переток по КС.

При увеличении доли СЭС в рассматриваемом энергорайоне резервы в КС, определенные по существующей методике, могут оказаться недостаточными, так как их величина не будет учитывать возможных стохастических отклонений генерации СЭС. В работе [3] авторами предлагается усовершенствованный алгебраический подход определения резервов с учётом высокой доли СЭС. Для нахождения резервов предлагается использовать векторную сумму величины резервов, определённых по используемой методике, и величины отклонения фактической мощности СЭС от прогнозной.

#### В. Дополненная методика определения резервов ВСВГО при высокой доле СЭС

На рис. 5 показан принцип дополнения существующей методики определения резервов.

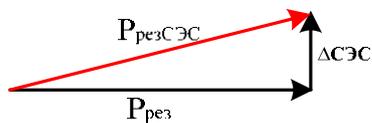


Рис. 5. Принцип дополнения

Полагая величины  $P_{рез}$  и  $\Delta CЭС$  независимыми, используем правило суммирования двух независимых случайных величин [3]. Суммарный вектор  $P_{резСЭС}$  определяется векторной суммой  $\Delta CЭС$  и  $P_{рез}$ , а его модуль равен:

$$P_{резСЭС} = \sqrt{P_{рез}^2 + \Delta CЭС^2} \quad (2)$$

#### С. Определение ΔСЭС

В качестве методики определения величины  $\Delta CЭС$  предлагается подход, основанный на статистическом анализе отклонения фактической мощности СЭС от плановой.

Стоит отметить, что величина  $\Delta CЭС$  зависит от многих параметров, среди которых определяющими являются сезон года и период суток. Величину  $\Delta CЭС$  следует учитывать по меньшей мере отдельно для зимнего и летнего сезонов, а также для периодов суток до и после часа прохождения максимальной мощности СЭС (последнее может быть объяснено тем, что после полудня персонал СЭС получает возможность точнее прогнозировать освещенность остатка светового дня и формировать соответствующие планы генерации).

#### Д. Пример определения ΔСЭС для Сакмарской СЭС

Как уже упоминалось ранее, величина  $\Delta CЭС$  определяется путём обработки статистических данных по фактической и плановой мощности СЭС [3],[4].

Для Сакмарской СЭС были определены величины  $\Delta CЭС$  с учётом данных за 2016 год. Процедура определения величины  $\Delta CЭС$  следующая:

- разбивка данных на сезоны (лето: 1 апреля – 30 сентября, зима: 1 октября – 31 марта);
- определение часа максимума выдаваемой мощности СЭС (полудня) и отдельный учет отклонений для соответствующих периодов суток;
- величина  $\Delta CЭС$  определяется как среднее арифметическое выборки соответствующих сезонов и периодов суток.

В табл. II показаны результаты определения  $\Delta CЭС$ .

Таблица II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ΔСЭС

Сезон	Период суток	Величина ΔСЭС, МВт
Зима	до полудня	4,7
	после полудня	3,4
Лето	до полудня	8,7
	после полудня	6,4

#### IV. Выводы

В данной статье предложен дополненный подход к определению величины резервов перетоков в контролируемых сечениях, основанный на оценке ожидаемых отклонений мощности генерации энергорайонов с высокой долей генерации СЭС при планировании состава генерирующего оборудования.

Показано влияние СЭС на режим электрической сети Орского энергоузла, исследована погрешность прогноза выходной мощности и дан численный пример ее определения.

#### Список литературы

- [1] СТО 153-34.20.576-2003 Методические указания по устойчивости энергосистем. – Введ. 2003-06-30. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2003. – 14 с.
- [2] СТО 59012820.27.010.002-2015 Резервы активной мощности Единой энергетической системы России. Определение объемов резервов активной мощности при краткосрочном планировании. – Введ. 2015-12-03. – М.: ОАО «СО ЕЭС», 2015. – 14 с.
- [3] Proposal of a Modified Algebraic Approach to Evaluate Required Capacity for Load Frequency Control (LFC) under a Large Penetration of Solar Photovoltaic Generations / M. Kuramoto, M. Nagata, T. Inoue // C4\_208\_2012 CIGRE Session Papers & Proceedings. – Paris, 2012.
- [4] Effects of Inertial Response and Ramp Reserve Requirements in the Unit Commitment / F. Carrasco, C. Rahmann // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2016. – ISBN 978-1-5090-4168-8.

# Порядок взаимодействия предприятия с подрядными организациями в области экологии, промышленной безопасности и охраны труда

Е.Б. Исаева

Производственное отделение «Информационные технологии и связь» ООО «Башкирэнерго»,

Уфа, республика Башкортостан, Россия

E-mail: [hellenisaeva@gmail.com](mailto:hellenisaeva@gmail.com)

*Аннотация* — переход на контрактную систему закупок товаров, работ, услуг требует внимания к планированию закупки, выбору поставщика, подрядчика, исполнителя, документальному оформлению конкурсных проектов, особенно на объектах повышенной опасности. Требования Порядка могут стать барьером для недобросовестных исполнителей, позволят повысить эффективность закупок товаров, работ, услуг, усилят ответственность подрядных организаций за соблюдение безопасности условий труда, оборудования и рабочих мест. Порядок взаимодействия подразделений Предприятия с организациями, выполняющими работы на объектах Общества, усиливает ответственность руководителей и специалистов за повышение технической и экологической безопасности, рабочих мест и работ, принятие ответственных решений, стимулирует повышение компетентности персонала.

*Ключевые слова* — закупки, порядок взаимодействия, охрана окружающей среды охрана труда, безопасные условия труда, подрядная организация.

## Order of company interaction with organizations contractor in the field of ecology, industrial safety and labor protection

Elena Isaeva

Production division "Information technology and communication" of LLC "Bashkirenergo", Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia

E-mail: [hellenisaeva@gmail.com](mailto:hellenisaeva@gmail.com)

*Abstract* — transition to the contract procurement system of goods, works and services requires attention to procurement planning, supplier choice, contractor, executants, documentation of competitive projects, especially those at high risk. Order requirements may be a barrier for unscrupulous executants. The efficiency of procurement of goods, work and services can be improved. Order requirements will strengthen the responsibility of contractors for compliance of safety equipment, workplaces and labour. The order of interaction of divisions of the company with the organizations performing works on the objects of the Society, increases the responsibility of managers and specialists for increasing technical and environmental safety, jobs and work, and responsible decision-making, stimulates the increase of personnel competence.

*Keywords* — procurement, order of interaction, environmental protection, occupational safety and health, safe working conditions, contractors.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Переход на систему закупок товаров, работ и услуг вносит существенные перемены во взаимоотношения заказчиков и поставщиков товаров, работ и услуг. Возникает необходимость заказчика планировать закупки, правильно выбирать поставщика, подрядчика, исполнителя. При этом особое внимание требует документальное оформление проектов: описание объекта закупки, составление технического задания на закупку товаров, работ и услуг. Именно на этой стадии можно

"отсечь" недобросовестного поставщика, выставив в качестве барьера необходимые заказчику требования. Требования вносят в договоры с подрядными организациями, выполняющими работы/услуги на территории Предприятия. Одним из таким барьером является «Порядок взаимодействия с подрядными организациями в области охраны труда, промышленной безопасности и экологии».

Данный Порядок устанавливает единый порядок организации совместной работы Заказчика и Подрядной организации в области экологии, промышленной безопасности и охраны труда

## II. ТРЕБОВАНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА, ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ОХРАНЫ ЗДОРОВЬЯ И БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА В ТОМ ЧИСЛЕ ПРИ ВЫБОРЕ ПОДРЯДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

В области качества, охраны окружающей среды, энергосбережения, охраны здоровья и безопасности труда Предприятиям необходимо руководствоваться требованиями российского законодательства, нормами международного права, основами политик. На Предприятии должны быть разработаны, внедрены и поддерживаться в рабочем состоянии: Система менеджмента качества (СМК), соответствующая требованиям международного стандарта ISO 9001, Система экологического менеджмента (СЭМ), соответствующая требованиям международного стандарта ISO 14001.

## III. ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ПОДРЯДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

При выборе подрядных организаций Предприятие учитывает наличие у генподрядчика (подрядчика) лицензии (разрешения), выданной регулирующим органом, свидетельства о допуске к работам, выданного саморегулируемой организацией, сертификатов соответствия системы менеджмента качества требованиям ISO 9001 или аналогичного стандарта.

Здесь одним из дополнительных критериев отбора может стать:

1. Наличие сертификатов соответствия представленных на слайде (СМК требованиям ISO 9001 СЭМ (ISO 14001), СЭМ (ISO 50001), СОЗиБТ (ISO 18001)).

2. Информация о несчастных случаях на производстве и профессиональных заболеваниях за последние 3 года

Персонал организаций, оказывающих услуги на Предприятии по вывозу отходов с территории и/или объектов, должен иметь профессиональную подготовку на право работы с отходами I—IV класса опасности и пройти инструктаж в соответствии с требованиями действующего Порядка.

При заключении договора, куратор договора обеспечивает в обязательном порядке включение в договор следующих условий и приложений с учетом предмета договора и специфики предусмотренных им работ/услуг:

1) Соблюдение требований законодательства Российской Федерации и договора в области ОТ, ПБ и Э.

2) Транспорт Подрядчика

3) Политика Заказчика в отношении употребления алкоголя, наркотиков и иных токсических веществ

4) Действия персонала подрядных организаций при возникновении аварийных ситуаций.

5) Обеспечение требований по охране окружающей среды

6) Обеспечение требований пожарной безопасности

## IV. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ ИНФОРМАЦИИ И ОТЧЕТНОСТИ

Рекомендуется проводить установочные совещания в течении 10 рабочих дней с даты заключения договора с Подрядчиком. Определяется минимальный перечень

вопросов, подлежащих рассмотрению на установочном совещании. Факт проведения установочного совещания фиксируется в специальном журнале, который находится в подразделении по ОТ, ПБ и Э Общества. Куратор договора на установочном совещании передает представителю Подрядчика для получения акта-допуска перечень определенных для данного вида деятельности документов и разъясняет порядок получения акта-допуска. Факт передачи перечня документов, необходимых для получения акта-допуска, фиксируется в журнале проведения установочных совещаний.

Также Подрядчик в рамках Договора предоставляет отчеты в области ОТ, ПБ и Э по форме представленной в Таблице №1

Таблица I. Бланк отчета по экологии, промышленной безопасности и охраны труда

№ п/п	Показатели	В отчетном месяце	С момента заключения договора
1.	Среднесписочная численность персонала подрядной организации, производящего работы на объектах Предприятия за отчетный период, чел.		
2.	Количество человеко-часов, отработанных работниками подрядной организации на объектах Предприятия, чел/часов.		
3.	Количество пострадавших с временной потерей трудоспособности по причине травмы на производстве при работах на объектах Предприятия (код 04 в бланке листка нетрудоспособности), чел.		
4.	Количество дней нетрудоспособности в результате травм на производстве работников подрядной организации при работах на объектах Предприятия, чел/дн.		
5.	Экстренная медицинская эвакуация по состоянию здоровья, чел.		
6.	Количество ДТП		

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Порядок взаимодействия подразделений Предприятия с организациями, выполняющими работы на объектах Общества, усиливает ответственность руководителей и специалистов за повышение технической безопасности оборудования, рабочих мест и работ, принятие ответственных решений, стимулирует повышение компетентности персонала.

## Список литературы

- [1] Приказ Минтруда России от 24.07.2013 № 328н "Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок".
- [2] Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12.11.2013 № 533 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения".
- [3] Федеральный закон от 05.04.2013 № 44-ФЗ "О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд"

# Исследование возможности работы малой генерации в энергосистеме Республики Хакасия

Н.С. Фроленко<sup>1</sup>, Е.Г. Сёма<sup>1</sup>, А.В. Тенешев<sup>1</sup>, Е.А. Толстикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО "Сибирский федеральный университет" (СФУ) Саяно-Шушенский филиал СФУ,  
Саяногорск, р.п. Черёмушки, Россия

<sup>2</sup>АО "СО ЕЭС", Москва, Россия

E-mail: 0709-1995@mail.ru

*Аннотация* — Республика Хакасия – регион, богатый гидроэнергетическими ресурсами, которые в настоящее время не используются. Перспективным направлением является сооружение ГЭС небольшой мощности, которые не требуют больших капитальных затрат при сооружении, имеют небольшие сроки окупаемости и могут обеспечить потребителя недорогой электроэнергией. ГЭС небольшой мощности могут быть применены как для точечного решения проблем обеспечения электроэнергией удаленных потребителей, так и для электроснабжения существующих потребителей. В первом случае работа станций предполагается чаще всего изолированно от энергосистемы, во втором требуется оценка влияния новой генерации на режим работы энергосистемы. При исследовании режима электроэнергетической системы использовались методы математического анализа и математического моделирования, программно-вычислительный комплекс RastrWin3. Произведены расчёты установившихся режимов работы электроэнергетической системы до и после оптимизации распределения мощности станций. Произведены расчёты оптимального распределения мощности станций без учёта и с учётом ограничений на нерегулируемые параметры. Предварительная оценка не выявила отклонения параметров установившихся электроэнергетических режимов от допустимых.

*Ключевые слова* — малые ГЭС; электроэнергетическая система; оптимальная мощность; гидроэнергетический потенциал

## Researching of the opportunity of HPPs work in the power system of the Republic of Khakassia

Nataliya Frolenko<sup>1</sup>, Ekaterina Syoma<sup>1</sup>, Anatoly Teneshev<sup>1</sup>, Ekaterina Tolstikhina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University Sayano-Shushenskiy branch of SFU, Sayanogorsk, Cheremushki, Russian Federation

<sup>2</sup>System Operator of the United Power System, Moscow, Russian Federation

E-mail: 0709-1995@mail.ru

*Abstract* — The Republic of Khakassia is a region rich of hydropower resources, which are not currently used. A promising area is the construction of small HPPs that do not require large capital expenditures during construction, have a short payback period and can provide the consumer with inexpensive electricity. Such kind of HPPs can be used both for a solution of the problems of providing electricity to remote consumers and for electricity supply to existing consumers. In the first case, the work of the stations is most often supposed to be isolated from the power system, in the second, an assessment of the effect of the new generation on the operation mode of the power system. The methods of mathematical analysis and mathematical modeling were used. Software RastrWin3 was used as a modeling tool. Calculations have been made of the established operating modes of the electric power system before and after optimizing the power distribution of the stations. The calculations of the optimal power distribution of stations without taking into account and taking into account the restrictions on unregulated parameters. Preliminary assessment did not reveal the deviation of the parameters of the established electric power regimes from the permissible.

*Keywords* — small HPPs; electrical power system; optimal power; hydropower potential

### 1. ОПТИМАЛЬНАЯ ЗАГРУЗКА МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В соответствии с прогнозом социально-экономического развития Республики Хакасия на период

до 2030 года [1] будет наблюдаться дефицит электроэнергии в связи с планируемым строительством горнодобывающих и обрабатывающих предприятий. Для энергообеспечения новых предприятий и предгорных районов нет альтернативы малой гидроэнергетике.

Республика Хакасия обладает высоким гидроэнергетическим потенциалом. В регионе учтено 324 реки.

В качестве примера рассмотрено проектирование пяти малых гидроэлектростанций (МГЭС).

Была проведена оценка максимальной мощности МГЭС [2]:

- Тейская ГЭС максимальной мощностью 15 МВт;
- Аскизская ГЭС максимальной мощностью 48,5 МВт;
- Онакская ГЭС максимальной мощностью 16,4 МВт;
- Июсская ГЭС максимальной мощностью 12 МВт;
- Ербинская ГЭС максимальной мощностью 26 МВт.

Структурная схема сети МГЭС представлена на рис. 1.

Для оптимального распределения мощности рассматриваемых МГЭС был применен метод Лагранжа [3].

Аналитически были построены характеристики относительных приростов (ХОП) расходов воды [3].

Оптимальная модель распределения мощностей запишется:

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 - P_H = 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = \varepsilon_5 = -\lambda = const, \quad (2)$$

где  $P_H$  – потребляемая мощность в узлах энергосистемы;

$\lambda$  – неопределенный множитель Лагранжа;

$\varepsilon$  – относительный прирост расхода воды.



Рис. 1. Расчетная схема системы

Нелинейная система уравнений ХОП (2) решается методом Ньютона.

Предположим, что Тейская ГЭС работает изолированно и для покрытия нагрузки в летний период требуется 55 МВт. Тогда в расчете оптимизации будут участвовать 4 МГЭС (табл. I).

Таблица I. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДЛЯ  $P_H=55$  МВт

МГЭС	$N_{усть}$ , МВт	Мощность в оптимальном режиме, МВт
Аскизская	48,5	12,9
Онакская	16,4	14,1
Ербинская	26,0	16,7
Июсская	12,0	11,3

Для покрытия нагрузки в зимний период  $P_H=100$  МВт при решении задачи без наложения ограничений на

мощности МГЭС результаты расчета приведены в таблице II.

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДЛЯ  $P_H=100$  МВт

МГЭС	$N_{усть}$ , МВт	Мощность в оптимальном режиме, МВт
Аскизская	48,5	23,9
Онакская	16,4	20,8
Ербинская	26,0	29,4
Июсская	12,0	25,8

Из вышеприведенных расчетов видно, что мощности четырех МГЭС превышают максимальные.

Рассчитаем оптимальный режим при нагрузке 100 МВт при наложении ограничений на мощности станций.

Рассчитаем оптимальный режим при нагрузке 100 МВт при наложении ограничений на мощности станций:

$$P_{1max} = 48,5 \text{ МВт}, P_{1min} = 25,0 \text{ МВт};$$

$$P_{2max} = 16,4 \text{ МВт}, P_{2min} = 14,0 \text{ МВт};$$

$$P_{3max} = 26,0 \text{ МВт}, P_{3min} = 21,0 \text{ МВт};$$

$$P_{4max} = 12 \text{ МВт}, P_{4min} = 10,0 \text{ МВт}.$$

Начальные приближения:  $P_2=15,8$  МВт,  $P_3=25,5$  МВт,  $P_4=11,6$  МВт.

Из уравнения баланса:  $P_2 = 100 - 15,8 - 25,5 - 11,6 = 47,1$  МВт.

Начальные приближения лежат в допустимой области.

Вычисляем относительные приросты расхода воды:

$$\varepsilon_1 = 0,0381 \cdot 47,1^2 + 14,0009 \cdot 47,1 + 26,313 = 351,4453 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_2 = 0,0746 \cdot 15,8^2 + 5,0600 \cdot 15,8 + 32,0898 = 130,6609 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_3 = 0,0274 \cdot 25,5^2 + 4,3564 \cdot 25,5 + 18,0120 = 146,9171 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_4 = 0,0379 \cdot 11,6^2 + 4,5784 \cdot 11,6 + 26,3718 = 84,5811 \text{ МВт};$$

Разница относительных приростов расхода воды:

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 130,6609 - 351,4453 = -220,7843 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_1 = 146,9171 - 351,4453 = -204,5282 \text{ МВт};$$

$$\varepsilon_4 - \varepsilon_1 = 84,5811 - 351,4453 = -266,8642 \text{ МВт}$$

Определим допустимый шаг оптимизации:

$$t_{2don} = \frac{P_{2max} - P_2}{-(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} = \frac{16,4 - 15,8}{-(-220,7843)} = 0,0027;$$

$$t_{3don} = \frac{P_{3max} - P_3}{-(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)} = \frac{26,0 - 25,5}{-(-204,5282)} = 0,0024;$$

$$t_{4don} = \frac{P_{4max} - P_4}{-(\varepsilon_4 - \varepsilon_1)} = \frac{12,0 - 11,6}{-(-266,8642)} = 0,0015;$$

$$t_{1don} = \frac{P_{1min} - P_1}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) + (\varepsilon_4 - \varepsilon_1)} = \frac{25,0 - 47,1}{(-220,7843) + (-204,5282) + (-266,8642)} = 0,0319.$$

Из всех допустимых шагов выбираем минимальный:

$$t_{доп\ min} = 0,0015 \cdot$$

Прирост мощности и мощности станций в итерационном процессе:

$$\Delta P_2 = -(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot t_{доп\ min} = -(-220,7843) \cdot 0,0015 = 0,3309 \text{ МВт};$$

$$P_2^{(1)} = P_2 + \Delta P_2 = 15,8 + 0,3309 = 16,1309 \text{ МВт};$$

$$\Delta P_3 = -(\varepsilon_3 - \varepsilon_1) \cdot t_{доп\ min} = -(-204,5282) \cdot 0,0015 = 0,3066 \text{ МВт};$$

$$P_3^{(1)} = P_3 + \Delta P_3 = 25,5 + 0,3066 = 25,8066 \text{ МВт};$$

$$\Delta P_4 = -(\varepsilon_4 - \varepsilon_1) \cdot t_{доп\ min} = -(-266,8642) \cdot 0,0015 = 0,3989 \text{ МВт};$$

$$P_4^{(1)} = P_4 + \Delta P_4 = 11,6 + 0,3989 = 11,9989 \text{ МВт};$$

Мощность  $P_4^{(1)}$  вышла за верхний предел, то есть  $t_{доп}$  оказался наименьшим.

Вычисляем  $P_1^{(1)}$  на первой итерации:

$$P_1^{(1)} = 100 - 16,1309 - 25,8066 - 11,9989 = 46,0636 \text{ МВт}.$$

На остальных итерациях расчеты выполняются аналогичным образом. Результаты представлены в таблице III.

Таблица III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДЛЯ  $P_n=100$  МВт ПРИ НАЛОЖЕНИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

МГЭС	$N_{уст}$ , МВт	Мощность с наложением ограничений, МВт
Аскизская	48,5	45,7586
Онакская	16,4	16,2893
Ербинская	26,0	25,9532
Июсская	12,0	11,9989

## II. Оценка влияния проектируемых МГЭС на установившийся режим электрической сети филиала ПАО «МРСК СИБИРИ» — «ХАКАСЭНЕРГО»

Для оценки влияния проектируемых МГЭС в рассматриваемом узле электрической сети филиала ПАО «МРСК Сибирь» — «Хакасэнерго» (табл. IV) был произведен расчёт с использованием программно-вычислительного комплекса RastrWin3 [4] следующих установившихся режимов:

- без проектируемых МГЭС (табл. V, рис. 2);
- с проектируемыми без наложения ограничений на мощности МГЭС (табл. VI, рис.3);
- с проектируемыми МГЭС с учётом наложения ограничений на мощности МГЭС и оптимального распределения активных мощностей (табл. VII, рис. 4).

Таблица IV. ДАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ФИЛИАЛА ПАО «МРСК СИБИРИ» — «ХАКАСЭНЕРГО»

Воздушная линия	Длина, км	Марка провода	Сопротивление	
			Активное, Ом/км	Индуктивное, Ом/км
ПС Тея - ПС Югачи	44,91	АС 400/51	0,075	0,42
ПС Югачи - ПС Аскиз	36,71	АС 400/51	0,075	0,42
ПС Аскиз - ПС Камышта	26,28	АС 400/51	0,075	0,42
ПС Камышта - ПС Абаканская	98,05	АС 400/51	0,075	0,42
ПС Абаканская - ПС Абакан-районная	6,81	АС 400/51	0,075	0,42
ПС Абакан-районная - ПС Сора	73	АС 400/51	0,075	0,42
ПС Сора - ПС Туим	128,74	АС 500/64	0,06	0,413
ПС Аскиз - ПС Абаза	86,87	АС 300/39	0,098	0,424

Таблица V. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ СЕТИ БЕЗ УЧЁТА МГЭС

Название узла	$U_{ном}$ , кВ	$U_{кВ}$	$\Delta V$ , кВ	$\Delta V$ , %
ПС Тея	220,0	218,60	1,40	0,64
ПС Югачи	220,0	218,85	1,15	0,52
ПС Аскиз	220,0	219,43	0,57	0,26
ПС Камышта	220,0	219,64	0,36	0,16
ПС Абаканская	225,5	225,50	0,00	0,00
ПС Абакан-районная	220,0	225,26	5,26	2,39
ПС Сора	220,0	222,20	2,20	1,00
ПС Туим	220,0	220,13	0,13	0,06
ПС Абаза	220,0	218,50	1,50	0,68

Таблица VI. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ СЕТИ МГЭС БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЙ

Название узла	$U_{ном}$ , кВ	$U$ , кВ	$\Delta V$ , кВ	$\Delta V$ , %
ПС Тея	220	225,06	5,06	2,30
ПС Югачи	220	225,32	5,32	2,42
ПС Аскиз	220	225,91	5,91	2,69
ПС Абаза	220	226,97	6,97	3,17
ПС Камышта	220	223,81	3,81	1,73
ПС Абаканская	226	225,5	0,50	0,22
ПС Абакан-районная	220	225,4	5,40	2,45
ПС Сора	220	224,65	4,65	2,11
ПС Туим	220	224,37	4,37	1,99

Таблица VII. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ СЕТИ С МГЭС ПОСЛЕ ОПТИМИЗАЦИИ

Название узла	$U_{ном}$ , кВ	$U_{кВ}$	$\Delta V$ , кВ	$\Delta V$ , %
ПС Тея	220	227,2	7,20	3,27
ПС Югачи	220	227,46	7,46	3,39
ПС Аскиз	220	228,06	8,06	3,66
ПС Абаза	220	228,59	8,59	3,90
ПС Камышта	220	225,11	5,11	2,32
ПС Абаканская	226	225,5	0,50	0,22
ПС Абакан-районная	220	225,36	5,36	2,44
ПС Сора	220	223,88	3,88	1,76
ПС Туим	220	222,6	2,60	1,18

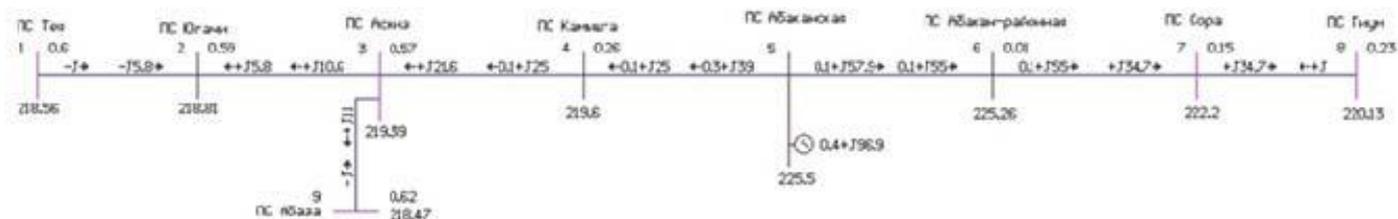


Рис. 2. Графическая схема сети без проектируемых МГЭС

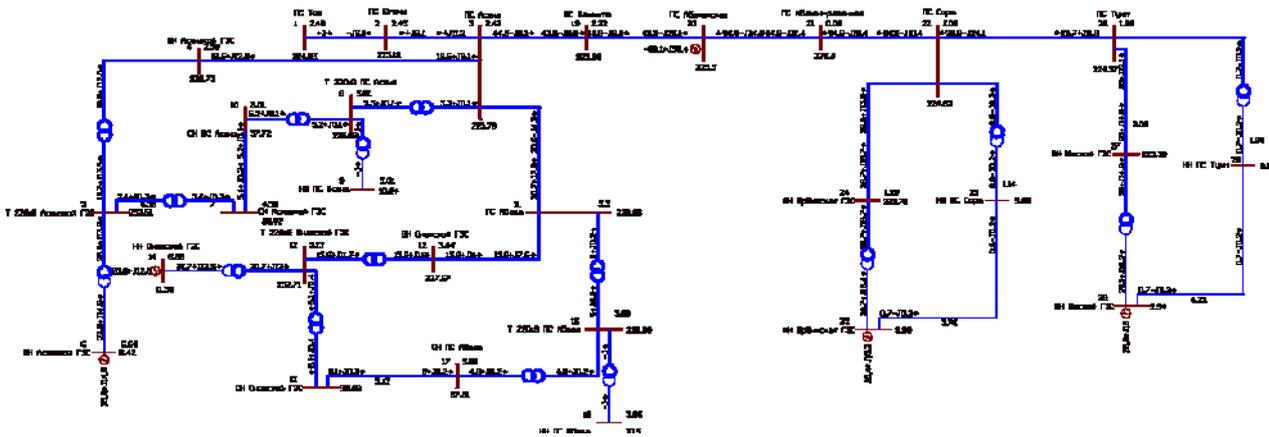


Рис. 3. Графическая схема сети без учета ограничений, накладываемых на МГЭС

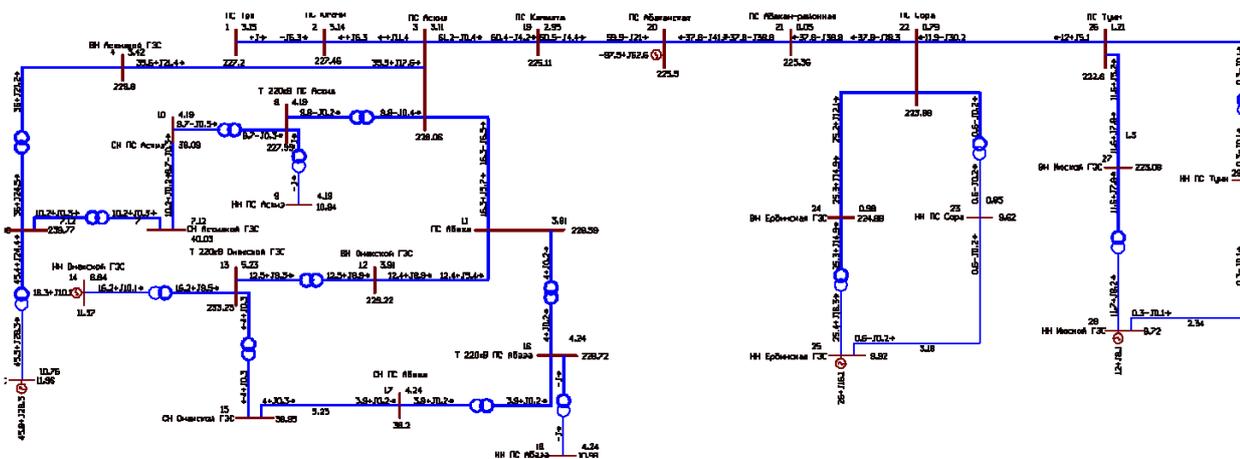


Рис. 4. Графическая схема сети с учетом ограничений, накладываемых на МГЭС после оптимизации

Из расчётов видно, что с учетом работы рассматриваемых станций отклонение напряжения на подстанциях сети не превышает нормированного значения. Предварительная оценка не выявила необходимости мероприятий по первичному электросетевому оборудованию.

### III. ВЫВОДЫ

1. Была произведена предварительная оценка возможности работы МГЭС в энергосистеме Республики Хакасия.
2. Была реализована математическая модель по расчету оптимального распределения активной мощности МГЭС для покрытия нагрузки выбранного энергоузла.
3. Выполнен расчет оптимального распределения мощности станций без учета и с учетом ограничений.

4. Рассчитаны режимы электрических сетей филиала ПАО «МРСК Сибири» — «Хакасэнерго» до и после проведения оптимизации. В результате оптимизационных мероприятий определен экономический эффект по снижению потерь активной мощности.

### Список литературы

- [1] Постановление Президиума Правительства Республики Хакасия от 07.09.2015 № 87-п. Об утверждении Прогноза социально-экономического развития Республики Хакасия на период до 2030 года.
- [2] Никишин К.А., Толстихина Е.А., Сёма Е.Г., Толстихина Л.В. Использование гидроэнергетических ресурсов южных районов Сибири для строительства малых ГЭС//Электротехника глазами молодежи-2016: материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции, 19-23 сентября 2016 г., Казань. – Т.3. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 379 с.
- [3] Е.Г. Сёма, Н.С. Фроленко, А.В. Тенешев. Перспективы использования гидроэнергетических ресурсов Республики Хакасия//Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, 13-14 апреля 2017 г., г. Саяногорск, рп. Черемушки: ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (СФУ) Саяно-Шушенский филиал СФУ, 2017. – 452 с.
- [4] [Электронный ресурс]: Программные комплексы RastrWin, Bars, Lincor, Rustab, RastrKZ, RastrMDP. – Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru/> (дата обращения: 11.01.2017).

# Модель интеллектуальной системы оценки эффективности внедрения объектов распределённой генерации

С.А. Ерошенко

ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"  
Екатеринбург, Россия  
E-mail: s.a.eroshenko@urfu.ru

*Аннотация* — подключение большого числа объектов распределённой генерации и их функционирование в составе энергосистемы оказывает существенное влияние на режимы работы сети и условия её развития. В рамках представленной работы выполняется исследование возможности создания интеллектуальной автоматизированной системы оценки эффективности внедрения объектов распределённой генерации с целью решения задач оптимизации режимов работы и планирования развития электроэнергетических систем. Разрабатываемая система базируется на генетических алгоритмах, что позволяет выполнять поиск и оценку наиболее эффективных технических решений независимо от вида целевой функции. Данное преимущество обеспечивает инвариантность системы к выбору субъекта оценки эффективности внедрения объекта распределённой генерации и составу исходной информации. Апробация модели системы предполагается на примере анализа подключения объектов распределённой генерации к сетям крупной региональной электросетевой компании с целью разработки эффективных рекомендаций по эксплуатации и развитию электроэнергетической системы для различных хозяйствующих субъектов. Разработанная модель системы поддержки принятия решений при внедрении объектов распределённой генерации в электроэнергетическую систему может быть использована в производственной деятельности электросетевых компаний при выдаче технических условий на технологическое присоединение, а также для решения как проектных - разработка схем выдачи мощности объектов распределённой генерации, так и эксплуатационных задач.

*Ключевые слова* — распределённая генерация; распределительная сеть; интеллектуальная система; многокритериальный анализ.

## Intelligent system model for distributed generation implementation efficiency analysis

S.A. Eroshenko

Ural Federal University  
Ekaterinburg, Russian Federation  
E-mail: s.a.eroshenko@urfu.ru

*Abstract* — connection of a large number of distributed generation objects and its operation as a part of a power supply system has significant effect on operating modes of the electric network and conditions of its development. The presented work includes the research of a possibility to create the intelligent automated system for distributed generation implementation efficiency analysis to solve the problems of operating modes optimization and planning of electrical power systems development. The developed system is based on genetic algorithms which allows searching for the most effective technical solutions without reference to a type of the objective function. This advantage provides system invariance regarding the choice of distributed generation implementation objective and initial data structure. The offered multicriteria problem definition allows to execute decomposition and to estimate influence of the distributed generation unit on a power supply system according to separate criteria. Verification of the proposed system model is provided on the example of distributed generation object implementation into the large regional electric grid to develop effective recommendations regarding operation and development of electrical power system for various economic entities. The developed model of decision-support system for distributed generation implementation analysis can be used in production activities of the electric grid companies to provide network connection acts and also to deliver decision for both design (development of schemes of power distribution of the distributed generation objects) and operational tasks.

*Keywords* — distributed generation; distribution network; intelligent system; multicriteria analysis.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Обзор российских стандартов и регламентов, выполненных в рамках данного исследования автором

показал, что в РФ сегодня отсутствует система нормативно-технического регулирования, которая могла бы обеспечить гармоничное развитие распределённой и «большой» энергетики с точки зрения технологического

присоединения и функционирования объектов распределённой генерации (РГ). Большинство типовых инструкций и методических указаний в отношении генерации на сегодняшний день распространяются на объекты с установленной мощностью более 25 МВт. Введение порога участия на оптовом рынке электроэнергии и мощности 25 МВт было обусловлено тем, что генерирующий объект такой мощности оказывает несущественное влияние на электрический режим единой энергосистемы. Такой подход оправдан в случае, если суммарная установленная мощность РГ в общей структуре генерирующих мощностей невелика.

Анализ имеющихся ретроспективных данных о вводах объектов РГ на территории Свердловской области показал, что суммарная доля в общей структуре генерирующих мощностей энергосистемы составляет порядка 6% (около 600 МВт), а для отдельных – порядка 10-15%. Прогнозируемое увеличение вводов РГ обуславливает необходимость создания соответствующих документов в системе национальной стандартизации.

Выполненный автором статьи анализ зарубежных источников включает в себя нормативно-технические документы более 20 стран Европы, Северной Америки, Ближнего Востока и Юго-Восточной Азии, Тихоокеанского региона, в том числе международный стандарт IEEE 1547. Изучение существующего опыта и мировых стандартов выполнено с целью выявления общих закономерностей в методах и способах интеграции РГ в энергосистемы и является полезным этапом при формировании системы критериев оценки эффективности её внедрения.

В рамках анализа были рассмотрены основные технические требования, предъявляемые к подключаемым установкам РГ в различных странах. Большой интерес в рамках данных регламентов представляют граничные условия, которым должны соответствовать характеристики генерирующего объекта, в частности максимально допустимая установленная мощность объекта, влияние на уровни напряжения, токи короткого замыкания и др.

Согласно обзору, при выборе предварительных технических решений по реализации схемы выдачи мощности РГ целесообразно учитывать следующие основные ограничения:

- по влиянию на загрузку электрической сети: токовая загрузка линий и мощность трансформаторов, установленных на центре питания;
- по влиянию на уровни токов короткого замыкания: координируемый уровень токов короткого замыкания в сети, токи отключения выключателей;
- по влиянию на уровни напряжений: соблюдение требований стандартов на качество электрической энергии.

## II. МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ РГ

В рамках исследований был выполнен сравнительный анализ возможности использования различных методов случайного поиска для решения задачи оценки эффективности внедрения РГ в электроэнергетические системы, в результате которого были выявлены преимущества использования генетических алгоритмов.

Генетические алгоритмы относятся к классу алгоритмов направленного случайного поиска, моделирующих естественные эволюционные процессы для поиска оптимального решения, и, в отличие от перечисленных выше методов, обеспечивают его быструю сходимость. Многочисленные отечественные и

зарубежные исследования доказали, что любая задача оптимизации, к которой в том числе относятся задачи подключения РГ, выбора состава включенного оборудования и режимов его работы, оптимизации топологии сети и потокораспределения, могут быть решены с использованием генетических алгоритмов.

На рисунке 1 представлена обобщенная блок-схема адаптированного генетического алгоритма с модулем индикативного анализа эффективности внедрения РГ. Методика индикативного анализа для представленного решения подробно описана автором в [1,2].

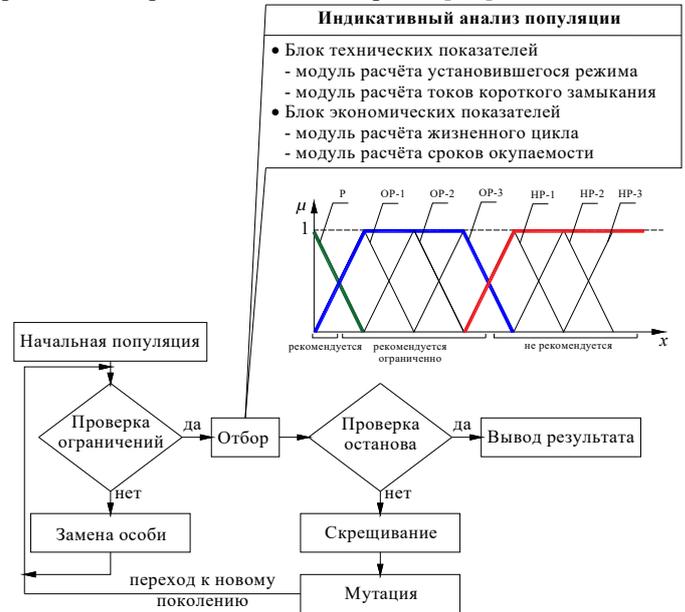


Рис. 1. Блок-схема генетического поиска

Начальная популяция. В зависимости от постановки задачи, хромосома может содержать в себе закодированную информацию о следующих параметрах: тип генерирующей установки, количество установок, единичная мощность агрегата, точка подключения, состояние элементов схемы (включено/отключено) и др. Начальная популяция содержит в себе фиксированное число хромосом. Хромосома (вектор входных данных) представляет собой битовую строку, в которой в двоичной системе закодированы параметры для решения рассматриваемой задачи (рисунок 2).



Рис. 2. Пример формирования вектора исходных данных

Проверка ограничений. Ограничения в представленной задаче могут задаваться в виде равенств  $B \cdot x = b$  и неравенств  $A \cdot x \leq a$ , которые в свою очередь могут быть дополнены логическими операторами. При несоответствии параметров хромосомы указанным ограничениям, вместо неё случайным образом в заданном диапазоне генерируется другая особь.

Блок ограничений позволяет задавать мягкие ограничения, когда функция оценки приспособленности хромосомы, не соответствующей заданным параметрам, дополняется штрафной функцией  $\Phi(x, a)$ . Это позволяет избежать переопределённости решаемой задачи, когда с



увеличивается резерв на подключение новых потребителей с точки зрения загрузки силовых трансформаторов ГПП «Ботаническая» и «Рощинская»;

- Установка генерации в распределительной сети на шинах ТП (РП) приводит к снижению потерь электрической энергии. В исходной схеме суммарная величина потерь электрической мощности составляет 305 кВт. Для варианта с генератором мощностью 750 кВт – 301 кВт; 1500 кВт – 270 кВт; 5000 кВт – 196 кВт. Установка генераторов на шинах ПС не приводит к изменению величины потерь.

- Установка генерации на шинах ТП(РП) приводит к увеличению уровней токов трехфазного короткого замыкания пропорционально мощности генерирующей установки (до 20 – 22 кА при подключении РГ мощностью 5000 кВт). Согласно исходным данным, для всех коммутационных аппаратов обеспечивается соответствие отключающей способности расчетным значениям трехфазного короткого замыкания на шинах подстанций.

Таким образом, в максимальной степени всем предъявленным требованиям соответствует вариант установки РГ мощностью 5000 кВт на ТП-2486. Оценка данного варианта находится на границе между «рекомендуется» к установке и «ограничено рекомендуется-1». Снижение оценки произошло главным образом из-за высоких капитальных вложений в данный вариант. Сводная таблица и диаграммы целесообразности вариантов в ходе реализации алгоритма генетического поиска представлены ниже.

Таблица 1. Классификация состояний по индикативным показателям

Вариант	Блок №1.	Блок №2	Блок №3	Общая оценка	Оценка варианта установк и
Вариант 1	0,33	0,57	0,53	0,44	ОР-2
Вариант 2	0,33	0,57	0,41	0,40	ОР-2
Вариант 3	0,00	0,00	0,42	0,21	ОР-1
Вариант 4	0,83	0,57	0,53	0,60	ОР-2
Вариант 5	0,83	0,57	0,41	0,57	ОР-2
Вариант 6	0,83	0,00	0,42	0,51	ОР-2

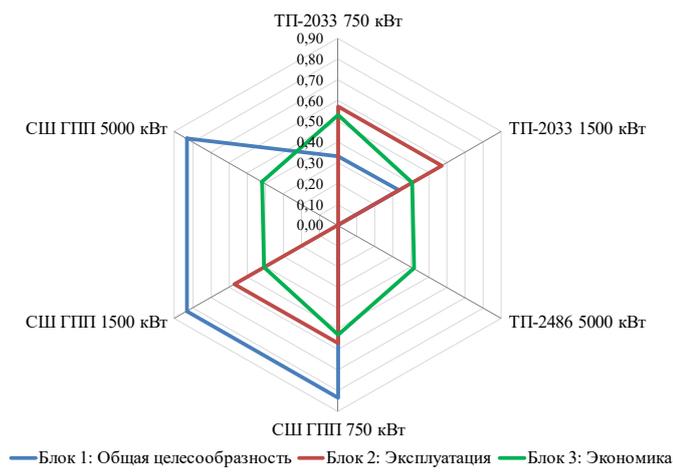


Рис. 5. Оценка приспособленности вариантов по блокам

#### IV. ВЫВОДЫ

Получено и обосновано решение задачи комплексной оценки эффективности внедрения объектов распределённой генерации в электроэнергетические системы генетического поиска, совмещенного с индикативным анализом.

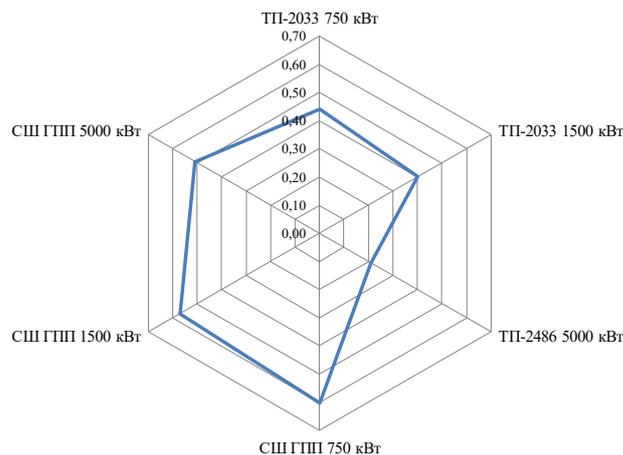


Рис. 6. Итоговая оценка приспособленности вариантов

Разработаны структурная и математическая модели оценки эффективности внедрения объектов РГ и определены основные критерии влияния объекта РГ на электроэнергетическую систему при обосновании целесообразности реализации вариантов.

Обоснована возможность реализации разработанной модели системы оценки эффективности внедрения РГ на основе интеллектуального анализа агрегированных данных об электроэнергетической системе.

Определены способы решения задачи совершенствования процедуры технологического присоединения объектов РГ к распределительным электрическим сетям с учётом схемно-режимного многообразия внешней электроэнергетической системы.

Выполнена апробация разработанной модели на базе программного комплекса Palisade Decision Tools с модулем генетического поиска Evolver на примере оценки целесообразности ввода объекта РГ для фрагмента реальной электроэнергетической системы, что подтверждает эффективность использования предлагаемого подхода.

Результаты, полученные в ходе разработки и апробации интеллектуальной автоматизированной системы могут быть использованы в производственной деятельности электросетевых компаний при выдаче технических условий на технологическое присоединение объектов РГ.

Разрабатываемый подход по обоснованию реализуемости предлагаемых технических решений и адекватной оценке рисков, будет обеспечивать эффективную интеграцию РГ в объединённую электроэнергетическую систему, прозрачность требований субъектов «большой» энергетики по отношению к новым участникам рынка

#### Список литературы

- [1] С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, А.В. Паздерин, С.А. Дмитриев, А.И. Халыямаа. Технические вопросы подключения малой генерации на параллельную работу с энергосис- темой // Журнал «Научное обозрение». 2013. №6. С.49-55
- [2] S. Eroshenko, S. A. Dmitriev, A. I. Khalyasmaa, "Technical Feasibility of Distributed Generation Network Connection", Advanced Materials Research, Vols. 860-863, pp. 2131-2136, 2014.
- [3] С.А. Ерошенко, С.А. Дмитриев, А.И. Халыямаа. Анализ технической реализуемости присоединения установок малой генерации на параллельную работу с сетью электросетевой компании //Журнал «Энергетика Татарстана». №4(28). 2013. С. 60-66.

# СОЗДАНИЕ МОБИЛЬНОГО ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА «ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ»

В.Д.Свистунов, М.С.Богомолова  
ФГБОУ ВО НИУ "Московский энергетический институт"  
Москва, Россия  
E-mail: svistunov.vladimir@gmail.com

*Аннотация* — проблема выбора будущей профессии стоит перед каждым выпускником. Для проведения профориентации будущего поколения необходимо продемонстрировать и заинтересовать абитуриента в том, с чем он будет работать. Наиболее наглядно это показывает натурное оборудование, однако лабораторные стенды велики по размеру и негодны для показательной демонстрации работы возобновляемых источников энергии. Наличие портативного макета основных нетрадиционных источников энергии сильно упростит задачу демонстрации их работы.

*Ключевые слова* — ветрогенератор, солнечная панель, автономное энергоснабжение, демонстрационный стенд.

## CREATING THE MOBILE DEMONSTRATION STAND "RENEWABLE SOURCES OF ENERGY"

Vladimir Svistunov, Marija Bogomolova  
Moscow Power Engineering Institute  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: svistunov.vladimir@gmail.com

*Abstract* — The problem of choosing a future profession is facing each graduate. To conduct vocational guidance for the future generation, it is necessary to demonstrate and interest the entrant in what he will work with. This is most clearly demonstrated by full-scale equipment, but laboratory stands are large and not suitable for demonstrating the work of renewable energy sources. The presence of a portable model of basic non-traditional energy sources will greatly simplify the task of demonstrating their work.

*Key-words* — wind generator, solar panel, autonomous power supply, demonstration stand.

### 1. НАЗНАЧЕНИЕ СТЕНДА

Возобновляемая энергетика – это будущее технологий человечества и знакомство людей с ней очень важно для современного общества.

Кафедра «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» (ГВИЭ) ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» проводит активную проф.ориентационную работу среди учеников средних школ Москвы и других регионов России. В рамках этой работы часто возникает необходимость наглядно продемонстрировать принципы функционирования электроэнергетических установок на основе возобновляемых источников энергии. В случаях, когда проф.ориентационные мероприятия проводятся вне МЭИ, сотрудникам кафедры ГВИЭ необходимо иметь при себе мобильную версию демонстрационного оборудования.

К разрабатываемому образцу мобильного демонстрационного стенда «ВИЭ» предъявляются следующие требования:

- массогабаритные характеристики не должны превышать 3 кг и размеров переносимого чемодана;
- стенд должен работать от сети 220 В переменного тока, при этом потребляемая мощность не должна превышать 25 Вт;
- демонстрация принципов работы ветроэнергетической установки (ВЭУ), для этого следует использовать ветрогенератор и источник ветра (вентилятор);
- демонстрация принципов работы солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ), для этого следует использовать солнечную

фотоэлектрическую панель и источник направленного света;

- для наглядной демонстрации работы энергоустановок на основе ВИЭ предусмотрен набор потребителей энергии в составе светодиодной ленты и нескольких одиночных светодиодов.
- демонстрационный стенд должен быть удобен в эксплуатации, понятен для человека, который использует данный макет и для людей, наблюдающих за работой макета
- работа с макетом должна быть безопасной и эффективной, причем конструкция и принцип работы должен позволять эксплуатировать стенд пользователю без серьезной подготовки

На рисунке 1 представлена фотография работающего демонстрационного стенда, выполненного в деревянном чемодане.



Рис. 1. Фотография демонстрационного стенда «ВИЭ»

## II. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

### A. Ветроэнергетическая установка

Ветроэнергетика – это способ получения различных видов энергии, основанный на использовании энергии, возникающей при движении воздушных масс, то есть, попросту говоря, на использовании энергии ветра.

Энергия ветра использовалась человечеством с давних пор. Именно энергия ветра столетия двигала парусные корабли, позволяя пересекать океаны, энергия ветра использовалась и в мельницах, она же применялась при орошении полей и осушении земель. И тогда, когда

человечество открыло для себя пользу электричества, вновь внимание было обращено на энергию ветра: в XIX столетии активно строились ветряные электростанции для промышленного производства электроэнергии.

В России всплеск интереса к ветряным электростанциям пришелся на 20-е годы XX столетия. Установка «коммунизм есть советская власть плюс электрификация всей страны» потребовала не только модификации властных структур, но и обеспечения «лампочками Ильича» громадных территорий государства.

Были разработаны ветряные электростанции для сельского хозяйства, которые могли изготавливаться прямо на месте, а материалы для их производства были общедоступны. Эти установки использовались как для освещения, так и для хозяйственных нужд (например, для мельниц). Обычный «крестьянский ветряк» мог обеспечить освещение крупной деревни – до двухсот дворов. При этом не возникало никаких проблем с передачей электроэнергии. [4]

ВЭУ использует кинетическую энергию воздушного потока, рабочее колесо ВЭУ преобразует её в механическую энергию вращения, а электрогенератор производит дальнейшее преобразование в электромагнитную энергию. Электрическая мощность ВЭУ определяется соотношением [1, 3]:

$$N_{ВЭУ} = \frac{1}{2} \rho F V^3 \eta_{ВЭУ} \quad (1)$$

где,  $\rho$  - плотность воздуха ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $F$  - ометаемая площадь ветроколеса ( $\text{м}^2$ );  $V$  - скорость ветра ( $\text{м}/\text{с}$ );  $\eta_{ВЭУ}$  - коэффициент полезного действия ВЭУ (о.е.).

Основной особенностью ВЭУ является сильная зависимость  $N_{ВЭУ}$  от  $V$ , которая сильно меняется в реальных условиях, что, например, видно на рисунке 2.

Для демонстрации указанной особенности в мобильном стенде «ВИЭ» в качестве ветрогенератора был использован двигатель переменного тока на 24 вольта, а в качестве ветроколеса были задействованы лопасти от компьютерного кулера. Двигатель, работающий в качестве генератора имеет малый момент запуска и при этом, при небольшой скорости вращения обеспечивает мощность, необходимую для обеспечения работы потребителей макета. Источником ветра является компьютерный кулер. Имеется возможность располагать его на разном расстоянии от ВЭУ, тем самым моделируется работа ветрогенератора при разной скорости ветра.

### B. Солнечная фотоэлектрическая установка

Солнечная энергетика – это направление нетрадиционной энергетики, основанное на непосредственном использовании солнечного излучения для получения энергии в каком-либо виде.

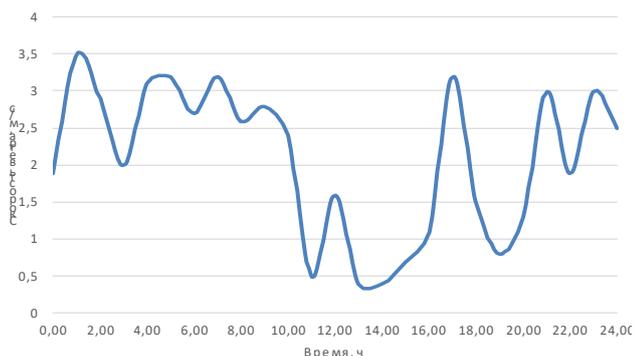


Рис. 2. График изменения скорости ветра в течении суток

Солнечная энергетика использует неисчерпаемый источник энергии и является экологически чистой, то есть не производящей вредных отходов. Производство энергии с помощью солнечных электростанций хорошо согласовывается с концепцией распределённого производства энергии.

Получение электроэнергии от солнца давно применяется во всем мире. Главной задачей ученых на данный момент является необходимость так усовершенствовать имеющиеся технологии, чтобы как можно больше увеличить их КПД.

Производство электроэнергии из солнечной энергии — тема очень актуальная и интересная для многих государств в сегодняшнее время. Малые солнечные электростанции могут обеспечить электроэнергией дома, предприятия, общественные здания и сохраняют богатство глубинных недр земли. Большие солнечные энергетические системы способны вырабатывать неограниченное число электроэнергии и способствовать развитию электроэнергетической отрасли в мировом масштабе.

Фотоэлектрические элементы, названные в научной среде как солнечные элементы, являются устройствами из полупроводниковых материалов и служат для выработки электричества. Фотоэлектрические элементы бывают разных размеров, объемов и форм. Их чаще всего объединяют между собой в фотоэлектрические модули, а модули — соединяют в фотоэлектрические батареи.

Фотоэлектрические элементы, фотомодули и устройства преобразуют солнечный свет в электрическую энергию. Понятие фотогальваники или выработки тока из солнечной энергии, можно в буквальном смысле охарактеризовать, как свет и электричество[5].

Выработка электроэнергии СФЭУ происходит за счет непосредственного преобразования энергии света, падающего на солнечную панель в электрический ток. Работа солнечных панелей основана на свойствах полупроводников: фотоны выбивают электроны с поверхности полупроводников, а направленное движение большого количества свободных электронов создаёт электрический ток. Электрическая мощность СФЭУ определяется соотношением [1, 2]:

$$N_{\text{СФЭУ}} = F \eta_{\text{СФЭУ}} R_{\Sigma} \quad (2)$$

где  $F$  - площадь солнечной панели ( $\text{м}^2$ );  $\eta_{\text{СФЭУ}}$  - коэффициент полезного действия СФЭУ (о.е.);  $R_{\Sigma}$  - суммарная интенсивность солнечной радиации на солнечную панель ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

В реальных условиях интенсивность солнечной радиации сильно меняется во времени, что демонстрируется на рисунке 3.

Для демонстрации работы солнечной электростанции, была использована солнечная панель шириной 0,25 м и высотой 0,2 м, которая представлена на рисунке 4. Ее характеристики позволяют генерировать напряжение и силу тока, которая необходима для обеспечения питания потребителей в демонстрационном макете. Освещение данной панели выполнено с помощью прожектора, работающего от сети 220 В и имеющего мощность 20 Вт, который представлен на рисунке 5. Его конструкция выполнена таким образом, что угол наклона прожектора может варьироваться в пределах от 0 градусов до 150 градусов, относительно нормального состояния солнечной панели.

### III. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА

Электрическая схема демонстрационного стенда представлена на рисунке 6. Потребители электрической энергии нужны для наглядности демонстрации выработки энергии при работе электростанций. В качестве них более использована светодиодная лента и несколько более мощных одиночных светодиодов. Также могут использоваться любые другие потребители подключающиеся от стандартного разъема USB 2.0.

Потребители энергии в макете используют постоянное напряжение. Поэтому, для того чтобы, они работали, необходимо преобразовать переменное напряжение в постоянное, что было сделано с помощью диодного моста. Напряжение с ветрогенератора подавалось на диодный мост, а после, выпрямленное напряжение питало потребителей энергии. Также, для выравнивания кривой напряжения, можно использовать конденсатор, подключенный параллельно к потребителю.

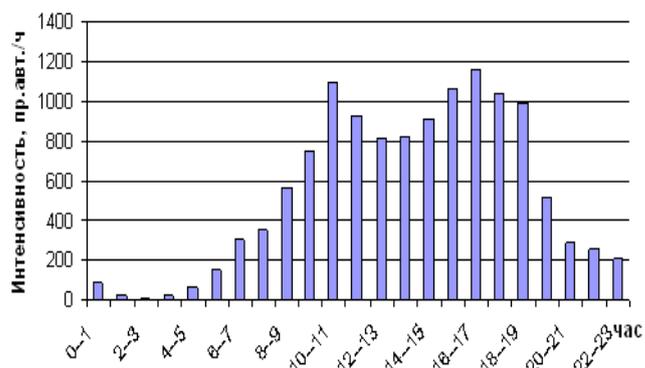


Рис. 3. График изменения интенсивности солнечной радиации в течении суток



Рис. 4. Солнечная панель

Для контролирования работы микроэнергетической системы, необходимо всегда измерять параметры электрических цепей, входящий в демонстрационный стенд. Необходимо измерять напряжение и ток на выходе из источника энергии, тем самым фиксировать мощность и выработку электроэнергии того или иного источника энергии.

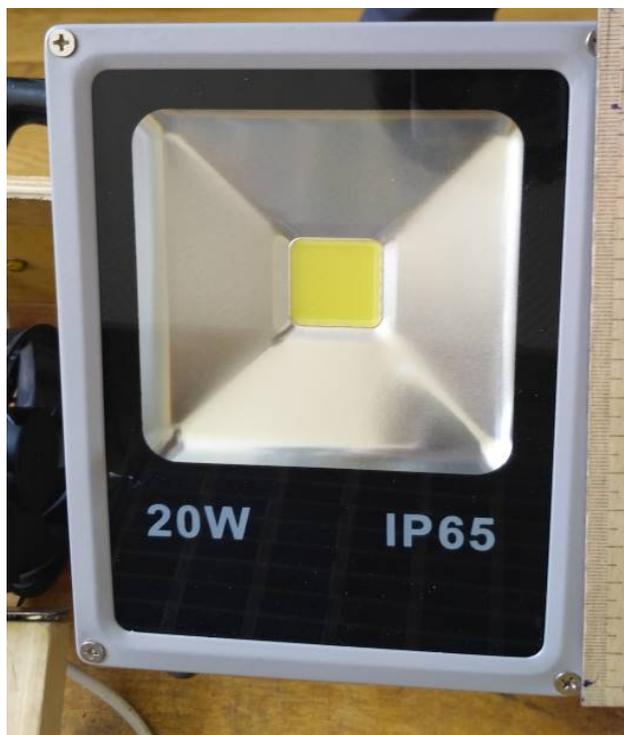


Рис. 5. Светодиодный прожектор

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Демонстрационный стенд показал высокую эффективность и наглядность в работе. Его не раз использовали на различных мероприятиях, таких как: день открытых дверей в МЭИ, День старшеклассника в г.Подольск (19 апреля 2017 г.), Университет мечты в НИУ «МЭИ», мастер-класс «Возобновляемые источники энергии» в рамках XXVI Московской открытой инженерной конференции школьников «Потенциал» (18 февраля 2017 г.) и других подобных мероприятиях, на которых необходимо было продемонстрировать работу возобновляемых источников энергии. Возможность увидеть своими глазами миниатюрную модель ветрогенерирующей и солнечной электростанции, дает представление об энергии солнца и ветра. Многие кто видел данный стенд, интересовались данными вопросами, что помогло лучше понять суть работы возобновляемых источников энергии, которые все более популярны. Данный стенд помогает повысить техническую грамотность в вопросах возобновляемой энергетики, дает наглядное представление её работе, а также позволяет подготовить подрастающее поколение к использованию «зеленой энергии», то есть энергии будущего.

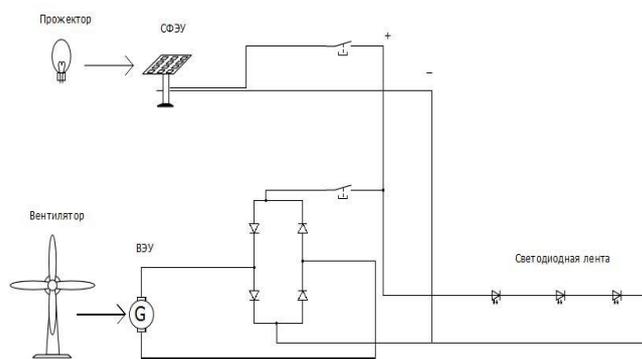


Рис. 6. Электрическая схема подключений в демонстрационном макете «ВИЭ»

#### Список литературы

- [1] Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии/ Дж. Твайделл, А. Уэйр. Пер. с англ.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 392 с.
- [2] Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: Учебное пособие для вузов / Под ред. В.И.Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
- [3] Ветроэнергетика: учебное пособие / А. Г. Васков [и др.]. – М.: Издательство МЭИ, 2016.
- [4] С.Варган. Ветроэнергетика: перспективы, плюсы и минусы [Электронный ресурс] / Альтернативная энергия. 2015. URL: <http://altenergiya.ru/veter/vetroenergetika-plyusy-i-minusy.html> (дата обращения: 10.05.2017).
- [5] Солнечная энергетика. Солнечная электростанция. [Электронный ресурс] / Все об электростанциях. 2012. URL: <http://www.gigavat.com/ses.php> (дата обращения: 12.05.2017).

# Анализ потребления и возможных потерь электроэнергии в распределительных сетях

А.С. Ведерников, Е.А. Керженцева  
Самарский Государственный Технический Университет  
Самара, Россия  
kerzhentseva.katya@mail.ru

**Аннотация** - Вопрос о расчете потребления электроэнергии существовал всегда. Данная проблема рассматривается с помощью измерительных комплексов, обеспечивающих измерение поступления и отпуска электроэнергии из сети или в сеть и включающих в себя различного рода измеряемые приборы, представляющие собой автоматизированную систему учета электроэнергии. Существуют нормативные характеристики потребления электроэнергии, а также для существующих потерь. Наиболее важно для дальнейшего планирования потребления производить регулярный расчет натуральной и экономической составляющей потерь электроэнергии. При проведении исследования потребления и потерь были использованы статистические данные по распределительным сетям, а так же методы обработки полученных данных. Проведен анализ существующих методов расчета потерь электроэнергии для распределительных сетей. Рассчитаны техническая и экономическая составляющие потерь электроэнергии. На основе проведенного анализа потребления и технических потерь электроэнергии сделан возможный прогноз по дальнейшему расчету электроэнергии в распределительных сетях. Проанализированы варианты снижения потерь электроэнергии в распределительных сетях. Подобный анализ позволил предложить наиболее эффективные варианты планирования потребления электроэнергии и снижения возможных потерь для распределительных сетей.

**Ключевые слова:** *потребление электроэнергии, технические потери, снижение потерь, эффективность; автоматизированная система учета электроэнергии.*

## Analysis of consumption and possible losses of electricity in distribution network

A.S. Vedernikov, E.A. Kerzhentseva  
Samara State Technical University,  
Samara, Russian Federation  
kerzhentseva.katya@mail.ru

**Abstract - Background:** The question of calculating the consumption of electricity has always existed. This problem is considered using measurement systems that provide measurement of revenues and distribution of electricity from the grid or network and includes different kind of the measuring instrument, an automated electricity metering system. There are normative characteristics of the consumption of electricity and for existing losses. The most important for further planning of consumption to make a regular calculation of physical and economic component of energy losses. The study of consumption and losses were used statistical data of the distribution networks, as well as the methods of data processing. The analysis of existing methods of calculation of energy losses of distribution networks. Designed technical and economic components of energy losses. On the basis of the analysis of consumption and technical losses of electric power made possible the forecast for the further calculation of electricity distribution networks. Analyzed options for reducing electricity losses in distribution networks. This analysis allowed us to offer the most effective options for the planning of electricity consumption and reduction of possible losses of distribution networks.

**Key-words:** *electricity consumption, technical losses, reduction of losses, efficiency; automated electricity metering system.*

В условиях изменения хозяйственного механизма электроэнергетической отрасли и общего кризиса экономики в стране проблема снижения потерь электроэнергии в электрических сетях не только не утратила свою актуальность, а стала скорее одной из основных задач обеспечения финансовой стабильности энергоснабжающих организаций. [4]

Для снижения потерь электроэнергии необходимо постоянно проводить анализ электропотребления, формировать, а также реализовывать необходимые мероприятия по совершенствованию распределения и учета электроэнергии. Анализ электропотребления является важным элементом снижения потерь.

Для решения поставленной задачи в работе авторы использовали реальные данные одной из сетевых организаций Самарской области. В таблице № 1 представлены данные по Ф-2 и Ф-10 подстанции «Калининская» [2].

Приведенные данные свидетельствуют о преимущественном потреблении электроэнергии физическими лицами на данных территориях. Данный факт обуславливается отсутствием крупных производственных предприятий в данной местности, которые имеют большой объем потребления электроэнергии.

Таблица 1. Данные отпуска и потерь электроэнергии по фидерам №2, №10 подстанции «Калининская» за апрель 2017

Наименование присоединения	Ед. изм.	Всего	Отпуск по потребителям			Отчетные потери		Технологические потери		Фактический небаланс	
			Юридич. лица	Физич. лица	Полезный отпуск ТСО						
Ф-2	кВт*ч	64918,0	25223,0	23070,0	16625	20376,5	23,8%	4334,5	5,08%	16042,0	18,8%
Ф-10	кВт*ч	37985,0	11184,0	26801,0	0	18049,0	32,2%	3902,5	6,96%	14146,5	25,2%

На основе проанализированного количества потерь электроэнергии, можно сделать вывод о высоком, недопустимом проценте коммерческих потерь по сравнению с техническими. [5] Из всех потерь электроэнергии на коммерческие приходится 18,81% на фидере-2 и 25,25% на фидере-10. Причиной данному явлению может служить «человеческий фактор» и иметь под собой организационные, экономические, психологические и юридические корни:

- задолженность по оплате потребителей электроэнергии;
- хищение электроэнергии потребителями;
- погрешность измерений отпущенной в сеть и полезно отпущенной электроэнергии потребителям;
- устаревшая система энергосбытовой деятельности.

Существует проблема, которая попадает в группу коммерческих потерь, обусловленных занижением полезного отпуска электроэнергии и в группу долговых или безнадежных долгов. Данные потери, обусловлены умышленным занижением сумм платежей со стороны потребителей — физических лиц.

Появление таких потерь наиболее вероятно там, где прибор учета находится на территории собственника — физического лица и доступ к нему для контролирующего персонала энергосбытового предприятия затруднен по юридическим причинам. Особенно данная проблема распространена в поселениях с неразвитой инфраструктурой. В данной местности коммерческие потери наиболее большие. [1]

Для выполнения задачи снижения потерь, выявлены основные направления формирования мероприятий:

- совершенствование внутриорганизационной деятельности на энергопредприятии;
- предотвращение и выявление фактов хищения электроэнергии, в том числе обнаружение мест несанкционированного подключения к линиям электроснабжения;
- контроль своевременности и полноты платежей за потребленную электроэнергию;
- реализацию функций оперативного диспетчерского управления на уровне каждого энергопотребителя;
- контроль качества электроэнергии и оперативное устранение причин, вызывающих нарушение качества электроэнергии.

В условиях эксплуатации мероприятия по снижению потерь называются организационными, а при проектировании - в основном технические мероприятия, которые требуют дополнительных капитальных вложений.

В качестве технических и организационных мероприятий по совершенствованию учета электроэнергии предложено:

1) Автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ, АСКУЭ), представляющая из себя совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающих дистанционный сбор, хранение и обработку данных об энергетических потоках в электросетях. С ее помощью можно предотвратить проблему хищения электроэнергии, обеспечить своевременную и полную оплату за потребленную электроэнергию, контроль и управление за электроэнергией на уровне каждого потребителя. В данном мероприятии предлагается сделать акцент на оценку и обучение кадров при адаптации к новой системе: аттестация персонала, подбор и расстановка персонала, повышение профессиональной компетентности работников и уровня организационной культуры, совершенствование управлением коллективом.

2) Повышение уровня рабочего напряжения. Требуется правильное регулирование напряжение в сетях для учета потерь энергии. Необходимо поддерживать максимально возможное при увеличении напряжения на 1% в сетях до 110кВ потери мощности и на 2%. В сетях 220 кВ всегда надо поддерживать максимально возможное напряжение. В сетях 330 кВ и выше надо регулировать напряжение с учетом потерь на корону.

Таким образом, проведен анализ электропотребления и потерь на примере подстанции «Калининская», выявлены причины превышения коммерческих потерь по сравнению с техническими, разработаны необходимые мероприятия, способствующие снижению потерь электроэнергии в распределительных сетях.

### Список литературы

- [1] Броерская Н.А. Об учете и нормировании потерь электроэнергии в электрических сетях в условиях реструктуризации отрасли// Энергетик. — 2007. — №9.
- [2] Внутренние документы распределительных сетей по потерям, апрель 2017
- [3] Воротницкий В.Э., Калинин М.А., Комкова Е.В., Пятигор В.И. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях. Динамика, структура, методы анализа и мероприятия // Энергосбережение. — 2005. — № 2.
- [4] Галыгина О.С., Заугольников В.Ф.О некоторых аспектах учета и потерь электроэнергии в предприятиях электросетей // Энергетик. — 2004. — № 5.
- [5] Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261-ФЗ

# Интеллектуальный город – создание платформы для анализа взаимодействия элементов энергетической инфраструктуры

И.Д. Кубарьков<sup>1</sup>, А.С. Блинов, Ю.П. Кубарьков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУВПО "Самарский государственный технический университет", Самара, Россия  
E-mail: tsara.cuba@yandex.ru

*Аннотация* - 21 век характеризуется глобальной тенденцией к увеличению концентрации населения в относительно небольшом пространстве крупных городов. Это приводит к новым подходам к планированию, проектированию, финансированию, строительству, управлению и эксплуатации объектов городской инфраструктуры и услуг, которые в широком смысле называются умным городом. Электроэнергия является критически важной инфраструктурой, лежащей в основе всех других важнейших объектов. Сбои в системе электроснабжения имеют серьезные экономические и социальные последствия, даже в течение коротких периодов времени. Проектирование интеллектуальных систем управления имеет важное значение для повышения производительности сети в экстремальных условиях. Целью данной работы является разработка требований и условий для базовой электрической и информационной инфраструктуры для городских объектов.

*Ключевые слова:* умный город, безопасность питания, моделирование системы электроснабжения, интеллектуальное управление, системы управления зданиями.

## Intelligent city - create a platform for analysis of the interaction energy infrastructure

I.D. Kubarkov<sup>1</sup>, A.S. Blinov, Y.P. Kubarkov<sup>1</sup>

1FGBO UVPO "Samara State Technical University", Samara, Russia  
E-mail: tsara.cuba@yandex.ru

*Abstract* - The 21st century is characterized by a global trend towards an increase in population concentration in the relatively small space of large cities. This leads to new approaches to the planning, design, financing, construction, management and operation of urban infrastructure and services, which in a broad sense are called smart cities. Electricity is a critical infrastructure that underlies all other critical facilities. Failures in the power supply system have serious economic and social consequences, even for short periods of time. Designing intelligent control systems is important for increasing network performance in extreme conditions. The purpose of this work is the development of requirements and conditions for basic electric and information infrastructure for urban facilities.

*Keywords* - smart city, the security of supply, modeling of power systems, intelligent control, building management systems.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Операторы распределительных городских электрических сетей современных мегаполисов постоянно сталкиваются с возрастающими требованиями к качеству электроэнергии и надежности поставки. Чтобы удовлетворить этим требованиям, операторам необходимо своевременно внедрять автоматизацию системы управления всей сети.

#### Интеллектуальная технология для умных городов

Сегодня в городах проживает более 50 процентов населения мира и к 2050 году предполагается, что в городах будет проживать 2,9 миллиарда человек. Эти города нуждаются в новой и интеллектуальной инфраструктуре для удовлетворения потребностей своих жителей и предприятий [1].

Эффективным способом достижения этих целей в городах является использование технологий для более разумного мониторинга, оптимизации и контроля

ключевых систем и инфраструктуры. Другими словами, ориентироваться на создание системы «умный город».

Современные энергокомпании предлагают продукты и решения для энергетики и автоматизации по всей цепочке классов напряжения и стоимости. Они включают в себя поддержку основных городских служб надежной связью с высокой пропускной способностью, что позволит коммунальным предприятиям предоставлять своим клиентам надежные услуги в области электроснабжения, водоснабжения, отопления и т.д..

Для примера решения АВВ для развитой городской инфраструктуры показаны на Рис. 1.

### II. ПРЕИМУЩЕСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДЕ

#### Высокая надежность поставок электроэнергии

Основное внимание при автоматизации распределительной сети уделяется предотвращению перерывов в энергоснабжении. Можно обнаружить проблемы до того, как они вызовут прерывания, путем

проведения непрерывных измерений или другого мониторинга во всей распределительной сети. Если возникает ошибка, ее можно быстро исправить и восстановить источник питания, используя систему дистанционного управления для быстрой реконфигурации сети.

### Эксплуатационная эффективность

Эффективное использование сети обеспечивается за счет включения всего основного оборудования в систему SCADA / Distribution Management System (DMS). Это гарантирует сохранение режима в реальном времени с помощью системы мониторинга, управления и связи.

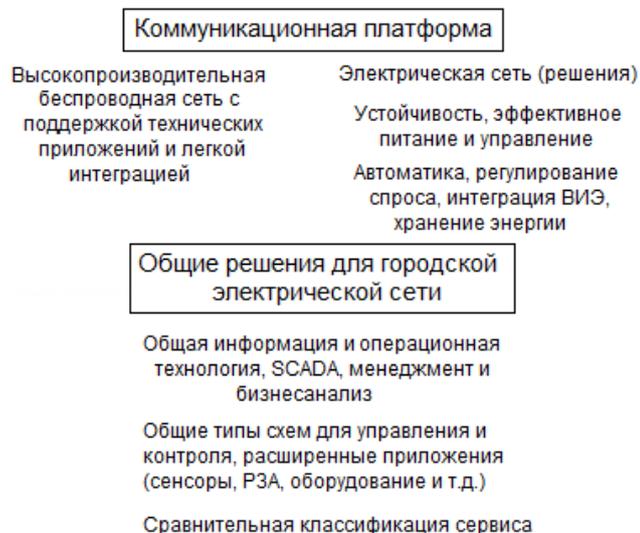


Рис.1. Решения АВВ для городской инфраструктуры

Ситуации с нарушениями могут быть эффективно разрешены с помощью точного определения места повреждения и функций DMS.

### Поддержка ограничения выбросов

Удаленный доступ ко всей распределительной сети исключает длинные перемещения аварийных бригад, что снижает расход топлива и, следовательно, снижает выбросы парниковых газов.

### Короткое время окупаемости инвестиций

Инвестиции в распределительную сеть (РЭС) Smart City оказывают значительное влияние и определяют прямую экономию средств в результате меньшего количества перерывов электроснабжения и более эффективную ее работу. Это приводит к сокращению времени окупаемости инвестиций. Улучшенное управление активами с использованием функций мониторинга состояния оборудования дополнительно повышает преимущества внедрения интеллектуальных решений.

### Адаптация к изменениям в окружающей среде

РЭС Smart City развивается в соответствии с требованиями, предлагая решения как на сегодняшний день, так и на будущее. Инвестиции в интеллектуальную сеть можно делать поэтапно (Рис.2, уровни 1-4) и

направлять на действия, которые являются наиболее важными для потребителей. Поэтапное непрерывное совершенствование и создание долгосрочных программ способствуют повышению эффективности и надежности сети. Концепция такого развития адаптируется к ситуациям, когда существуют различные требования к производству электроэнергии или когда к сети подключаются новые значительные потребители энергии.

Селективная защита (4)				Защита СВ с удаленным контролем входящих и отходящих ЛЭП
Управление потоком мощности (3)			Управление Точность СН измерения	
Нарушения изоляции (2)		Контроль СН коммутаторы НН коммутаторы		
Ситуационные знания (1)	Мониторинг СН мониторинг НН измерения			
Достоверные существующие узлы	Пакетное решение – комбинация первичного оборудования и автоматики в полностью достоверных узлах			

Рис.2. Уровни инвестиций в интеллектуальную сеть

### Концепция распределения энергии для Smart City

Концепция распределения энергии с интеллектуальными решениями для оборудования, как правило, разрабатывается для требовательной городской системы распределения электроэнергии. Непрерывное распределение электроэнергии требуется не только для обеспечения нормальной жизни и условий ведения бизнеса, но и для обеспечения доступности электроэнергии для аварийных служб. Чтобы обеспечить бесперебойное распределение мощности в критических узлах, таких как коммерческие центры, необходимо получать ранние предупреждения о предварительном отказе и определить участки сети, по которым могут быть организованы альтернативные маршруты поставок. В чрезвычайных ситуациях важно иметь быструю и точную локализацию неисправностей, устранение неисправностей и восстановление питания посредством удаленной реконфигурации сети [2]. Кроме того, возникающие потребности в энергосбережении, реагирование на спрос, интеграция распределенной генерации и поддержка зарядки электрических транспортных средств должны выполняться с информацией о сетях в режиме реального времени.

Концепция распределенной сети Smart City должна:

- Отвечать общим потребностям распределения электроэнергии в городах, но позволять поэтапно, с учетом ситуаций, реализовать наиболее приемлемое решение.
- Опирается на согласованный диапазон первичного и вторичного оборудования компаний-поставщиков.

- Опирайтесь на стандарты, которые позволяют интегрироваться в существующие системы, а также обеспечивать адаптивность, поскольку есть новые разработки и изменения потребностей.

#### **Раннее выявление возникающих неисправностей**

Когда можно выявить возникающие ошибки на ранней стадии и обнаружить оборудование, работающее близко к его границам оптимальности, необходимо перенаправить источник питания, прежде чем потребители будут испытывать перерыв питания. Как правило, обнаружение мест замыкания на землю достигается с помощью современных алгоритмов.

В городских условиях, с обширными и стареющими кабельными сетями, важно постоянно следить за состоянием кабелей.

С помощью компенсации токов замыкания на землю возможно допустить работу сети с однофазным замыканием на землю в течение ограниченного времени, что обеспечит паузу для организации альтернативного источника питания, прежде чем отсоединить и отремонтировать неисправную секцию.

#### **Мониторинг состояния оборудования с точки зрения безопасности оборудования, позволяет проводить активные действия и повышает надежность.**

Данные мониторинга состояния оборудования узлов сети (например, трансформаторов, кабелей и т.д.) могут собираться и анализироваться в центральной системе управления. Исходя из этих результатов, могут быть начаты действия по техническому обслуживанию по ликвидации непредвиденных перерывов электроснабжения.

#### **Безопасная и надежная связь**

Для оптимального решения требуются универсальные возможности обмена данными и передачи данных, которые обеспечивают надежную и быструю связь.

Для существующих сетей самым простым и наиболее осуществимым методом часто является использование общедоступных решений для беспроводной связи.

Чтобы устранить опасность внешнего несанкционированного доступа, все коммуникационные решения используют технологию IP. Кроме того, коммуникационные решения имеют встроенный и непрерывный сквозной контроль. Система дополнительно защищена всесторонним мониторингом, включая контроль доступа для вторичных подстанций.

### **III. ГИБКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДИСТРИБУТИВНЫХ РЕШЕНИЙ**

#### **Приоритет и уровень автоматизации для каждого раздела**

Уровень и порядок развертывания интеллектуальных распределенных решений, как правило, различаются по-разному в разных частях сети, поскольку критичность предложения, вероятность сбоев и необходимость дистанционного управления различаются.

В большинстве случаев предлагается гибкий подход для удовлетворения этого требования.

Доступные интеллектуальные распределительные решения сгруппированы на основе их возможностей на четыре уровня:

(1) ситуационная осведомленность,

(2) устранение неисправностей и восстановление мощности,

(3) управление потоком мощности и

(4) селективность защиты.

В большинстве автоматизированных энергосетей одновременно существует комбинация всех четырех уровней [3].

#### **Уровень 1: Ситуационная осведомленность**

На уровне 1 необходимо контролировать сеть. Мониторинг обеспечивается с помощью дистанционно доступных индикаторов прохождения прохода в основных блоках. Кроме того, вторичные подстанции могут также быть снабжены функциями измерения НН, поскольку важнейшим аспектом здесь является контроль загрузки трансформатора и возможные ненормальные условия обслуживания для предотвращения разрушения оборудования.

Как правило, контрольное оборудование уровня 1 обеспечивает локализацию неисправностей и, в некоторых случаях, также информацию мониторинга состояния. Локализация неисправностей используется для очистки пост-сбоев, тогда как информация мониторинга состояния может использоваться для активной ликвидации нарушений питания.

#### **Уровень 2: Изоляция ошибок**

На уровне 2 доступна возможность устранения сбоев. Устройства на узлах СН оснащены моторизованными дистанционно управляемыми переключателями СН. Эти переключатели позволяют действовать на основании полученной информации мониторинга и предоставлять средства для устранения неисправностей, реконфигурации сети и восстановления источника питания удаленно.

#### **Уровень 3: Управление потоком энергии**

На уровне 3 добавляется управление потоком мощности. Устройства на узлах СН позволяют проводить измерения, что позволяет активно контролировать и управлять потоком мощности. Это особенно важно в сетях, где распределенная генерация, энергия

Хранения и специальной зарядки электрических транспортных средств.

Без надлежащего управления потоком мощности, вероятно, возникает ситуация перегрузки и последующие прерывания. Управление потоком мощности также облегчает минимизацию потерь мощности.

#### **Уровень 4: Селективность защиты**

На уровне 4 добавляется селективность защиты. Оборудование на центральных узлах СН подключается к автоматическим выключателям (СВ) и защитным устройствам, которые обеспечивают распределенное, быстрое и выборочное отключение поврежденных участков сети.

Центральная система управления и защита при поставке станций ВН / СН не требуется. Когда защитные устройства включают функции мониторинга состояния для обнаружения извергающихся неисправностей,

возможно - уже заранее - перенастроить сеть и изолировать проблемную секцию без прерывания электроснабжения.

#### IV. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ SMART CITY

Городская система распределения электроэнергии должна быть оптимальной независимо от ее размера и возраста. Решения объединяют разумную топологию первичной сети, соответствующее основное оборудование и интеллектуальную защиту, а также функции управления и автоматизации в один оптимальный функциональный объект.

Гибкость решений для интеллектуального управления делает их доступными как для новых, так и для существующих установок.

Первичные подстанции ВН / СН.

В зависимости от плотности населения и доступности пространства технология подстанции ВН / СН может варьироваться от подстанций с воздушной изоляцией до подстанций с подземной газовой изоляцией.

Вторичные подстанции (в зданиях).

Большие здания, предназначенные для коммерческих, промышленных или жилых помещений, обычно имеют в своих помещениях отдельную вторичную подстанцию СН / НН.

Внутри этих вторичных подстанций чрезвычайно важна способность вторичной технологии. Эти места потребления все чаще снабжаются функциями энергосбережения. Таким образом, необходимыми являются информационные и управляющие возможности интеллектуальных распределительных решений.

Вторичная технология этих подстанций очень важна для контроля качества поставляемого напряжения.

Микрогенерация также растет, то есть развивается мелкомасштабное производство тепла и электроэнергии отдельными лицами и малыми предприятиями. Таким образом, возможность измерять и обрабатывать потоки энергии также становится обязательной.

#### Центр управления

Для городского распределения электроэнергии важны возможности центра управления. Интеллектуальные перспективные решения могут, как таковые, интегрироваться в существующий центр управления.

#### Система хранения энергии батарей (BESS)

Потребность в распределенных системах хранения энергии в сетях стала реальностью, поскольку необходимо обеспечить непрерывность электропитания и обеспечить устойчивость при повышении мощности в сети.

Пики нестабильности вызваны неплановыми реверсивными перетоками мощности, колебаниями потребления и прерывистой генерацией. ABB предлагает ряд BESS, которые могут быть оснащены необходимой технологией. Для правильной работы в распределительной сети работа BESS координируется с работой других элементов в системе распределения электроэнергии.

#### V. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

Интеллектуальные перспективные решения построены на интеллектуальных продуктах для защиты и контроля, мониторинга, измерения и связи. Существуют решения для городских, сельских и смешанных сетей распределения электроэнергии. Решения могут быть применены к новым распределительным устройствам, кольцевым и радиальным схемам, секционному выключателям или выключателям нагрузки на полюсах. Эти решения используются как экономически обоснованные обновления существующих установок.

Шкафы интеллектуального управления выполнены на стандартизированных блоках готовы к использованию в принятых решениях. Существуют варианты шкафов для воздушных линий и подземных кабельных сетей. Шкафы подходят для всех применений, начиная от мониторинга и управления решениями для более сложных решений с точными измерениями и функциями защиты.

Комплексный набор оборудования для защиты и контроля позволяет проводить точные измерения, которые обеспечивают масштабируемые функции мониторинга, управления и защиты. Стандартные решения включают безопасную связь, централизованный надзор и управление учетными записями пользователей в экономически эффективных сетях общего пользования [4].

#### Управление жизненным циклом оборудования

Жизненный цикл решений и оборудования, включенного в сети, начинается со спецификаций и дизайна, за которыми следуют изготовление, монтаж и ввод в эксплуатацию. Чтобы получить лучший результат, важно, чтобы это было сделано в соответствии с проверенными процессами и применяли самые надежные стандарты качества. Кроме того, управление жизненным циклом также включает в себя техническое обслуживание, запасные части, расширение и модернизацию, а также услуги в конце срока службы.

#### VI. ВЫВОДЫ

Автоматизация распределительных сетей является ключевым фактором и является необходимым условием для создания интеллектуальных городских сетей будущего.

#### Список литературы

- [1] Paulker, S.G., Zane, E.M. and Salem, D. M., Creating A Safer Healthcare System: Finding the Constraint, JAMA, vol. 294, no. 22, pp. 2906-2908, 2005.
- [2] Z. Morvaj, L. Lugaric, B. Morvaj, "Smart cities, buildings and distribution networks - perspectives and significance for sustainable energy supply", presented at 2nd Croatia CIRED Conference, Umag, Croatia, 2010.
- [3] The European Electricity Grid Initiative (EEGI) Roadmap 2010-18 and Detailed Implementation Plan 2010-12, Brussels, May 25, 2010.
- [4] A. Moderink et al., "Simulating the effect on the energy efficiency of smart grid technologies", in Proc. 2009 Winter Simulation Conference, pp 1530-1541.

# Влияние низких температур на показатели энергоэффективности ВЭУ в составе ветро-дизельного комплекса

Г.В. Дерюгина, Н.Д. Карпов, Д.А. Чернов  
ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"  
Москва, Россия  
karpovnickita@gmail.com

*Аннотация* — На сегодняшний день вопросы проектирования и эксплуатации ветро-дизельных комплексов (ВДК) для условий России мало изучены и практически не исследованы, поскольку только в последние годы было осуществлено строительство нескольких таких ВДК, по которым имеется малый опыт их эксплуатации. На ранних стадиях проектирования различные виды потерь (таких как, потери на гистерезис, обледенение и т.п.) принимаются постоянными в виде некоторого процента от годовой выработки ветроэлектрической станции (ВЭС). Величина этих потерь существенно зависит от температурных условий и ветрового режима, не учет которых может привести к существенным расхождениям проектных и эксплуатационных показателей энергетической эффективности ВДК. Оценить влияние низких температур на показатели энергоэффективности ВЭС можно только при наличии фактических данных наблюдений за скоростью ветра, выработкой и температурой. В данной работе эти исследования проводятся по фактическим данным действующего ВДК в поселке Усть-Камчатск (Камчатский край).

*Ключевые слова* — ветроэлектрическая станция, ветродизельный комплекс, энергоэффективность, обледенение

## Influence of low temperatures on energy efficiency indicators of wind turbines in the wind-diesel complex

G.V. Deryugina, N.D. Karpov, D.A. Chernov  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Moscow, Russian Federation  
karpovnickita@gmail.com

*Abstract* — To date, the design and operation of wind-diesel complexes (WDC) under Russian conditions have been little studied and practically not investigated, since only in recent years such WDC have been built, for which there is poor experience in their operation. At preliminary stages of designing, various types of losses (such as hysteresis, icing, etc.) are assumed to be constant as a percentage of the annual output of wind farm. These losses essentially depends on the temperature conditions and the wind regime, which, if not taken into account, can lead to significant discrepancies between the design and operational parameters of WDC energy efficiency. Evaluate the impact of low temperatures on the energy efficiency indicators of wind farms can only if actual monitoring data for wind speed, temperature and energy output are available. In this paper, these studies are conducted with using of actual data of the operating WDC in Ust-Kamchatsk settlement (Kamchatka Krai).

*Keywords* — wind power station, wind farm, wind-diesel complex, energy efficiency, icing, cold climate operation

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. в п. Усть-Камчатск была введена вторая очередь ветроэлектрических установок (ВЭУ), состоящая из 3-х ВЭУ фирмы Komai (единичная установленная мощность ВЭУ 300 кВт, диаметр рабочего колеса  $D_{рк} = 33$  м, высота башни  $H_б = 41,5$  м), имеющих систему защиты от обледенения лопастей ВЭУ. Следует отметить особенность системы управления данными ВЭУ, что при

температуре воздуха ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  автоматика выводит ВЭУ из работы по соображениям безопасности их работы.

В период наблюдений входили интервалы времени, когда выдача мощности ВЭС ограничивается диспетчерской службой локальной энергосистемы. Для получения характеристик потерь от обледенения необходимо располагать наблюдениями ВЭС при полном отсутствии систем защиты от обледенения. Ввиду отсутствия таких данных в работе проанализировано влияние температуры на вид мощностной характеристики

и значение расчетной скорости ветра, а также проведена приближенная оценка аэродинамических потерь в ветроколесе (ВК) ВЭУ.

## II. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ВЕТРОКОЛЕСЕ ВЭУ

Оценка аэродинамических потерь в ВК производилась сравнением паспортной мощностной характеристики ВЭУ фирмы Komai с модельной энергетической характеристикой, полученной по фактическим измерениям на гондоле ВЭУ с февраля по октябрь 2016 г. (см. рис. 1 и табл. I).

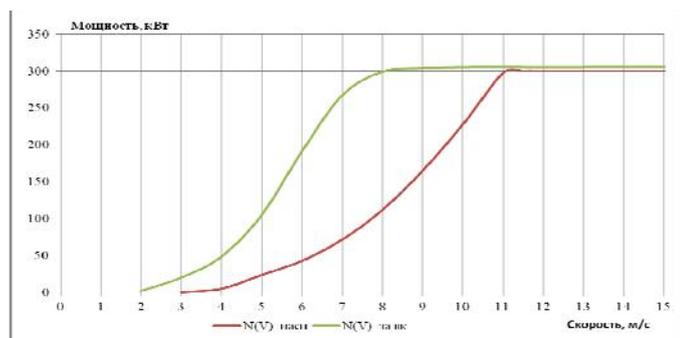


Рис. 1. Паспортная и смоделированная за ВК мощностные характеристики ВЭУ фирмы Komai

Таблица I. ПОТЕРИ СКОРОСТИ ВЕТРА В ВЕТРОКОЛЕСЕ

Мощность, кВт	Скорость ветра по пасп. мощн. хар-ке, м/с	Скорость ветра по смод. мощн. хар-ке, м/с	Потери скорости ветра, %
50	6.15	3.82	37.89
100	7.69	4.91	36.15
150	8.71	5.52	36.57
200	9.55	6.12	35.92
250	10.31	6.78	34.27
300	11.50	8.25	28.28

В результате расчетов было получено, что аэродинамические потери в ВК составляет от 28 до 37%.

## III. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ВИД МОЩНОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Анализ влияния низких температур на вид мощностной характеристики и значение расчетной скорости ветра ( $V_p$ ) проводится по модельным энергетическим характеристикам ВЭУ фирмы Komai, полученных для стандартной температуры (15 °C), 0 °C, -10 °C (см. рис. 2). Сравнение проводилось в виде относительного отклонения расчетной скорости ветра при низких температурах от расчетной скорости ветра при нормальной стандартной температуре воздуха [1].

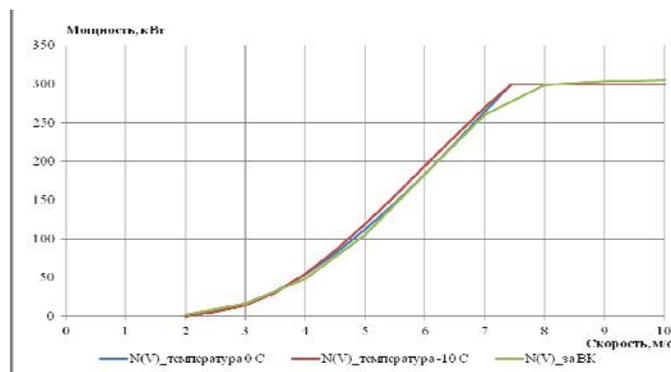


Рис. 2. Зависимость плотности воздуха и скорости ветра за ВК от температуры воздуха

Также были определены значения средней рабочей мощности ВЭС, соответствующие диапазону скорости ветра от 6 до 7 м/с. Анализ полученных результатов (см. табл. II) выявил, что с понижением температуры происходит увеличение плотности воздуха и снижение расчетной скорости ветра по линейному закону (см. рис. 3).

Таблица II. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ВЕЛИЧИНУ РАСЧЕТНОЙ СКОРОСТИ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ ВЭУ

Параметр	Для норм. условий, T = 15 °C	Температура T= 0 °C	Температура T= -10 °C
Плотность воздуха, кг/м <sup>3</sup>	1.226	1.292	1.341
Расчетная скорость, м/с	8.14	8	7.9
Относ. откл., %	-	-1.76	-3.05
Средняя мощность при 6<V<7м/с, кВт	209.9	223.5	235.1
Относ. откл., %	-	-6.5	-12

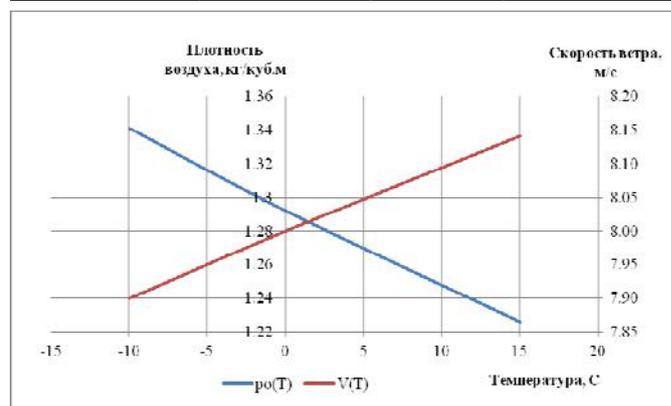


Рис. 3. Зависимость плотности воздуха и скорости ветра за ВК от температуры воздуха

## Список литературы

- [1] Ветроэнергетика: учебное пособие / А.Г. Васьков [и др.]. - М.: Издательство МЭИ, 2016. - 384 с.

# Зарубежный опыт энергоснабжения субарктических территорий

Ю.В. Жилкина,  
ПАО «ФСК ЕЭС» Москва, Россия  
E-mail: [zhilkina.yulia@gmail.com](mailto:zhilkina.yulia@gmail.com)

*Аннотация* — Технологии возобновляемой энергетики позволяют обеспечить децентрализованное энергоснабжение при снижении вредных воздействий на окружающую среду. Указанные особенности определяют привлекательность возобновляемых источников для субполярных территорий с хрупкостью их экосистем и высокой долей изолированных потребителей. Из-за организационных и технических трудностей целесообразность широкого внедрения возобновляемых источников в северных регионах до сих пор остается под вопросом.

В работе рассмотрена история развития энергосистем в субполярных регионах мира (Аляска, северные провинции Канады, Гренландия, Исландия, Скандинавские страны) и проведено их сопоставление по природно-климатическим условиям с арктическими регионами России. На основе данных национальных статистических ведомств выполнен анализ сложившейся структуры энергоснабжения. Определены основные технологии, используемые для электро- и теплоснабжения, выявлены основные проблемы развития энергосистем, показана связь этих трудностей с природно-климатическими и социально-экономическими условиями.

*Ключевые слова* — децентрализованное энергоснабжение; возобновляемые источники; энергосистемы

## Trends of energy supply and demand on subarctic areas

candidate of economic sciences Y.V. Zhilkina  
JSC FGC UES  
Moscow, Russia  
[zhilkina.yulia@gmail.com](mailto:zhilkina.yulia@gmail.com)

*Abstract* — Technologies of renewable power may be effectively used for decentralized power supply with minimizing impacts on the environment. Due to that fact renewable power sources are very attractive for applications on ecologically fragile subarctic areas with a high rate of remote consumers. Nevertheless, suitability of renewable power for applications in subarctic regions is still under discussions due to numerous technical challenges. Analysis of power and heating supply statistics was done for subarctic regions (Alaska, Northern Canada, Greenland, Iceland, and Scandinavia). History of energy systems was considered for the regions of interest. Comparison of natural and climatic conditions was done between the considered regions and Russian Arctic territory during the last century. The main challenges for subarctic energy systems development were identified. Connection was found between these challenges and natural, climatic and socio-economic conditions in the regions. Analysis of development dynamics of the energy systems was done. Main technologies being implemented currently for heat and power supply in north regions were specified.

*Keywords* — decentralized power supply, renewable power sources, energy systems

I.

ВВЕДЕНИЕ

II.

ЕВРОПА

Проблемы устойчивого развития экономических систем на уровне отдельных предприятий, так и целых регионов являются сегодня острой темой обсуждения специалистов разных уровней. Одним из направлений решения является внедрение энергосберегающих технологий как повышение эффективности использования производственных ресурсов. Под энергосбережением можно понимать деятельность, которая направлена на эффективное удовлетворение потребности общества в энергетических услугах. Технологии энергоснабжения непрерывно совершенствуются, обеспечивая развитие цивилизации на протяжении всей истории человечества [1]. В последние десятилетия в обществе резко возрос интерес к возобновляемой энергетике.

Субарктические территории с большим количеством изолированных потребителей представляют собой идеальный полигон для демонстрации потенциала возобновляемой энергетики.

### A. Гренландия

Гренландия отличается исключительно суровыми природными условиями: большая часть ее территории покрыта мощным материковым льдом; свободна ото льда узкая полоса на юго-западе Гренландии, еще более узкая на юго-востоке и более значительная на севере. Северное побережье отличается низкими температурами, сопоставимыми с температурой на севере Якутии [2].

Централизованного энергоснабжения на острове нет, каждый населенный пункт обеспечивает выработку электричества самостоятельно. До начала 1990-х годов вся электроэнергия на острове производилась дизель-генераторами из привозного топлива. В следующие десятилетия началось активное использование местных ветро- и гидроресурсов, что в последние годы позволило обеспечить выработку примерно 70% электроэнергии из возобновляемых ресурсов.

Сейчас в Гренландии работают пять ГЭС мощностью от 1.4 до 45 МВт, в том числе ГЭС в Иллулисат — единственная в мире подземная гидроэлектростанция, построенная в зоне вечной мерзлоты. Станция расположена в изолированном фьорде, в 45 км от города Иллулисат; ее работа полностью автоматизирована. Гидроэлектростанции на сегодняшний день вырабатывают в Гренландии более 70% электроэнергии.

### *В. Норвегия*

Арктическая территория Норвегии включает в себя три губернии - Нурланн, Тромс и Финнмарк на материке, а также архипелаг Шпицберген и остров Ян-Майен. В совокупности эти районы составляют почти половину сухопутной территории Норвегии с населением 470.000 человек, или около одной десятой от общего населения страны. Морские районы Норвегии в Арктике составляют примерно 1.500.000 кв.км., что соответствует территории Франции, Германии и Испании, взятых вместе.

Благодаря тёплому течению Гольфстрим Северная Норвегия является гораздо более гостеприимным районом, чем какой-либо другой на этой широте. Крупнейшим городом Северной Норвегии является Тромсё, который часто называют "воротами в Арктику". В Тромсё расположен самый северный в мире университет, а также Центр научных исследований экологии и климата Крайнего Севера "Фрам", в котором работают 500 учёных из 20 различных научных учреждений и проводят естественно-научные, технические и общественные исследования. Другими важными городами Северной Норвегии являются Будё, Харстад, Нарвик, Алта, Хаммерфест и Киркенес.

Традиционно население Северной Норвегии существовало за счёт рыболовства и оленеводства. Эти отрасли хозяйства сохранили своё важное значение, однако сегодня экономика Северной Норвегии стала более диверсифицированной. Промышленное разведение рыбы связано с традиционным историческим промыслом и демонстрирует потенциал производства продуктов питания для всё возрастающего населения мира. В г.Хаммерфесте компания "Статойл" ведёт сжижение природного газа, добытого на месторождении "Белоснежка" в Баренцевом море. Южнее, в г.Нарвике, ведётся отгрузка на экспорт для перевозки морским транспортом железной руды, добытой в Швеции. Арктический регион также привлекает растущее число туристов, приезжающих, чтобы насладиться впечатляющими пейзажами и практически нетронутой природой страны.

Арктический архипелаг Шпицберген расположен посередине между континентальной Норвегией и Северным полюсом. Примерно половина поверхности архипелага покрыта льдом. Крупнейшим островом Архипелага является о.Шпицберген, и до 1925 г. весь архипелаг носил в Норвегии название Шпицберген. На острове расположен административный центр архипелага - посёлок Лонгйир, а также незаселённые территории. Основными отраслями хозяйства на Шпицбергене сегодня являются добыча угля, туризм и научные исследования.

### *С. Финляндия*

Структура производства электроэнергии в Финляндии достаточно сбалансирована: примерно по одной трети

общей выработки обеспечивается каждым из источников: атомными электрическими станциями (АЭС), теплоэлектроцентралями (ТЭЦ) на привозном ископаемом топливе (угле и природном газе) и возобновляемой энергетикой (ГЭС и электростанциями на биотопливе).

На природном газе работают только электростанции в южных областях Финляндии, где есть газовая сеть. Чтобы повысить эффективность использования газа, широко применяются технологии когенерации: более половины используемого природного газа сжигается на ТЭЦ. Стратегия развития финской энергетики предусматривает постепенное замещение природного газа биогазом. В марте 2013 года в городе Вааса открылась крупнейшая в мире ТЭЦ на биогазе. Станция мощностью 140 МВт работает на древесных отходах.

В северных и центральных областях Финляндии тепловые электростанции работают на биомассе, древесине и торфе. Торф, как правило, используется недалеко от торфоразработок: из-за высокой влажности и низкой теплоты сгорания перевозить его на большие расстояния невыгодно. Часто торф сжигается вместе с биомассой или древесиной, что позволяет оптимизировать процесс горения и снизить выбросы оксидов серы.

Более 70% тепла в системах централизованного теплоснабжения вырабатывается по когенерационному циклу. Энергетические установки, как правило, могут использовать несколько видов топлива, что позволяет повысить надежность теплоснабжения. Существенную роль играет использование для теплоснабжения возобновляемых источников энергии: древесных отходов и биомассы.

## III.

## СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА

### *А. Канада*

Канада является второй по величине арктической державой после России. Северные регионы Канады – Юкон, Северо-Западные территории и Нунавут – составляют почти 40% территории страны и по размерам сопоставимы с таким государством, как Индия. Так же как и российский Север, эти регионы богаты полезными ископаемыми, но в силу сурового климата остаются труднодоступными и относительно малонаселенными.

Канада – северное государство. Север является основой нашего национального наследия и самосознания, его освоение жизненно необходимо для нашего будущего», – говорится в подготовленной правительством страны «Северной стратегии». Ежегодно увеличивается финансирование северных территорий.

В 2007 году правительства Юкона, Северо-Западных территорий и Нунавута разработали и утвердили совместную концепцию развития, которая уделяет особое внимание увеличению доли возобновляемой энергетики в этих регионах. «Зависимость от импортного ископаемого топлива ставит нас в невыгодное экономическое положение, все три территории уязвимы перед высокой стоимостью, резкими колебаниями цен и перебоями со снабжением», – указывают авторы концепции. Они обращают внимание и на экологический аспект проблемы, так как сжигание углеводородов ведет к выбросу в атмосферу парниковых газов. В рамках этой политики Юкон, Северо-Западные территории и Нунавут уже

разработали и реализуют планы, направленные на повышение энергоэффективности своих энергосистем и развитие возобновляемых источников – использование энергии воды, солнца, ветра, геотермальных источников.

Гидрогенерация на севере Канады исторически развивалась благодаря федеральным инвестициям и в привязке к проектам по добыче полезных ископаемых. По официальным данным, в Юконе на долю гидрогенерации приходится почти 67%, или 76 МВт, установленной электрической мощности, а на Северо-Западных территориях – порядка 30%, или 54 МВт. В основном это небольшие ГЭС, построенные в середине XX века. Самой крупной из них является ГЭС города Уайтхорс (Юкон) мощностью 40 МВт. Большинство населенных пунктов, снабжаемых от ГЭС, сохраняют дизельные установки в качестве резервных источников энергоснабжения.

Наиболее крупным проектом по развитию гидрогенерации на Канадском Севере стала установка третьего генератора мощностью 7 МВт на ГЭС озера Эйшихик (Юкон). Она была завершена в 2012 году и обошлась в \$13,8 млн при начальной цене проекта \$8,8 млн, что вызвало критику в местной прессе из-за роста конечного тарифа для потребителей.

Годом ранее из экономических соображений и из-за нехватки потребителей был приостановлен крупный проект по расширению ГЭС на реке Талстон (Северо-Западные территории). Несмотря на это, канадцы в целом оптимистично оценивают будущее развития ГЭС на Севере. Энергетики Северо-Западных территорий даже подсчитали, что общий потенциал развития гидрогенерации только в их регионе достигает 11,5 тыс. МВт. При этом в ближайшем будущем прирост будет происходить, скорее всего, за счет мини-ГЭС мощностью менее 1 МВт.

Другим перспективным направлением представляется использование солнечной энергии. Канадский опыт показывает, что на Севере наиболее успешно работают гибридные системы, состоящие из фотоэлектрических панелей с аккумуляторами и небольших газовых или дизельных генераторов. Таким образом, солнечные батареи позволяют сократить количество потребляемого обычными генераторами топлива. Основным ограничением для применения данной технологии на Севере является ее сезонность. Зимой, в условиях полярной ночи и пикового спроса на электричество, солнечная энергия практически недоступна. До недавнего времени более широкому распространению солнечных батарей мешала также высокая стоимость мощности по сравнению с дизельными установками. С развитием технологии снизились и мировые цены, поэтому северные территории Канады активно планируют развитие в этой области.

Крупнейшим проектом солнечной энергетики на Канадском Севере стала установка системы из 258 фотоэлектрических панелей общей мощностью 60,6 кВт в городе Форт-Симпсон, расположенном чуть севернее 61-й параллели. Проект стоимостью \$760 тыс. был завершен в феврале 2012 года.

### *В. Аляска*

Самый северный штат США – Аляска – находится в сходных с северной Канадой климатических условиях,

поэтому его энергетика во многом похожа на энергосистемы канадских соседей. За исключением городов, подключенных к региональной энергосистеме «Рейлбелт» вдоль железной дороги, большинство населенных пунктов Аляски изолированы от крупных электросетей. Удаленные поселения, как и на севере Канады, используют дизельные генераторы. Зимой топливо хранится в цистернах или в крайнем случае доставляется авиатранспортом. Статистика 2015 года свидетельствует, что больше всего электроэнергии – 303 ГВт/ч – вырабатывается на Аляске с использованием природного газа, на долю гидроэнергетики приходится 102 ГВт/ч, за ней следуют мазут и уголь – примерно по 50 ГВт/ч. Замыкают список возобновляемые источники (помимо ГЭС), которые дают 8 ГВт/ч электроэнергии.

Недавно законодательное собрание штата приняло законы, согласно которым к 2025 году 50% электроэнергии Аляски должно вырабатываться на базе возобновляемых источников. В течение 10 лет за счет мероприятий по энергосбережению планируется сократить потребление электроэнергии на душу населения на 15%. В 2008 году штат создал специальный фонд, который выделяет \$50 млн в год на поддержку возобновляемой энергетики. Приоритет отдается проектам в районах с самой высокой стоимостью электричества и тепла.

Интересной особенностью возобновляемой энергетики Аляски является успешный, хотя и ограниченный опыт использования геотермальных источников. Алеутские острова и побережье Аляски входят в так называемое Тихоокеанское огненное кольцо, где расположено большинство действующих на Земле вулканов. Исследования подтвердили, что на территории штата находится несколько высокотемпературных гидротермальных систем, которые могут послужить нуждам энергетики. Сейчас с помощью геотермальных источников один из курортов не только привлекает туристов, но и обеспечивает отопление и энергоснабжение своих зданий. В разных городах также установлены несколько десятков геотермальных тепловых насосов, которые применяются для обогрева зданий.

Для отопления на Аляске используют не только тепло земли, но и биомассу – дерево, отходы рыбной и деревообрабатывающей промышленности, городские отходы. В последние годы из-за высоких цен на нефть использование дерева стало в США рентабельным не только для обогрева отдельных домохозяйств.

Использование фотоэлектрических батарей в коммунальной энергетике на Аляске пока считают нерентабельным в связи с небольшим количеством солнечных дней в году. С точки зрения энергетического управления Аляски, более перспективным направлением является использование солнечной энергии для обогрева воды. Пилотные проекты в этой области реализуются в городах Ном, Коцебу и МакКинли Вилледж.

Зато ветроэнергетика получила на Аляске широкое распространение и в списке возобновляемых источников энергии занимает второе место после гидрогенерации. Общая установленная мощность ветряков штата – от небольших ветрогенераторов, обеспечивающих электричеством отдельные дома, до турбин мощностью более 1 МВт – в 2012 году достигла 60 МВт. По

природным условиям для ветроэнергетики больше всего подходит западное побережье Аляски. В 2009 году в городе Кадьяк были установлены первые в штате турбины мощностью 1,5 МВт. Сейчас они обеспечивают до 9% его потребностей в электроэнергии. Тогда же ветропарк из 18 турбин появился в городе Ном. Самым крупным проектом по развитию ветроэнергетики на Аляске стало строительство парка из 11 турбин общей мощностью почти 17,6 МВт в районе города Анкоридж. Они подключены к региональной энергосистеме «Рейлбелт». Энергия ветра позволяет ежегодно экономить 500 млн куб. м природного газа; ее достаточно, чтобы обеспечить электричеством около 6 тыс. домов столицы штата.

#### IV. Россия

Энергетическая система Арктики характеризуется наличием множества обособленных энергоузлов, разрозненностью потребителей энергоресурсов и северным завозом органического топлива, ставшим одной из основных проблем населения и администраций арктических регионов. При доле населения арктических регионов менее 2% от общей численности населения России, доля их суммарного потребления электроэнергии составляет 3,6%. В то же время энергоемкость ВВП арктических территорий, рассчитанная как отношение потребленной электроэнергии к объему валового регионального продукта, ниже среднероссийского уровня: 0,028 против 0,032 кВт в час/руб. Но, несмотря на это, потребление первичных энергоресурсов на территории арктических регионов на единицу совокупного валового регионального продукта выше, чем в среднем по Российской Федерации [3].

Существующие виды энергоустановок малой мощности, которые могут рассматриваться для решения энергетических проблем и удовлетворения потребностям развития промышленности арктического региона, можно условно поделить на три группы: малые станции на органическом топливе (конденсационные электростанции (КЭС), тепло электростанции (ТЭЦ), дизельные электростанции), атомные станции малой мощности (АСММ), возобновляемые источники энергии (ветряные электростанции, солнечные электростанции, малые гидроэлектростанции и гибридные энергетические комплексы). При сравнении экономики станций в изолированных энергоузлах во главу ставится себестоимость вырабатываемой электроэнергии (удельные дисконтированные затраты), поскольку именно эта характеристика отражает насколько эффективно тот или иной энергоисточник может применяться в целевом

районе. Стоимость завозного органического топлива, используемая в при расчетах, выбрана равной минимальному уровню для целевых площадок и не учитывает стремительный рост цен на органическое топливо. Таким образом, одними из наиболее перспективных представителей класса энергоустановок малой мощности для арктического региона являются АСММ. Существующие проекты АСММ характеризуются высокой степенью адаптивности их технико-экономических и эксплуатационных характеристик для решения проблем развития малой энергетики, из которых стоит выделить возможность подземного и надводного размещения, а также широкий спектр мощностей существующих проектов АСММ: от нескольких единиц до сотен МВт. Среди основных конкурентных преимуществ АСММ можно выделить: возможность модульной компоновки электростанции, что позволяет создавать станции практически любой установленной мощности, длительная работа без перезагрузки топлива («ядерная батарейка»), транспортабельность, относительно низкая себестоимость вырабатываемой электроэнергии. Поэтому именно АСММ наряду с другими видами малой генерации должны стать основой для решения энергетических проблем арктических регионов и построения на территории России системы региональной малой энергетики

#### V. ВЫВОДЫ

Конечно, возобновляемая энергетика на Севере все еще нуждается в существенной правовой и финансовой поддержке со стороны местной и центральной власти. Проекты в области альтернативной энергетики также требуют сугубо индивидуального подхода, адаптации к нуждам и возможностям отдельных населенных пунктов вплоть до зданий. Такие источники могут быть рентабельными в районах с развитой инфраструктурой и гарантированным потреблением, а также в поселениях с высокими затратами на привозной мазут.

#### Список литературы /References

- [1] Klimenko, V.V., Klimenko, A. V., Tereshin, A. G. Test of Developing LongTerm Forecasts of World Energy Impact on the Earth's Atmosphere // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics – 2015. – Т. 51. – №2. – С. 138-147.
- [2] National Center for environmental information, 2015 URL: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov>
- [3] International Energy Agency URL:<http://www.iea.org>

# SYNCHRONOUS OPERATION OF A CUSTOMER'S ON-SITE GENERATOR UNDER THE CONDITION OF NO POWER OUTPUT. METHODS TO MEET THE CONDITION WHEN CONTINGENCIES OCCUR

A.S. Dmitrieva

System Operator of The United Power system of the Russian Federation

E-mail: [dasustu@gmail.com](mailto:dasustu@gmail.com)

**Abstract** — In recent years, there has been a clear tendency in development of distribution generation (built on a specific customer's side in order to meet their demands in electricity and electrical power) when a generation unit operates under two fundamental conditions: the first one is to stay synchronized with the United Energy system of the Russian Federation through the customer distribution electrical grid. The second one is to guarantee no power supplied beyond the customer distribution grid. Hence, we need to suggest a method which would be able to accomplish the last condition when a short-circuit occurs in the adjacent distribution grid and, as a result, a generation unit produces a short-circuit current flow into the faulted point. This problem is addressed with two approaches: the usage of emergency automation devices and a thyristor frequency converter. The advantages and disadvantages of each of them are studied, and the methods are compared to each other.

**Keywords** — *distributed generation, industrial customer, generator tripping, thyristor frequency converter.*

## I. DISTRIBUTED GENERATION AND THE GRID INTEGRATION ISSUES

The number of industrial customers who have installed generation units closed to their loads has increased in recent years. Motivated by a desire to reduce their electric bills, these customers have spurred a dramatic increase in the amount of distributed generation in the Russian Federation.

In the way the Russian power grid is currently managed, each industrial customer that wants to get an access to the transmission grids needs to sign a contract with an energy sales organization and becomes either the wholesale or retail electricity market participant.

If an industrial customer is registered as a buyer and decides to connect a generation unit to their own distribution grid that are not allowed to inject the power produced in the grid [1].

If the grid operates under the normal condition, this condition can be accomplished with the accurate balance between his load and the total output generation of his power station. On the other side, this condition is followed by a question: how to guarantee no power supplied if a contingency occurs in the grid and consequently a power plant starts to generate a short-current flow into the point where the it happened.

We are going to have a look how this problem can be addressed with two different methods. First of all, we introduce the first customer under study and then describe how he complies with the terms by means of emergency automation devices (involving the generator tripping following the disturbance). After that we introduce the second customer who connects his generator units with the grid through a thyristor frequency converter. Finally, we point out the characteristics of each of them.

## II. PROBLEM DEFINITION

As is well known, all generators produce the short-circuit current flow into the point where electric power system faults take place. On the other hand, we are obliged to guarantee no power supplied in the distribution grid in any time. Hence, we need to propose a method how to control power output during the contingencies.

### III. POSSIBLE WAYS TO FULLFILL THE CONDITION OF NOW POWER SUPPLIED TO THE DISTRIBUTION GRID

Here we consider two following options

- Rejection of generators following the disturbance with no time delay. This method is accomplished in TES Nevyansk.

- Usage of dual induction frequency converters as a connection between generators and the distribution grid. This option is used in TES Revda.

#### A. Rejection of generators in TES Nevyansk

The power station under study – TES Nevyansk – is depicted in Figure 1 TES Nevyansk is directly connected to the distribution network through the substation 110/35/10 kV NSHZ (from here on, we call it NSHZ).

TES Nevyansk consists of 3 (three) gas-fueled reciprocating engine-driven generation units, each of them includes a generator 8,73 MW 6,3 kV, 50 Hz.

NSHZ is a step-down substation with 2 (two) step-down transformers 110/35/6 kV capacity 40 MVA (T-1 and T-2), busbars 110 kV № 1 and № 2 and a busbar section circuit-breaker 110 kV (CB on Figure 1, normally being switched off). The power supply to T-1 is from the transmission line 110 kV NSHZ – VTGRES, to T-2 – from the transmission line 110 kV NSHZ – Chernostochinsk. CB is equipped with the automatic transfer device (ATS) which switches in CB in the case of no-voltage across the section, whatever the reason may

be. After that, if there is a short-circuit on 110 kV NSHZ – VTGRES (110 kV NSHZ – Chernostochinsk), the line fault protection relays (primary – differential (D in Figure 1) and backup – overcurrent (OC in Figure 1) installed on 110 kV NSHZ – VTGRES and 110 kV NSHZ – Chernostochinsk are brought into action and tripped the line circuit-breaker of the faulted line.

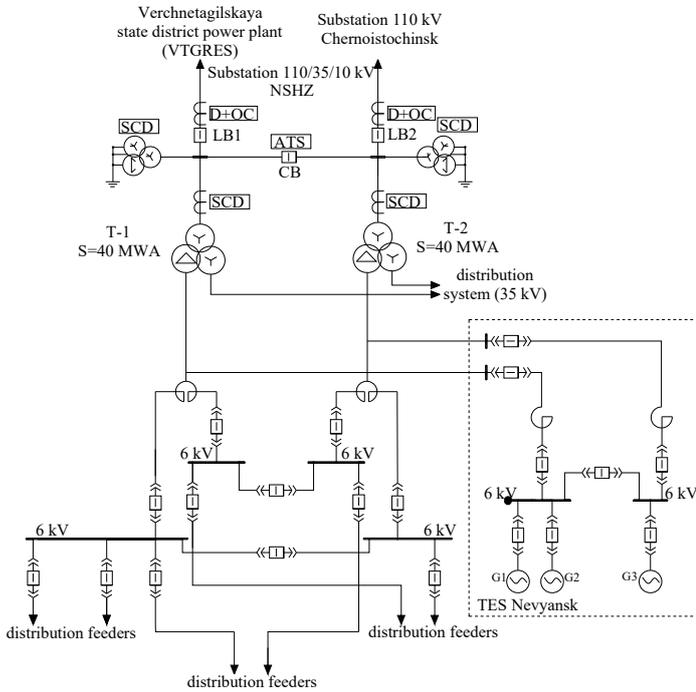


Figure 1. TES Nevyansk scheme.

In other words, in the way the power grid was managed before the installation and connection of TES Nevyansk, it could be taken as given that the electric power flows from the higher voltage grid 110 kV to the lower voltage grid 35 kV and 6 kV.

The problem is, in the situation described above, TES Nevyansk induces short-circuit current flows from the low voltage grid 6 kV into the high voltage grid 110 kV.

This bi-directional power flows asks for different protection schemes for the line fault protection relays (primary and backup) installed on 110 kV NSHZ – VTGRES and 110 kV NSHZ – Chernostochinsk.

The second problem is, under the busbar section circuit-breaker switched off, the current generated with TES Nevyansk does not allow to coordinate the protective relays installed on the transmission lines 110 kV NSHZ – VTGRES and 110 kV NSHZ – Chernostochinsk with adjacent protective relays assigned to these areas.

As a result, we need a device being able to detect abnormal conditions and trip the circuit breaker connecting the generation units with the switchgear. From now on, we call the device a short-circuit detector (SCD). Functionally, SCD is a directional-sensing overcurrent relay which indicates the direction of a current flow into the high voltage grid 110 kV. Also, SCD has a fault-sensing unit designed for detecting the zero-sequence voltage (in case of ground faults which have the highest percentage of occurrence; for three-phase faults no transition help is required because these faults are symmetrical; hence, there are no negative or zero sequences). For permanent faults, SCD recognizes the abnormal situation

and subsequently opens to isolate TES Nevyansk generation units from the faulted portion of distribution grid.

As mentioned earlier, the current generated with TES Nevyansk is small so SCD can overreach in response to abnormal conditions on VTGRES and step-down transformation substation 110 kV Chernostochinsk and result in undesired tripping generation units [2].

### B. Frequency converters in TES Revda

The second step is to consider how no power supplied to the distribution grid is guaranteed in TES Revda.

TES Revda is a gas turbine combined heat and power plant

Figure 2 shows, how TES Revda is connected to the local distribution grid. As you can see, TES Revda consists of:

- 3 (three) gas turbine units (G1 – G3), each of them includes a turbine-driven generator 9 MW, 3 kV, 101,6 Hz.
- 3 (three) dual induction frequency converters (FC1 – FC3), each of them is 12,5 kVA, 3 kV, input voltage frequency – 101.6 Hz, output voltage frequency – 50 Hz. The generator primary winding is connected to the dual induction frequency converter by means of the switch;
- 3 (three) step-up transformers (T1 – T3), each of them has a power winding 16 kVA, 10,5 kV and valve-side split winding 2,9 kV – 2,9 kV. Step-up transformers are necessary for harmonizing frequency converter output voltage with distribution grid voltage.

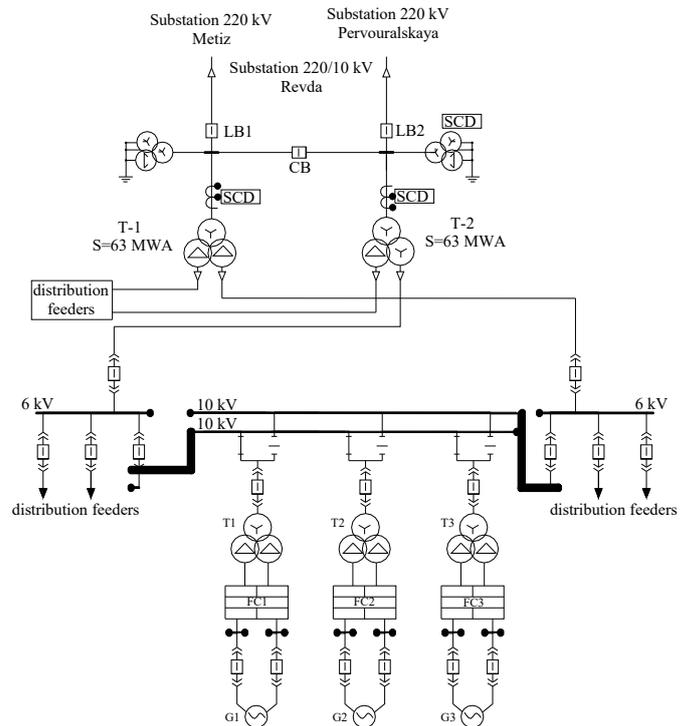


Figure 2. TES Revda scheme.

As you can assume, FC is crucial for bottling of generation under disturbances. The curve on the Figure 3 defines the condition for the generator to be plugged out [3].

The generator unit should remain online while the voltage at the node where generator unit is connected to the distribution grid lies above the curve. If a voltage dip occurs, the protection of frequency converter is brought into action and sends an output signal for a thyristor to switch off. In 15

ms, all thyristor gates are locked in and there is no current flow through the frequency converter. As a result, TES Revda is separated from the distribution grid. After the fault is cleared and the voltage is restored up to  $0,9U_{normal}$  at least, the frequency converters of TES Revda reestablish the power station connection to the distribution grid.

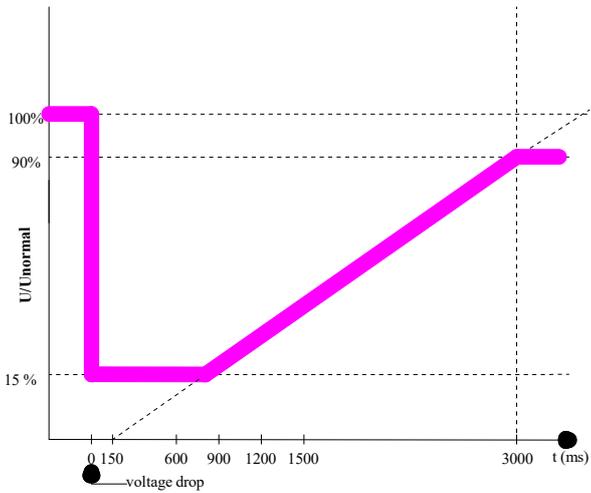


Figure 3. The frequency converter difining plot

As you can assume, the frequency converter might be of a great deal for generation units in guarantying no power supplied in the distribution grid. At the same time, it is worth mentioning that it has been applied since the recent times and there is no information how the device will reveal itself in the industrial circumstances.

#### IV. CONCLUSION

In summary, results obtained reveal the fact that the problem of no power supply in the distribution grid during the contingences from the on-customer's side generation units might be resolved with the different approaches. From the one hand, the usage of the emergency automation device is considered, but as can be seen this device does not provide the proper coordination with other relay protection device assigned to the area. From the other hand, there is an examination on how a thyristor frequency converter could be used in the process. Its short operational life has also been noted.

#### References

- [1] Federal law 184-FZ, dated 27 December 2002 "On technical regulations" (with amendments and additions)
- [2] The standard of "SO UPS" organization "Automatic emergency response mode control of power systems. Emergency automatics of power systems. Terms of the launching process. Conditions on creating the object. Standards and requirements", SRT 59012820.29.240.001-2011.
- [3] Thyristor frequency conereter TFC 2900/12500 "GT Energo". Techical conditions, 2015

# ОЦЕНКА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЁННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Н. В. Харламова<sup>1</sup>, А.И. Хальясмаа<sup>1</sup>, С.А. Ерошенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", Екатеринбург, Россия

E-mail: ninakharlamova@gmail.com, lkhalyasmaa@mail.ru, stas\_ersh@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** На сегодняшний день с увеличением нового строительства и активного развития промышленности в России требуется ввод в эксплуатацию дополнительных производственных мощностей. Централизованное подключение промышленных потребителей, в случае ввода небольших мощностей в РФ является дорогостоящим, очень трудоемким и длительным процессом. Поэтому в настоящее время энергетика России начинает активно ориентироваться на распределенную генерацию (малую генерацию). Подключение распределенной генерации дает потребителям возможность как параллельной работы с сетью, так и автономного электроснабжения. В отличие от изолированной работы параллельная работа распределенной генерации с электроэнергетической системой оказывает существенное влияние на технологические процессы выработки, передачи и распределения электрической энергии, поэтому оценка целесообразности строительства объектов распределенной генерации сегодня является важной задачей, особенно в контексте активного развития возобновляемых источников энергии.

**Материалы и методы:** Методом исследования при выполнении экспериментальной части являлось математическое моделирование. Исходными данными являлись различные метеорологические данные, характеристики выработки ветроустановок, электрические данные сети и нагрузок крупного региона РФ. В качестве инструмента моделирования применялся программный комплекс PALISADE DECISION TOOLS.

**Результаты:** Обоснована и доказана возможность решения задачи оценки целесообразности строительства объектов распределенной генерации на основе статистического анализа. Выполнена апробация разработанной модели на примере анализа ветроэнергетического потенциала крупного региона, которая показала достаточную для практической реализации точность оценки.

**Выводы:** Разработанный подход позволяет выполнить оценку ветропотенциала региона и моделировать поведение электроэнергетической системы в установившихся режимах при наличии в ней источников со стохастической выработкой электроэнергии.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, статистический анализ; энергосистема; возобновляемые источники энергии.

## ASSESSMENT OF WIND POWER POTENTIAL FOR LONG-DISTANCE INDUSTRIAL CONSUMERS POWER SUPPLY

N.V. Kharlamova<sup>1</sup>, A.I. Khalyasmaa<sup>1</sup>, S.A. Eroshenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: ninakharlamova@gmail.com, lkhalyasmaa@mail.ru, stas\_ersh@mail.ru

## Abstract

**Background:** Currently implementation of additional production facilities is required along with increase in construction activity and active development of the industry in Russia. The centralized connection of industrial consumers in the Russian Federation is expensive, laborious and long process in case of small capacities input. Therefore nowadays the power industry of Russia begins to focus on the distributed generation (small generation). Connection of the distributed generation gives consumers the chance of both parallel work with the network and autonomous power supply. Unlike the isolated work, parallel work of the distributed generation with electrical power system has significant effect on technological processes of development, transfer and distribution of electric energy therefore the assessment of expediency of construction of the distributed generation objects is an important task today, especially in the conditions of active development of renewable energy sources.

**Materials and Methods:** Mathematical modeling was the research method applied in an experimental part. Basic data included meteorological data, characteristics of wind turbines output, electric data of the network and loadings of the large region of the Russian Federation. As the instrument of modeling the software package PALISADE DECISION TOOLS was applied.

**Results:** The solubility of a problem of an assessment of expediency of the distributed generation objects construction is proved on the basis of the statistical analysis. The developed model testing made on the example of the wind power potential analysis in the large region has shown the assessment accuracy sufficient for practical implementation.

**Conclusions:** The developed approach allows executing an assessment of wind power potential of the region and modeling behavior of electrical power system in the steady state modes in case of including the sources with stochastic power generation.

**Key-words:** distributed generation; statistical analysis; power system; renewable energy source.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Ввиду небольших мощностей, вырабатываемых на электростанциях, использующих альтернативные источники энергии, возобновляемые источники [1] энергии (ВИЭ) в энергетике чаще всего рассматриваются совместно с понятием распределенной генерации[2]. Целесообразность их применения объясняется тем, что они не требуют затрат на доставку топлива или присоединение к центральной сети энергоснабжения. Чтобы выбрать оптимальный источник энергии сравним потенциалы различных видов альтернативной энергии в России.

По данным Hevel Solar[3] ограниченное количество районов РФ обладает достаточным для рентабельного использования энергии солнечного излучения потенциалом. Использование геотермальной энергии может быть экономически целесообразным только на территории Камчатки и Курильских островов. В то же время по данным национального атласа России[5] на большей части территории РФ средняя скорость ветра достаточна для работы тихоходных ветряных турбин.

## II. ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕТРОГЕНЕРАЦИИ

Оценим целесообразность использования ветрогенерации на практическом примере. Первым шагом является выбор оптимального места для размещения ВЭС в пределах Курганской области. Эта область была выбрана в следствии сочетания равнинного рельефа, высокой концентрации промышленных предприятий и относительной удаленности от столичных городов.

### A. Выбор населенного пункта.

Первым шагом является выбор оптимального места для размещения ВЭС в пределах Курганской области на карте, основанной на данных [4,5]. На ней черными окружностями выделено пять населенных пунктов, выбранных на основе причин, упомянутых ранее.

### B. Оценка целесообразности строительства выбранных регионов по ожидаемой средней мощности установки

Расчет проводится на основе функции распределения Вейбулла [6, 7], как способа оценки изменения скорости ветра в среднесрочном периоде, т.е. за один год. Интегральная функция распределения Вейбулла представляет собой распределение плотности вероятности скорости ветра, представленное формулой:

$$P(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

где  $P$  – вероятность возникновения ветряного потока со скоростью не ниже  $v$ ;  $c$  – масштабный коэффициент;  $k$  – коэффициент формы.

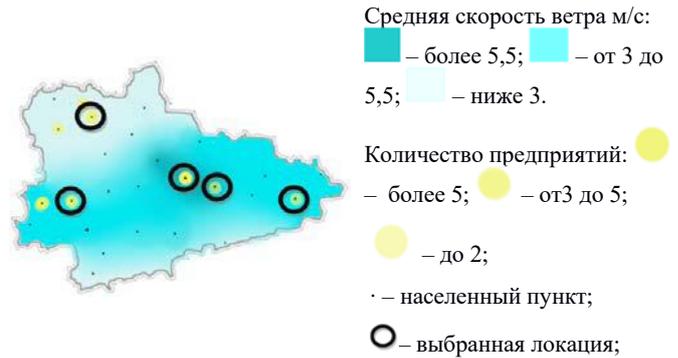


Рис.1 Карта средней скорости ветра

Для расчета  $c$  и  $k$  относительно них в каждом случае решается система уравнений с  $P$  и  $v$ , найденными в результате усреднения результатов наблюдения[4,5] с помощью Mathcad. В качестве примера приведен расчет для Кургана.

Вероятность принадлежности среднесуточной скорости ветра  $v$  промежутку  $(v_0, v_i)$  для года:

$$P(v \in (v_0, v_i)) = \frac{\sum_{j=1}^{12} P(v \in (v_0, v_i))}{12} \cdot 100\% \quad (2)$$

Вероятность принадлежности среднесуточной скорости ветра  $v$  принадлежит промежутку  $(v_0, v_i)$  для месяца рассчитывается, как:

$$P(v \in (v_0, v_i)) = \frac{n(v \in (v_0, v_i))}{n} \quad (3)$$

Где  $n(v \in (v_0, v_i))$  – количество дней в месяце, когда среднесуточная скорость ветра  $v$  принадлежит промежутку  $(v_0, v_i)$ ;

$n$  – количество дней в месяце;

ТАБЛИЦА I. Возможность принадлежности скорости ветра данному промежутку

$v_0-v_i$ , м/с	Возможность принадлежности скорости ветра данному промежутку $v_0-v_i$ , %					
	Янв.	Фев.	Март	Апрель	Май	Июнь
0-3	19	21	3	0	3	0
3-6	52	54	37	20	19	47
6-10	26	21	37	53	75	40
10-14	3	4	23	20	3	13
14-16.5	0	0	0	7	0	0
$v_0-v_i$ , м/с	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
0-3	6	3	7	6	0	13
3-6	58	55	33	36	23	42
6-10	33	39	53	39	50	36
10-14	3	6	7	19	24	3
14-16.5	0	0	0	0	3	6

Расчет вероятности того, что среднесуточная скорость ветра  $v$  меньше скорости  $v_i$  осуществляется по формуле:

$$P(v_i > v) = \sum_{i=1}^k P(v_i = v) \quad (4)$$

На основе полученных данных составляем систему уравнений:

$$\begin{cases} 0.0675 = 1 - e^{-\left(\frac{3}{c}\right)^k} \\ 0.4640 = 1 - e^{-\left(\frac{6}{c}\right)^k} \end{cases}$$

Аналогично уравнения были составлены и для двух других населенных пунктов. В результате их решения были получены значения:

ТАБЛИЦА II. параметры с и k

Параметры	Населенные пункты				
	Курган	Щучье	Лебяжье	Катайск	Звер.
C	7.603	4.490	5.057	3.501	4.149
K	1.993	2.903	2.768	2.326	2.347

Используя параметры из таблицы II и формулу (1) строим график функции Распределения Вейбулла. В тех же координатах строится график, отображающий данные о метеорологических наблюдениях за тот же период.

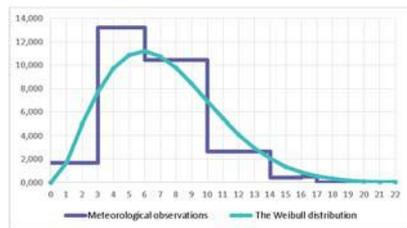


Рис. 2 Распределение Вейбулла и метеоданные, Курган

### C. Расчет параметров ветра для рассматриваемого района

На основе полученных данных был осуществлен расчет параметров, по которым можно судить о целесообразности использования ВЭС в данных районах. Расчеты осуществлялись по перечисленным ниже формулам, а полученные значения продемонстрированы в таблице IV. В качестве примера приведен расчет для Кургана.

1. Определение скорости ветра на высоте z, при известной скорости v<sub>0</sub> на высоте z<sub>0</sub> можно произвести по формуле:

$$v = v_0 \cdot \frac{z}{z_0} \quad (5)$$

2. Математическое ожидание средней скорости ветра на высоте 10 м. Для города Кургана:

$$\bar{v} = c \cdot \Gamma(1 + 1/k) = 7.603 \cdot 0.891 = 6.774 \text{ м/с} \quad (6)$$

3. Наиболее вероятная скорость ветра на высоте 10 м. (мода) при k > 1 рассчитывается по выражению:

$$v_{p \max} = \frac{c \cdot (k-1)^{(1/k)}}{k^{(1/k)}} = \frac{7.603 \cdot (1.993-1)^{(1/1.998)}}{1.993^{(1/1.998)}} = 5.360 \text{ м/с} \quad (7)$$

4. Порывистость ветра на высоте 50 м. (среднеквадратическое отклонение) определяется следующим образом:

$$\sigma_v = \sqrt{c^2 \cdot \Gamma(1 + 2/k) - (\bar{v})^2} = \sqrt{7.603^2 \cdot 1.001 - (8.485)^2} = 4.300 \text{ м/с} \quad (8)$$

5. Вероятность возникновения ветряного потока по скоростью не превышающей 3 м/с:

$$\exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{3}{7.603}\right)^{1.993}\right] = 14.414\% \quad (9)$$

### 6. Расчет средней мощности ветрогенерации:

$$P_{\text{вс}}(\bar{v}) = \Delta v \cdot \left( \sum_{n=0}^{50} p(n) \cdot P(n) - 0.5 \cdot p(50) \cdot p(50) \right) \quad (10)$$

Для расчета использовался программный пакет Excel.

ТАБЛИЦА III. Параметры ветра

Параметры ветра	Параметры				
	P(v≤3), %	σ <sub>v</sub>	P <sub>ав.</sub> , %	V <sub>ав. exp.</sub> , м/с, h=50 м	v <sub>max</sub> h=50 м, м/с
Курган	14.41	4.34	23.355	8.485	20.043
Щучье	26.52	1.519	6.43	5.136	12.527
Лебяжье	20.87	1.758	9.442	6.138	17.538
Катайск	50.02	1.217	3.244	5.219	12.731
Звериноголовск	37.126	1.442	5.658	6.089	16.155

### D. Анализ средних мощностей ветрогенерации Курганской области

По карте на рисунке 3 можно сделать вывод о том, какая часть установленной мощности ветрогенератора в среднем будет вырабатываться генератором в стандартных условиях с учетом годового распределения вероятности Вейбулла и особенностей рельефа.

На практике она может использоваться как для предварительного анализа возможности использования ВЭС на уже существующих предприятиях, так и для выбора оптимального местоположения нового предприятия с учетом возможности его частичного энергоснабжения за счет ВЭС.

Для наглядности произведем расчет того, с какой средней мощностью будет работать один ветрогенератор установленной мощностью P<sub>уст</sub>=2500 кВт по данным для Кургана [16].

$$P_{\text{ав.}} = \frac{P_{\text{inst.}} \cdot P_{\text{ав.}} \% \cdot \cos \beta}{100} = \frac{2500 \cdot 23.355 \cdot 0.819}{100} = 478.194 \text{ кВт} \quad (11)$$

$$\beta = 270^\circ - 10^\circ - C_{\text{ав.}} = 270^\circ - 10^\circ - 225^\circ = 35^\circ \quad (12)$$

Причем β – одинаков для всей области, т.к. преобладающее направление ветра по данным [10] по всей территории юго-восточное.

Таким образом можно рассчитать коэффициент ожидаемой средней мощности:

$$K_{\text{exp. ав.}} = \frac{P_{\text{ав.}}}{P_{\text{inst.}}} = \frac{P_{\text{ав.}} \% \cdot \cos \beta}{100} \quad (13)$$

Наиболее энергодефицитным является Восточный район, где дефицит мощности составляет 150 МВт [8] В то же время в Курганском энергорайоне наблюдается переизбыток мощности в 382 МВт по данным [9]. на 2016 год. Тем не менее именно в Курганском районе происходит значительное увеличение потребляемой мощности за счет введения в эксплуатацию нового оборудования. Подобные тенденции наблюдаются так же в Восточном и Шумихинском энергорайонах.

Сопоставляя карты на рис. 1 и рис. 3 можно сделать вывод о возможности использования ВЭС в качестве альтернативы подключению к единой энергосистеме во всех

энергорайонах, за исключением Шадринского, так как там средняя вырабатываемая мощность недостаточна для обеспечения устойчивого электроснабжения потребителя.

### III. ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА НА СЕТЬ

При использовании генератора в качестве источника питания следует учитывать непостоянность генерируемой мощности. Это связано с её зависимостью от скорости ветра. Для оценки влияния этой зависимости были использованы пакеты программ @Risk и InorXL [10] с применением симуляции методом Монте Карло, получены и проанализированы уровни напряжения в сети.

#### A. Создание модели для анализа

Была произведена тысяча итераций, для которых мощность ветрогенератора  $P$  была представлена функцией распределения Вейбулла, полученной на основе данных Табл. III. При этом  $c$  и  $k$  также изменялись в диапазонах (0.959; 1.172) и (0.383; 0.469) соответственно по формулам (14) и (15).

$$c = x^2 - 0.85 \cdot x + 0.179 \quad (14)$$

$$k = x^2 - 2.218 \cdot x + 1.120 \quad (15)$$

Распределение Вейбулла для мощности представлено формулой (14):

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{P_i}{c}\right)^k\right] \quad (16)$$

#### B. Результаты анализа

Результаты анализа показаны в таблице IV и рис. 4. На них продемонстрированы максимумы (max), минимумы (min) и наиболее ожидаемые (н.о) модули напряжений в кВ.

Таблица IV. Параметры напряжения

Шина	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	U9
Max	116.1	117.3	10.6	10.6	10.6	10.1	10.1	10.5	10.1
Min	115.5	116.8	10.6	10.6	10.6	10.1	10.1	10.5	10.1
М.е.	115.8	117.1	10.6	10.6	10.6	10.1	10.1	10.5	10.1

На основе каждой из итераций были получены данные о минимальном и максимальном напряжениях в каждом узле, а также наиболее вероятные значения напряжений. Также были определены зависимости напряжений в узлах от параметров  $c$ ,  $k$  и  $P$ . По результатам анализа полученных данных был сделан вывод, что на классах напряжения 110 и 10 кВ разница между минимальным и максимальным значениями напряжения составляет порядка 1%.

Отсюда следует, что изменение мощности ветрогенератора влияет на режим незначительно и не вызывает выхода напряжений узлов сети за рамки допустимых.

В ходе работы было заключено, что данный метод может применяться, как алгоритм для расчета потенциала использования ветрогенераторов в конкретном месте и сравнения нескольких мест с целью выбора наиболее подходящего с учетом климата, ландшафта и влияния на режим.

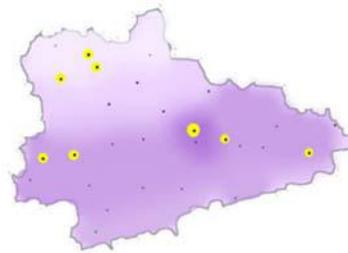


Рис.3. Средняя установленная мощность

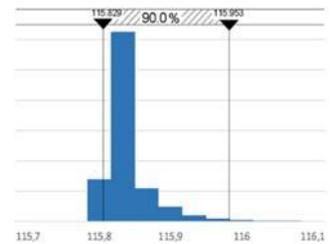


Рис.4. Изменение напряжения на шине1.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве критериев оценки эффективности использования ветрогенерации служат требуемые значения мощности и напряжения, их допустимые отклонения, а также метеорологические данные для конкретного района. Помимо конечного алгоритма выше приведены рекомендации для упрощения его использования, а также карты для визуализации процесса выбора.

Энергия ветра может стать одной из реальных альтернатив полному питанию от ЕЭС и только упрощая процесс её использования можно сделать ветряную энергию и возобновляемую энергию в целом более привлекательной для конечного потребителя.

### ССЫЛКИ

- [1] T. Adefarati ; R.C. Bansal, "Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review," IET Renewable Power Generation , vol. 10, Issue: 7, 2016, pp.873-884. (references)
- [2] A. Alimardani ; F. Therrien ; D. Atanackovic ; J. Jatskevich ; E. Vaahedi, "Distribution System State Estimation Based on Nonsynchronized Smart Meters", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 6, pp. 2919 - 2928, 02 June 2015.
- [3] <http://www.hevelsolar.com/sun-energy/>
- [4] <https://www.gismeteo.ru/diary/>
- [5] [http://www.atlas-yakutia.ru/weather/wind/stat\\_weather\\_28661\\_wind.php](http://www.atlas-yakutia.ru/weather/wind/stat_weather_28661_wind.php)
- [6] S.Eroshenko; A.Pasderin; V.Samoilenko, " Development and implementation of autonomous power supply systems to improve the quality and reliability of remote power supply up to 100 kW ", 2014.
- [7] M.S.A. Khan ; A. Khalique ; A.M. Abouammoh, "On estimating parameters in a discrete Weibull distribution IEEE Transactions on Reliability , vol. 38, Issue: 3, Aug 2002, pp.348-350.
- [8] M.P. Wilson ; M.J. Given ; I.V. Timoshkin ; S.J. MacGregor ; T. Wang ; M.A. Sinclair ; K.J. Thomas ; J.M. Lehr, "Weibull statistical analysis of impulse-driven surface breakdown data," Pulsed Power Conference (PPC), 2011 IEEE, 30 April 2012.
- [9] The disposal of the Kurgan Region Government, 28 April, 2014
- [10] D. Gupta ; M. Sadiq, "Software Risk Assessment and Estimation Model", International Conference on 2016 Computer Science and Information Technology, 12 September, 2008.

# Особенности участия объектов распределенной генерации в регулировании напряжения

К. В. Перевалов<sup>1</sup>, П. В. Илюшин, к.т.н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НТЦ ЕЭС (Московское отделение)»

<sup>2</sup>ФГАОУ ДПО «ПЭИПК»

[perevalov-kv@so-ups.ru](mailto:perevalov-kv@so-ups.ru), [ilyushin.pv@mail.ru](mailto:ilyushin.pv@mail.ru)

**Аннотация** — электрически близкое расположение объектов распределенной генерации (ОРГ) к потребителям электроэнергии является серьезным фактором, оказывающим влияние на надежность электроснабжения промышленных потребителей по параметру напряжения. Одним из ключевых элементов при поддержании и регулировании требуемых параметров напряжения в распределительной сети с ОРГ является их система возбуждения. При этом в отношении систем возбуждения ОРГ не существует четкого технического регулирования, что вызывает существенные сложности при выборе и настройке оптимальных режимов работы регуляторов.

**Ключевые слова** — распределенная генерация; автоматический регулятор возбуждения; надежность электроснабжения.

## Special aspects of voltage control supported with distributed generation

K. Perevalov<sup>1</sup>, P. Ilyushin, Ph.D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «STC UPS (Moscow Department)»

<sup>2</sup> Petersburg power engineering institute of professional development

**Abstract** — Distributed generation (DG) is characterized by the distribution of power over short distances to a load center. This factor has a critical influence on the electric power quality in the sense of voltage control. The excitation system is one of the key elements in distributed systems voltage support and control. While the current Russian technical regulation system having no strict guidance on DG excitation systems results in difficulties in optimum setting of excitation control modes.

**Keywords** — distributed generation; automatic voltage regulator; electric power quality.

### I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Развитие распределенной генерации в России неразрывно связано с развитием промышленного производства и мотивировано задачами собственников по повышению экономической эффективности предприятий. При этом ввод генерирующего объекта зачастую сопряжен с рисками ее эксплуатации, что может приводить к снижению надежности электроснабжения ответственной нагрузки и, как следствие, снижению экономической эффективности проекта. В данной статье затрагиваются вопросы надежности электроснабжения промышленной нагрузки связанные с режимами по напряжению в узлах распределительной сети, содержащих объекты распределенной генерации (ОРГ). В качестве объектов исследования рассматриваются генерирующие установки (ГУ) на базе газопоршневых двигателей (ГПД) и их автоматические регуляторы возбуждения (АРВ).

Как было показано в [1] актуальность данного вопроса является следствием существующего положения в регулировании технических требований к АРВ на

генерирующих объектах России. Область действия ключевого и единственного сертифицирующего стандарта «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам сильного действия синхронных генераторов» (СТО) распространяется на системы возбуждения (СВ) синхронных генераторов мощностью 60 МВт и более, а также СВ синхронных генераторов меньшей мощности, если в их составе имеется АРВ сильного действия с введенным в работу каналами стабилизации или системным стабилизатором [2]. Область действия СТО автоматически исключает регулирование объектов распределенной генерации, установленная мощность которых не превышает 25 МВт, что обусловлено п. 5 ст. 36 Федерального закона «Об электроэнергетике», а применение в составе зарубежных ГУ АРВ с системным стабилизатором, как правило, не предусматривается. Фактически это означает, что для ОРГ сохраняется негативная ситуация, при которой возможна эксплуатация АРВ и СВ не соответствующих требованиям отечественных стандартов. Возникновение такой ситуации возможно в условиях действующего

Федерального закона «О техническом регулировании», согласно которому область регулирования технических регламентов ограничена требованиями безопасности продукции, а все документы в области стандартизации имеют добровольный статус; при этом вопросы обеспечения надежности и безопасности электроэнергетических систем и объектов электроэнергетики вообще выведены из сферы действия системы технического регулирования [3]. Последнее особенно актуально, учитывая, что подавляющее большинство внедряемых газопоршневых установок ввозятся из-за рубежа, по причине низкой конкурентоспособности отечественных аналогов в диапазоне мощности более 1 МВт.

## II. СРАВНЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Применяемые на ОРГ системы возбуждения зарубежного производства комплектуются АРВ, поддерживающими работу в четырех режимах регулирования:

- Автоматическое регулирование напряжения (режим AVR);
- Поддержания заданного значения коэффициента мощности (режим PF);
- Поддержание заданного значения вырабатываемой реактивной мощности (режим VAR).
- Поддержание заданного значения тока возбуждения (режим FCR).

Режим автоматического регулирования напряжения по своим характеристикам и участию в общем режиме управления напряжением соответствует регуляторам, которые применяются на больших децентрализованных электрических станциях. На ОРГ, работающих в изолированных автономных сетях, данный режим работы является основным.

При параллельной работе с внешней сетью и подключении ОРГ к более низким напряжениям распределительной сети, с уже имеющимися устройствами регулирования и поддержания требуемого уровня напряжения (РПН трансформаторов, конденсаторные установки), использование альтернативных режимов PF/VAR позволяет решать проблемы координации напряжения. ГУ, следующие за напряжением внешней сети, как правило, являются синхронными генераторами небольшой мощности. При этом в российской практике большой децентрализованной генерации алгоритмы АРВ с поддержанием заданного коэффициента мощности / величины реактивной мощности не допускаются.

Применение настроек PF/VAR в отдельных случаях обуславливается особенностями эксплуатационных режимов ОРГ, когда станция работает только на собственную нагрузку без выдачи электрической мощности во внешнюю сеть (наиболее часто встречаемый в российской практике режим работы). Регулярные изменения загрузки ОРГ, связанные с суточными колебаниями потребления промышленного предприятия в

режиме AVR создают условия для перехода ГУ в опасный режим недо возбуждения, с целью снижения значительного перенапряжения в период малой загрузки. Необходимость компенсации возникающего избытка реактивной мощности может существенно влиять на надежность работы ОРГ, переход в режим недо возбуждения сопрягается с работой на пределе статической устойчивости, перегревом обмоток генератора и вынужденным недопустимым снижением загрузки газопоршневых двигателей.

Основным моментом при выборе АРВ с дополнительными функциями PF/VAR, определяющим надежность электроснабжения промышленного потребителя, является тип исполнения алгоритмов регулирования (контроллер или регулятор). Принципиальное отличие алгоритмов определяется их динамическими характеристиками при резких возмущениях во внешней сети. Алгоритм регулятора, в отличие от контроллера, не обеспечивает быстрой форсировки значений возбуждения, осложняя удержание ГУ в области допустимых режимов работы, продолжая поддерживать в границах заданных значений коэффициент мощности или величину реактивной мощности. Дальнейшее рассмотрение АРВ с функциями PF/VAR будет относиться только к алгоритмам управления регуляторов в режиме PF, последние представляют наибольший интерес в связи с тем, что алгоритмы контроллеров, в российской практике эксплуатации ОРГ, практически не используются.

## III. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Рассматривается режим параллельной работы ОРГ в ремонтной схеме и «слабой» связью с внешним источником, схема показана на рис. 1. Моделируется близкое трехфазное короткое замыкание с последующим набросом на секцию с ОРГ дополнительной нагрузки после переключения АРВ.

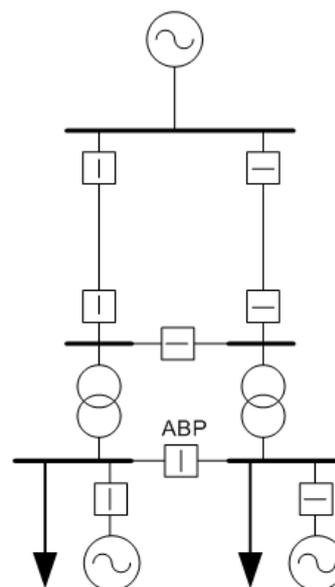


Рис. 1. Схема к реализации трехфазного КЗ с набросом нагрузки

Доля асинхронных двигателей (АД) в нагрузке равна 70%, такая нагрузка имеет близкий к нулю регулирующий эффект активной мощности по напряжению по

следующей причине. У нормально работающих АД понижение питающего напряжения вызывает небольшое увеличение скольжения, при этом скорость вращения АД и мощность, потребляемая приводимыми во вращение механизмами, немного снижаются. Но при снижении напряжения ток нагрузки увеличивается и увеличиваются потери мощности  $3I^2R$ . В итоге у нормально работающих АД регулирующий эффект по напряжению близок к нулю (регулирующий эффект может быть и больше, и меньше нуля) [7].

На рис. 2 показан переходный процесс моделируемого режима для случая эксплуатации ОРГ с АРВ в режиме поддержания заданного значения коэффициента мощности. Близкое короткое замыкание вызвало глубокое снижение напряжения с одновременным снижением электрического момента АД. При этом механический момент приводного механизма практически не зависит от скорости вращения АД. Попытка восстановления напряжения по окончании короткого замыкания сопровождается резким увеличением токов АД при самозапуске, что при ремонтной схеме сети приводит к существенному снижению напряжения, сопровождающегося отключением ГУ и всех электроприемников. Для восстановления напряжения до границ области допустимых режимов требуется форсировка выдачи реактивной мощности, которая не может быть обеспечена в режиме регулирования PF, так как алгоритм АРВ продолжает поддерживать заданное значение коэффициента мощности.

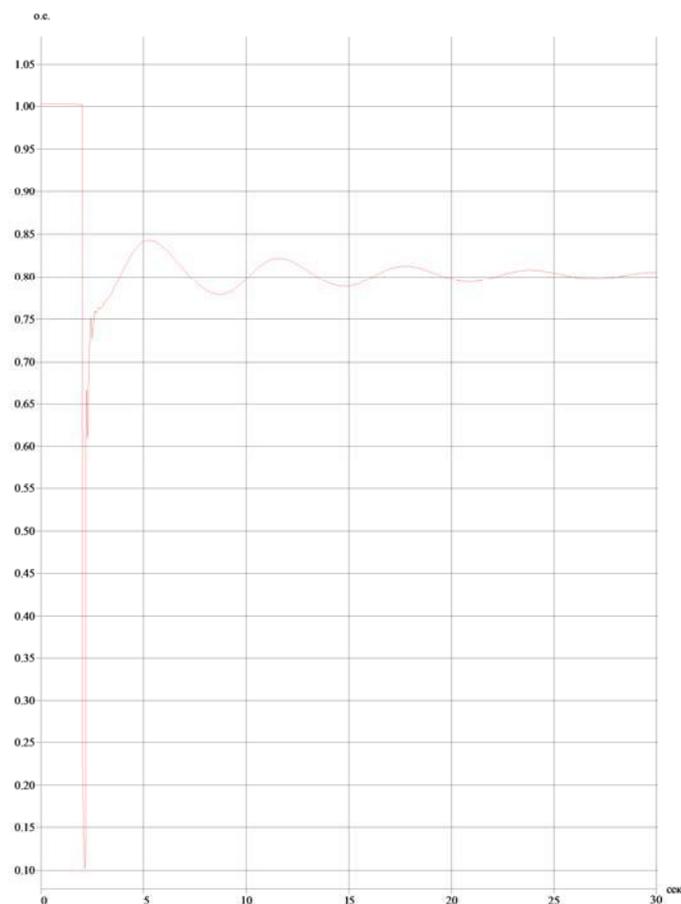


Рис. 2. Переходный процесс, режим регулирования PF

На рис. 3 показан переходный процесс в точно таких же условиях, но для случая эксплуатации ОРГ с АРВ в

режиме автоматического регулирования напряжения. Близкое короткое замыкание и последовавший за ним наброс нагрузки не приводят к нарушению устойчивости, что обусловлено наличием требуемых динамических характеристик АРВ, обеспечивающих форсировку тока и напряжения возбуждения во время короткого замыкания. Возникшее увеличение напряжения после отключения короткого замыкания (кратковременное повышение напряжения до  $1,12 U_{ном}$ ) связано с восстановлением номинальной величины потребления реактивной мощности АД после кратковременного пика реактивной нагрузки во время переходного процесса.

Электродвигатели, включая двигатели с регулируемым приводом, чувствительны к провалам напряжения, поскольку нагрузка все еще требует энергии, которой, за исключением инерции движущихся частей, уже недостаточно. В системах с несколькими электроприводами управляющие элементы, определяющие снижение напряжения, могут подать сигнал на отключение двигателя при разных фактических значениях уменьшенного напряжения и применить различные величины замедления по сравнению друг с другом, что приведет к полной потере управления за таким быстро изменяющимся процессом. Оборудование для обработки цифровых данных также крайне чувствительно к снижению напряжения, поскольку это событие может привести к потере данных и снижает общую эффективность системы обработки цифровых данных [8].

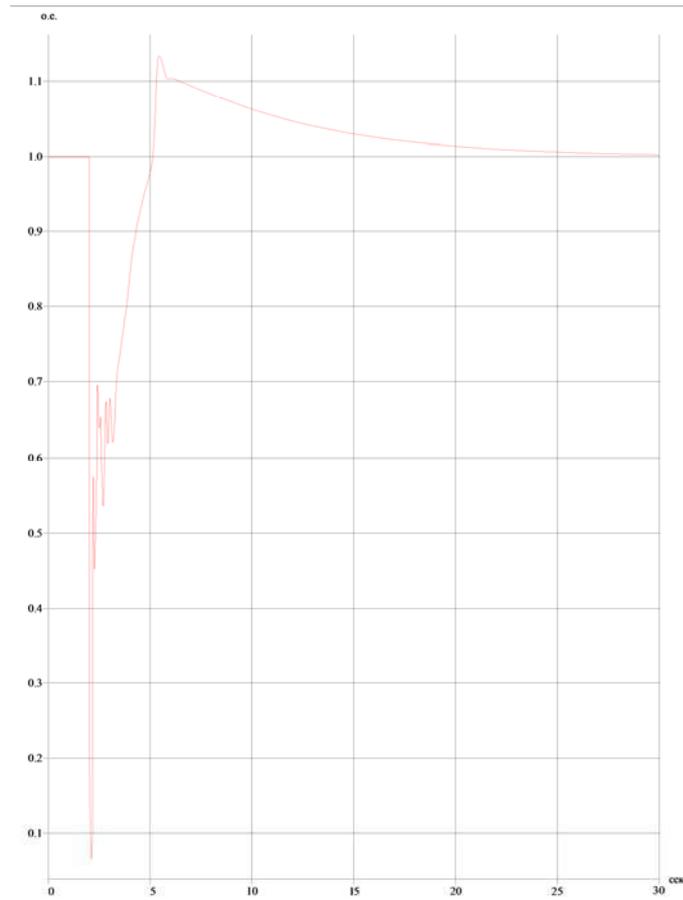


Рис. 3. Переходный процесс, режим регулирования AVR

Порог чувствительности к снижению напряжения наиболее часто используемых электроприемников показаны в таблице I.

Таблица I. ПОРОГ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ К СНИЖЕНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ

Тип оборудования	Остаточное напряжение, %	Время снижения, мс
Пускатель электродвигателя	50	40
Двигатель с переменной частотой вращения	85	10
Частотный преобразователь	82	1,5
Регулируемые электроприводы	50–80	2–3
Контакторы	50–60	20–30
Электромагнитный выключатель	50	10
Контроллер технологического процесса	70	<8

Решение о допустимости эксплуатации объектов распределенной генерации с настройкой АРВ в режиме поддержания заданного значения коэффициента мощности должно приниматься после проведения расчетов переходных процессов. Помимо проверки режима по напряжению, определяющего возможность надежной работы ответственных электроприемников (без отключения), требуется проверка значений максимального времени отключения близкого трехфазного короткого замыкания. Максимальное время отключения трехфазного короткого замыкания сокращается при переходе в режим PF из режима AVR и имеет динамику на дальнейшее сокращение при смещении рабочей точки регулятора от номинального значения перевозбуждения (как правило,  $\cos\varphi=0,8$ ) в область недо возбуждения.

Помимо проведения основных режимных расчетов требуется дополнительная проверка механической мощности приводного газопоршневого двигателя. По информации отдельных производителей генерирующего оборудования [9] часть комплектных газопоршневых установок не допускает работу с коэффициентом мощности близким или равным единице, в связи с ограничениями по механической мощности.

#### IV. ВЫВОДЫ

Существующее положение в регулировании технических требований на системы возбуждения объектов распределенной генерации в совокупности с преимущественным использованием АРВ зарубежного производства создает условия, при которых ввод и эксплуатация генерирующего оборудования может существенно снизить надежность электроснабжения промышленного предприятия. Выбор альтернативных режимов работы АРВ, обеспечивающих поддержание заданных значений коэффициента мощности или величины реактивной мощности, возможен только после предварительного проведения расчетов переходных процессов с определением допустимости возникающих режимов по напряжению и значений предельного времени отключения близкого трехфазного короткого замыкания.

#### Список литературы

- [1] Илюшин П.В., Перевалов К.В. О системах автоматического регулирования возбуждения генерирующих установок объектов распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация, 2016, №4, с. 52-56.
- [2] СТО 59012820.29.160.20.001-2012. Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам сильного действия синхронных генераторов.
- [3] Федеральный Закон от 26 марта 2003 г. №35-ФЗ «Об электроэнергетике».
- [4] Шульгинов Н.Г. Развитие нормативно-технического обеспечения системной надежности ЕЭС России / Шульгинов Н.Г., Павлушко С.А., Кучеров Ю.Н., Мальцан З.С., Федоров Ю.Г. // Энергия единой сети, 2014, № 1.
- [5] Беляев А.В. Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики (Часть 2). М.: НТФ «Энергопрогресс», 2010. – 84 с.: ил. [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 7 (139)].
- [6] IEEE Std. 421.5-2005, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005.
- [7] Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. О специальном воздействии на систему возбуждения автономно работающих генераторов при больших набросах нагрузки // Электро, 2016, №2, с. 2-7.
- [8] Я. Бедерак, Д. Бородин, В. Михайлов. Сети промпредприятий. Устройства защиты от провалов напряжения // Новости электротехники, 2012, №1.
- [9] Designer's Database. Caterpillar.  
URL: <https://www.cashmanequipment.com/cashmancat/media/Cashman-Equipment/generator-power-factor.pdf>.

## ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭЦ

А.С. Ведерников, Е.А. Балукова, Е.А. Комасова

ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет", Самара, Россия

E-mail: balukova\_e@mail.ru

*Аннотация* - задачи прогнозирования электропотребления можно разделить на два основных класса: классификация и регрессия. В данной статье будет решаться задача регрессии, для которой необходимо определить значения числовой выходной переменной по значениям входных переменных. В качестве входных параметров были выявлены шесть переменных, от которых зависит расход электроэнергии на собственные нужды ТЭЦ. Выходной переменной будет являться активная мощность, расходуемая на механизмы собственных нужд (СН) ТЭЦ. Прогнозирование расхода активной мощности на собственные нужды ТЭЦ осуществляется с помощью пакета ST Neural Networks, путем построения различных нейронных сетей, так как они устанавливают правильные соотношения между входными и выходными переменными, что позволяет достаточно точно предсказать будущую нагрузку. Были построены графики прогнозируемого и фактического электропотребления на сутки вперед, а также вычислены ошибки каждой из сетей методом наименьших квадратов. Исходя из полученных графиков и данных была отобрана нейронная сеть с наименьшей ошибкой прогноза. Выбранный тип и архитектура нейронной сети с наименьшей ошибкой прогноза будет являться основой для прогнозирования электропотребления СН ТЭЦ.

*Ключевые слова* – искусственные нейронные сети, прогнозирование электропотребления, собственные нужды ТЭЦ, ошибка прогноза.

## CONSTRUCTION OF NEURAL NETWORKS FOR FORECASTING OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION OF OWN NEEDS OF CHPP

A.S. Vedernickov, E.A. Balukova, E.A. Komasova

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: balukova\_e@mail.ru

*Abstract* - all problems in the forecasting of electric consumptions can be divided into two main groups: classification and regression. The regression problem will be solved in this article, it is necessary to determine the values of the numerical output variable by the values of the input variables to solve this problem. As an input parameters, we have identified six variables, which the electric power consumption for the needs of the CHPP depends on. The output variable will be an active power expendable on mechanisms of own needs (ON) of CHPP. The forecasting of an active power consumption of own needs on CHPP is carried out with the ST Neural Networks by construction of neural networks, because they establish the correct connection between the input and output variables, which allows you to accurately predict the future load. The graphs of the predicted and actual power consumption for the day ahead were plotted, and also the errors of each network were calculated by the least squares method. Based on the received graphs and data we have selected a neural network with the lowest prediction error. The type and the structure of the neural network with the least prediction error will be the basis of predicting the power consumption of ON of CHPP.

**Key-words:** artificial neural networks, forecasting of electric power consumption, own needs of CHPP, the prediction error.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Искусственные нейронные сети находят новые применения в практике принятия решений и управления сложными организационно-техническими решениями в электроэнергетике. Большой вклад в развитие теории ИНС при прогнозировании электропотребления внесли работы следующих авторов: Седова А.В., Надтока И.И., Манусова В.З., Шумиловой Г.П., Готман Н.Э., Старцевой Т.Б., Круглова В.В., Борисова В.В.

Одним из преимуществ ИНС является способность к обобщению накопленных знаний и самообучению. ИНС устанавливает правильные соотношения между входными и выходными переменными, что позволяет ей достаточно точно предсказать будущую нагрузку [1].

## II. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Задачи прогнозирования можно разбить на два класса: классификация и регрессия. В задачах классификации необходимо решить, к какому из нескольких заданных классов принадлежит данный входной набор. В данной статье будут решаться задачи регрессии, так как необходимо предсказать значение переменной, принимающей непрерывные числовые значения (в данном случае расход активной мощности на механизмы собственных нужд ТЭЦ, что и будет являться единственной выходной переменной).

Основной целью задач регрессии является оценка значения числовой выходной переменной по значениям входных переменных. Задачи регрессии в данной работе будут решаться с помощью пакета ST Neural Networks с помощью нейронных сетей, таких как многослойный перцептрон (MLP), радиальная базисная функция (RBF), обобщенно-регрессионная сеть (GRNN) и линейная сеть [3].

## III. ЦЕЛИ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

При проведении корреляционного анализа с целью определения входных величин для построения нейронной сети, годовой период был разбит на четыре периода. В качестве входных данных были выявлены шесть переменных: почасовые значения выработанной активной мощности, тепловой энергии, условного расхода топлива, ретроспективные данные электропотребления СН, число работающих генераторов и коэффициент установленной мощности электростанции. При составлении прогнозной модели СН ТЭЦ значения тепловой энергии будут учитываться только в отопительный период [2]. Следовательно, в данной работе будет рассматриваться отопительный период, как период с наибольшим числом входных величин, для которого будет спрогнозировано электропотребление СН ТЭЦ на сутки вперед. Выходной переменной будет являться активная мощность, расходуемая на механизмы собственных нужд ТЭЦ.

Приступая к разработке нейросетевого решения, как правило, сталкиваются с проблемой выбора оптимальной архитектуры нейронной сети. Будет ли та или иная сеть лучше и практичнее, зависит в большинстве случаев от условий задачи.

Сети RBF имеют ряд преимуществ перед сетями MLP. Во-первых, они моделируют произвольную нелинейную функцию с помощью всего одного промежуточного слоя, и тем самым избавляют нас от необходимости решать вопрос о числе слоев. Во-вторых, параметры линейной комбинации в выходном слое можно полностью оптимизировать с помощью хорошо известных методов линейного моделирования, которые работают быстро и не испытывают трудностей с локальными минимумами, так мешающими при обучении MLP. Поэтому сеть RBF обучается очень быстро (на порядок быстрее MLP) [4].

С другой стороны, до того, как применять линейную оптимизацию в выходном слое сети RBF, необходимо определить число радиальных элементов, положение их центров и величины отклонений. Соответствующие алгоритмы, хотя и работают быстрее алгоритмов обучения MLP, в меньшей степени пригодны для решения нашей задачи прогнозирования.

Для правильного моделирования типичной функции сеть RBF, с ее более эксцентричной поверхностью отклика, требует несколько большего числа элементов. Следовательно, модель, основанная на RBF, будет работать медленнее и потребует больше памяти, чем соответствующий MLP.

Неумение сетей RBF и сетей GRNN экстраполировать свои выводы за область известных данных, приводит к снижению достоверности и точности прогнозов и усложняет обработку информации и оценку результатов. Сеть MLP, напротив, выдает более определенные решения при обработке сильно отклоняющихся данных.

Линейная сеть представляет собой сеть без промежуточных слоев, которая в выходном слое содержит только линейные элементы, т.е. элементы с линейной функцией активации, что не применимо для решения сложных задач, таких как прогнозирование электропотребления СН.

Таким образом, в программе ST Neural Networks целесообразно построить радиально-базисные нейронные сети и многослойный перцептрон с помощью двух инструментов: автоматизированная нейронная сеть (АНС) и пользовательская нейронная сеть (ПНС), которые позволяют конструировать собственные сети и выбирать наиболее подходящие для решения необходимой задачи.

## IV. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Для АНС и ПНС были построены нейронные сети: многослойный перцептрон и радиально-базисная функция. Для реализации и выбора сетей с наименьшей ошибкой  $E$ , было выбрано минимальное и максимальное число скрытых нейронов в диапазоне от 1 до 20 и задействованы функции активации, такие как тождественная, логистическая и гиперболическая, количество обучаемых и сохраняемых сетей выбраны соответственно 20 и 10.

Согласно методу наименьших квадратов [5] ошибка функционирования сети определяется по следующему выражению:

$$\sum E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2$$

где:

$y_i$  – выход сети;

$d_i$  – фактические значения электропотребления,

$p$  – индекс образца в обучающей выборке.

На рисунке 1 представлен график, который отображает фактическое и прогнозное электропотребление СН. В таблице 1 представлены фактические и прогнозные числовые значения активной мощности, расходуемой на собственные нужды электростанции, а также разность этих значений, указывающая на ошибку прогноза. Прогноз электропотребления СН ТЭЦ был сделан с помощью многослойного персептрона с одним скрытым слоем, содержащим 15 нейронов – MLP 6-15-1 с логистической функцией активации скрытых и выходных нейронов, а также с алгоритмом обучения BFGS. Ошибка прогноза данной нейронной сети составила  $E=0,8\%$ . Данная архитектура сети оказалась с самой минимальной ошибкой прогноза из всех нейронных сетей данного типа, предоставленных программой.

Построив нейронные сети радиально-базисной функции, программой была отобрана сеть с одним скрытым слоем, содержащим 6 нейронов – RBF 6-6-1 с гауссовой функцией активации скрытых и тождественной функцией выходных нейронов, а также с алгоритмом обучения RBFT. Ошибка прогноза данной нейронной сети составила  $E=2,5\%$ .

На рисунке 2 представлен график, который отображает фактическое и прогнозное электропотребление СН на основе нейронной сети радиально-базисной функции RBF 6-6-1. В таблице 2 отображены фактические и прогнозные числовые значения активной мощности, расходуемой на собственные нужды электростанции, а также разность этих значений, указывающая на ошибку прогноза.

В пользовательской нейронной сети была отобрана нейронная сеть многослойного персептрона MLP 6-7-1, наименьшая ошибка прогноза которой составила  $E=0,5\%$ , что отображается на рис.3. В таблице 3 представлены фактические и прогнозные числовые значения активной мощности, расходуемой на собственные нужды электростанции, а также разность этих значений, указывающая на ошибку прогноза.

При построении пользовательской нейронной сети радиально-базисной функции, программой была выбрана сеть RBF 6-6-1 с наименьшей ошибкой прогноза  $E=2,5\%$ . На рисунке 4 представлен график, который отображает фактическое и прогнозное электропотребление СН. В таблице 4 представлены фактические и прогнозные числовые значения активной мощности, расходуемой на собственные нужды электростанции, а также разность этих значений, указывающая на ошибку прогноза.

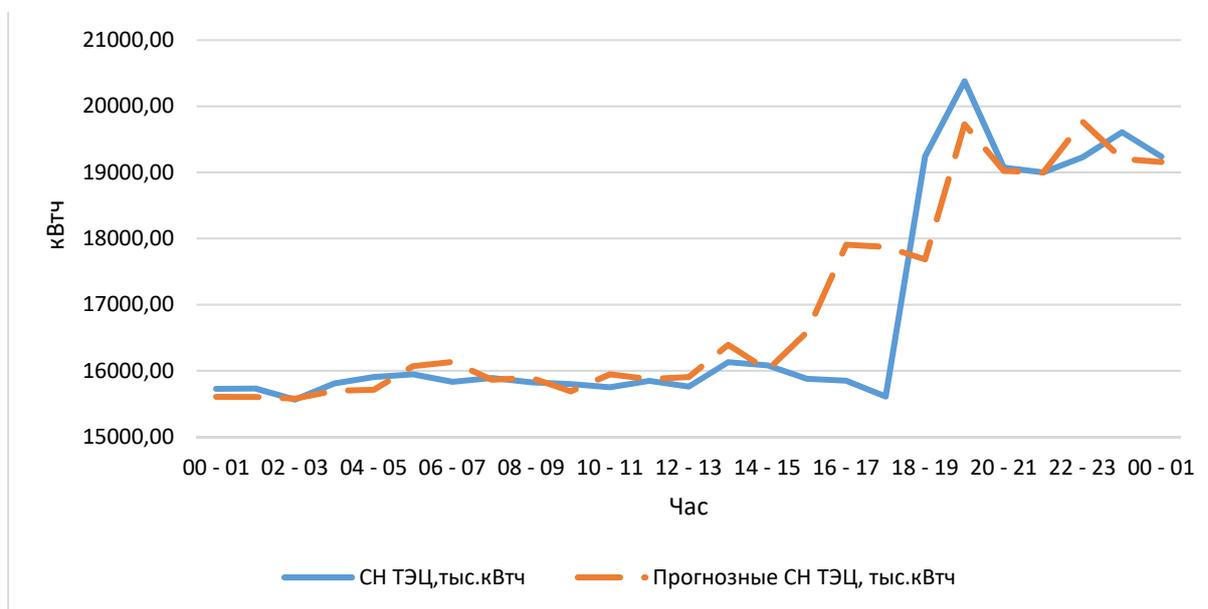


Рис.1 Прогнозное и фактическое электропотребление СН на сутки вперед на основе MLP

Таблица 1

Часы	СН ТЭЦ, тыс. кВтч	Прогнозные СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р фактическое - Р прогнозные, тыс.кВтч
00 - 01	15725,40	15606,44	118,96
01 - 02	15730,20	15602,83	127,37
02 - 03	15563,40	15578,19	-14,79
03 - 04	15808,80	15698,67	110,13
04 - 05	15905,40	15712,85	192,55
05 - 06	15946,80	16070,45	-123,65
06 - 07	15832,80	16135,61	-302,81
07 - 08	15889,80	15863,54	26,26
08 - 09	15826,20	15892,80	-66,60
09 - 10	15798,00	15687,29	110,71
10 - 11	15751,80	15945,06	-193,26

11 - 12	15847,80	15873,31	-25,51
12 - 13	15760,80	15904,99	-144,19
13 - 14	16129,20	16391,78	-262,58
14 - 15	16080,60	16011,49	69,11
15 - 16	15879,00	16583,07	-704,07
16 - 17	15849,60	17905,81	-2056,21
17 - 18	15611,40	17873,63	-2262,23
18 - 19	19244,40	17683,83	1560,57
19 - 20	20378,40	19725,76	652,64
20 - 21	19071,60	19022,62	48,98
21 - 22	19000,20	19000,16	0,04
22 - 23	19229,40	19767,01	-537,61
23 - 00	19609,20	19205,32	403,88
00 - 01	19240,20	19157,16	83,04

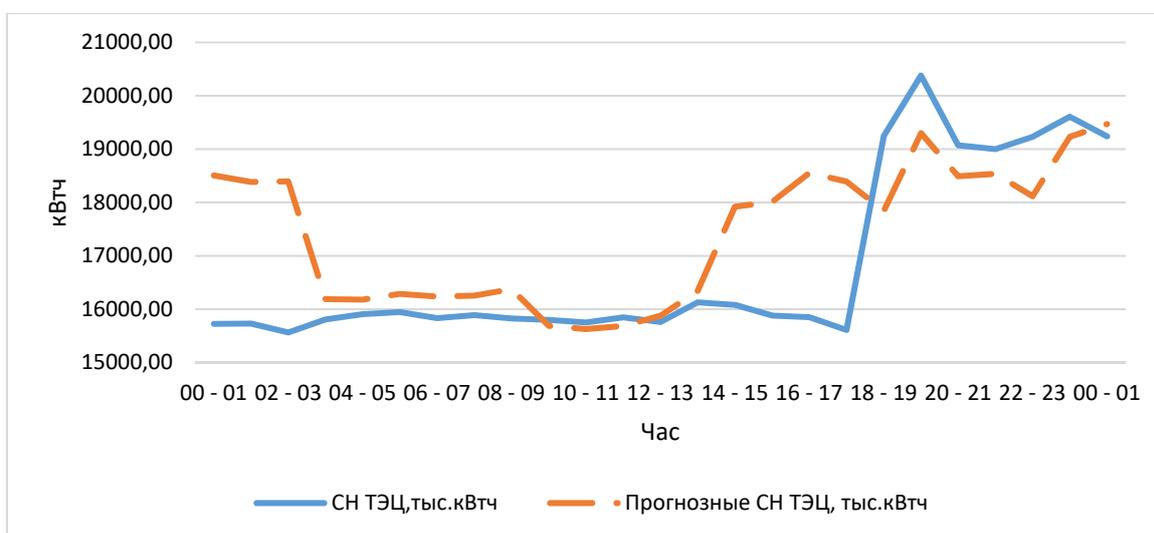


Рис.2 Прогнозное и фактическое электропотребление СН на сутки вперед на основе RBF

Таблица 2

Статистические данные фактических и прогнозных значений СН ТЭЦ

Часы	Р фактическое СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р прогнозные СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р фактическое - Р прогнозные, тыс.кВтч
00 - 01	15725,40	18507,20	-2781,80
01 - 02	15730,20	18383,01	-2652,81
02 - 03	15563,40	18396,24	-2832,84
03 - 04	15808,80	16186,96	-378,16
04 - 05	15905,40	16178,66	-273,26
05 - 06	15946,80	16285,96	-339,16
06 - 07	15832,80	16234,59	-401,79
07 - 08	15889,80	16254,67	-364,87
08 - 09	15826,20	16376,42	-550,22
09 - 10	15798,00	15686,83	111,17
10 - 11	15751,80	15626,53	125,27

11 - 12	15847,80	15684,69	163,11
12 - 13	15760,80	15876,24	-115,44
13 - 14	16129,20	16343,77	-214,57
14 - 15	16080,60	17920,01	-1839,41
15 - 16	15879,00	18011,56	-2132,56
16 - 17	15849,60	18555,38	-2705,78
17 - 18	15611,40	18393,35	-2781,95
18 - 19	19244,40	17843,60	1400,80
19 - 20	20378,40	19300,88	1077,52
20 - 21	19071,60	18490,37	581,23
21 - 22	19000,20	18536,12	464,08
22 - 23	19229,40	18117,87	1111,53
23 - 00	19609,20	19230,75	378,45
00 - 01	19240,20	19470,05	-229,85

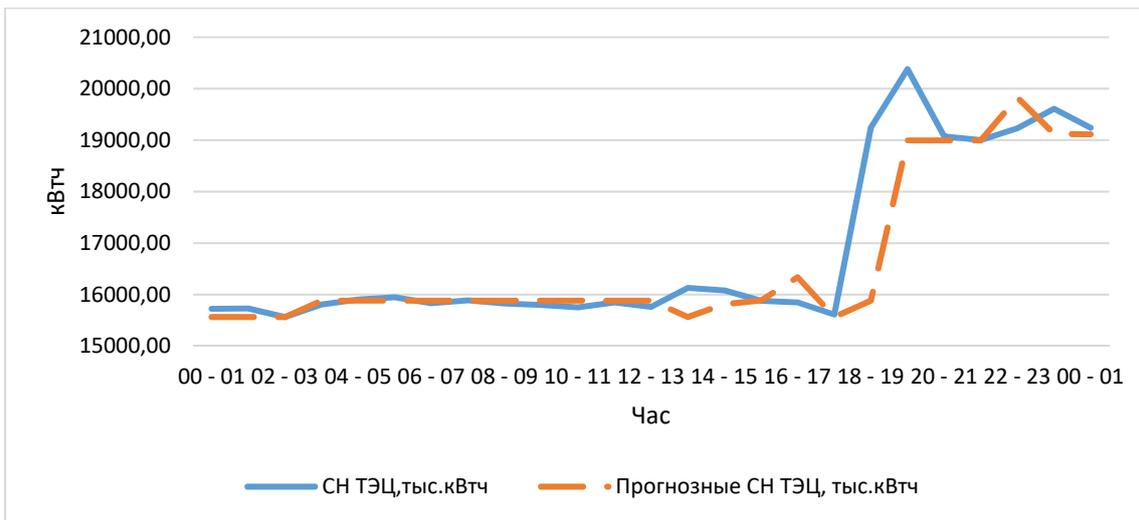


Рис.3 Прогнозное и фактическое электропотребление СН на сутки вперед на основе MLP

Таблица 3  
Статистические данные фактических и прогнозных значений СН ТЭЦ

часы	Р фактическое СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р прогнозное СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р фактическое - Р прогнозное, тыс.кВтч
00 - 01	15725,40	15565,20	160,20
01 - 02	15730,20	15565,20	165,00
02 - 03	15563,40	15565,20	-1,80
03 - 04	15808,80	15882,80	-74,00
04 - 05	15905,40	15882,80	22,60
05 - 06	15946,80	15882,80	64,00
06 - 07	15832,80	15882,80	-50,00
07 - 08	15889,80	15882,80	7,00
08 - 09	15826,20	15882,80	-56,60
09 - 10	15798,00	15882,80	-84,80
10 - 11	15751,80	15882,80	-131,00

11 - 12	15847,80	15882,80	-35,00
12 - 13	15760,80	15882,75	-121,95
13 - 14	16129,20	15565,20	564,00
14 - 15	16080,60	15812,97	267,63
15 - 16	15879,00	15886,25	-7,25
16 - 17	15849,60	16339,06	-489,46
17 - 18	15611,40	15566,16	45,24
18 - 19	19244,40	15883,78	3360,62
19 - 20	20378,40	18995,84	1382,56
20 - 21	19071,60	18995,84	75,76
21 - 22	19000,20	18995,84	4,36
22 - 23	19229,40	19827,50	-598,10
23 - 00	19609,20	19122,56	486,64
00 - 01	19240,20	19113,57	126,63

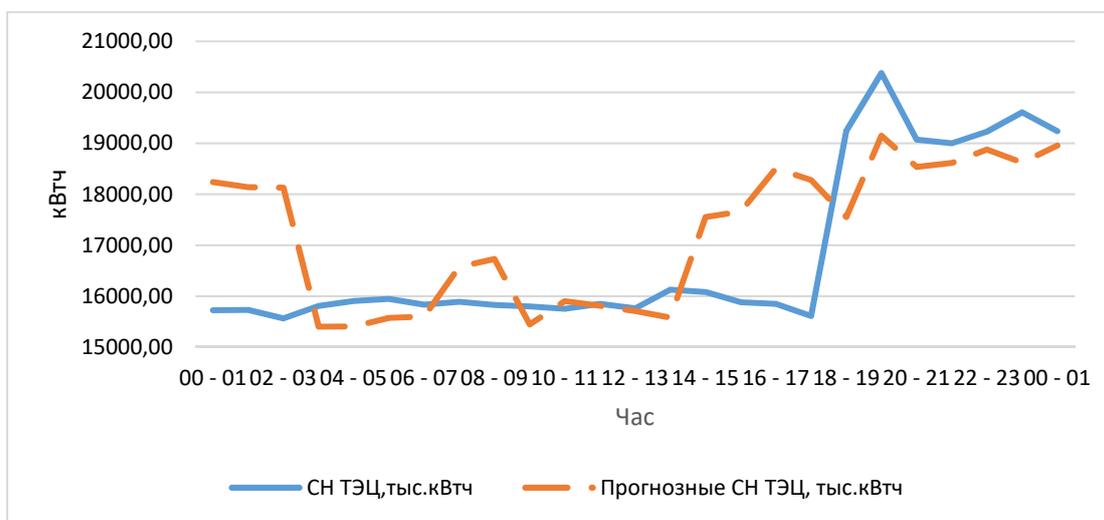


Рис.4 Прогнозное и фактическое электропотребление СН на сутки вперед на основе RBF

Таблица 4  
Статистические данные фактических и прогнозных значений СН ТЭЦ

часы	Р фактическое СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р прогнозное СН ТЭЦ, тыс.кВтч	Р фактическое - Р прогнозное, тыс.кВтч
00 - 01	15725,40	18239,45	-2514,05
01 - 02	15730,20	18138,49	-2408,29
02 - 03	15563,40	18129,59	-2566,19
03 - 04	15808,80	15401,12	407,68
04 - 05	15905,40	15403,17	502,23
05 - 06	15946,80	15574,94	371,86
06 - 07	15832,80	15598,67	234,13
07 - 08	15889,80	16577,54	-687,74
08 - 09	15826,20	16729,41	-903,21
09 - 10	15798,00	15445,33	352,67
10 - 11	15751,80	15902,53	-150,73

11 - 12	15847,80	15811,78	36,02
12 - 13	15760,80	15707,04	53,76
13 - 14	16129,20	15580,77	548,43
14 - 15	16080,60	17553,86	-1473,26
15 - 16	15879,00	17659,70	-1780,70
16 - 17	15849,60	18505,59	-2655,99
17 - 18	15611,40	18281,41	-2670,01
18 - 19	19244,40	17554,15	1690,25
19 - 20	20378,40	19149,42	1228,98
20 - 21	19071,60	18536,43	535,17
21 - 22	19000,20	18615,11	385,09
22 - 23	19229,40	18877,88	351,52
23 - 00	19609,20	18620,54	988,66
00 - 01	19240,20	18957,06	283,14

## ВЫВОДЫ

Исходя из построенных нейронных сетей, имеющие определенный процент ошибки прогноза, можно сделать вывод о том, что в задачах прогнозирования электропотребления СН наиболее подходящей нейронной сетью с наименьшей ошибкой прогноза в  $E=0,5\%$  является многослойный персептрон MLP 6-7-1.

## Список литературы

[1] Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 176 с: ил. — (Прикладные информационные технологии).

[2] Определение корреляционных зависимостей между факторами, влияющими на электропотребление собственных нужд ТЭЦ / А.С.Ведерников, Е.А.Балукова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика 2016;6: 110-113 с.

[3] Боровиков, В.П. Нейронные сети. Statistica Neural Networks. Методология и технологии современного анализа данных / В.П. Боровиков. — 2-е изд. — М.: Горячая линия – Телеком, 2008. — 392 с.

[4] Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд., испр.: Пер. с англ. /С. Хайкин.— М.:ООО И.Д. Вильямс, 2006. — 1104с.

[5] Халафян, А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. учеб. / А.А. Халафян. — М.: Бином-Пресс, 2007. — 512с.

# СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

В.Д.Свистунов, М.С.Богомолова, А.С.Лысова  
ФГБОУ ВО НИУ "Московский энергетический институт", Москва, Россия  
E-mail: svistunov.vladimir@gmail.com

**Аннотация** — Проблема отсутствия подключения к энергосети стоит не только перед относительно крупными удаленными населенными пунктами, но и перед мелкими карманными потребителями - портативной техникой, небольшой электроникой и т.д. В условиях длительного пребывания человека в местах, удаленных от цивилизации, рано или поздно встает вопрос об обеспечении энергией устройств, которые постоянно используют современные люди. Во время научно-исследовательской экспедиции или же в ходе туристического похода, отсутствие заряда мобильного телефона может оставить без связи и подвергнуть опасности жизни исследователей. Поэтому наличие автономного и портативного источника энергии необходимо для обеспечения безопасного и комфортного пребывания удаленной местности.

**Ключевые слова** — элемент Пельтье, термогенерация энергии, автономное энергоснабжение, системы заряда литий-ионных аккумуляторов.

## CREATION OF POWER SUPPLY SOURCE BASED ON THERMOELECTRIC GENERATOR

V.D. Svistunov, M.S. Bogomolova, A.S. Lysova  
Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russian Federation  
E-mail: svistunov.vladimir@gmail.com

**Abstract** — The problem of lack of connection to the power grid is not only in front of relatively large remote settlements, but also in front of small pocket consumers - portable equipment, small electronics, etc. In the conditions of long stay of the person in the places remote from a civilization, sooner or later there is a question on maintenance with energy of the devices which constantly use modern people. During a research expedition or during a hiking trip, the absence of a mobile phone's lifetime can leave without communication and endanger the lives of researchers. Therefore, the availability of an autonomous and portable power source is necessary to ensure the safe and comfortable stay of a remote location.

**Key-words** — Element Peltier, thermal energy generation, autonomous power supply, lithium-ion battery charging systems.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена исследованиям, лежащим в области энергетики, и касается изучения и разработки источника электропитания на основе термоэлектрического генератора. Актуальность темы заключается в том, что в современном обществе необходимо использовать энергетические ресурсы максимально эффективно вследствие экономических причин и необходимости сохранять природные ресурсы. Конечный продукт данного исследования может быть полезен большому количеству людей, нуждающемуся в кратковременном автономном источнике электроэнергии.

### II. СОЗДАНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Работа модуля Пельтье как генератора электрического тока основана на эффекте Зеебека - возникновения термоэлектрического тока в замкнутой цепи последовательно соединенных разнородных проводников,

контакты между которыми имеют различную температуру. Эффект Зеебека используется для измерения температур с помощью термопары, которые представляют собой два разнородных металла, контакты которых находятся при разных температурах.

Эффект Пельтье (обратный к эффекту Зеебека), проявляется при прохождении тока через контакт двух разнородных металлов, где в зависимости от его напряжения, кроме нагревания проводников, выделяется или поглощается дополнительная теплота, при различном направлении тока.

В ходе работы над созданием источника электропитания были проведены исследования физических зависимостей элемента Пельтье[1,2]. В ходе проведения исследований была получена Вольт-Температурная зависимость реального элемента, которая представлена на Рис.1.

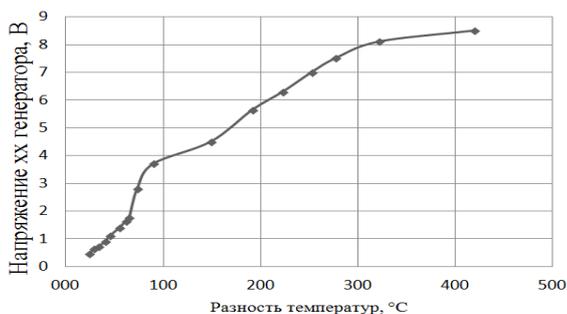


Рис. 1. Зависимость напряжения модуля Пелетье от разности температур

Она показывала какое напряжение холостого хода обеспечивал модуль Пелетье, при определённой разнице температур холодной и горячей части модуля.

Далее была построена компьютерная модель термогенерирующей установки на основе графической среды имитационного моделирования Simulink, которая включена в пакет пакет прикладных программ для решения различных задач. Модель была набрана из отдельных блоков, каждый из которых представляет собой модель того или иного физического объекта, написанную на встроенном языке Matlab. По построенной модели был проведен анализ разрабатываемой установки и сняты такие характеристики, как осциллограммы тока, напряжения и батареи. Структурная схема модели системы заряда литий-ионной аккумуляторной батареи в среде Simulink, представлена на Рис.2. Испытываемая модель в среде Simulink набирается из отдельных блоков, каждый из которых представляет собой модель того или иного физического объекта, написанную на встроенном языке программирования Matlab. Информация между блоками передается посредством сигналов, которые можно условно разделить на два типа: физические сигналы и Simulink-сигналы.

Физические сигналы представляют собой эквиваленты соответствующих величин: токов, напряжений, теплового излучения, потоков жидкости или газа, различных физических сил и т.д, и передаются по контурам в соответствии со своей физической природой.

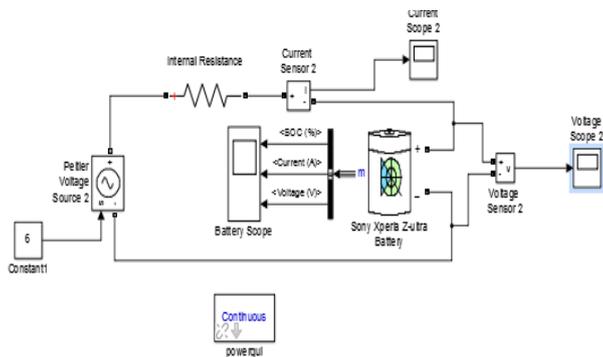


Рис. 2. Структурная схема модели системы заряда литий-ионной аккумуляторной батареи в среде Simulink

Результаты моделирования соответствовали требуемым параметрам, поэтому можно было приступить

к следующему этапу, на котором была собрана термогенерирующая установка(ТГУ).

Модель была собрана из простых материалов, которые нетрудно найти. В ходе испытаний она была усовершенствована и доработана. Конечный вариант установки представлен на Рис.3.

### III. ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Были проведены полевые испытания устройства в походе, что и является его основным назначением, а именно эксплуатация в условиях, далеких от цивилизации. ТГУ ставился на костер рядом с котелком, который предназначен для такого обслуживания. Однако была замечена некоторая инженерная ошибка, которая снижала эффективность генератора. Боковые стороны банки, содержащей воду, были в открытом доступе для огня, в следствии чего, вода нагревалась быстрее ожидаемого. Так как установка напрямую зависит от разницы температур на «горячей» и «холодной» стороне модуля Пелетье, это снижало эффективность генерации энергии.

Планируется дальнейшая работа над установкой, с целью совершенствования ее конструкции. Для этого возможно более плотная изоляция части корпуса с холодной водой от нагрева. Тем самым будет увеличена разность температур на двух сторонах модуля Пелетье, что увеличит генерируемую мощность.

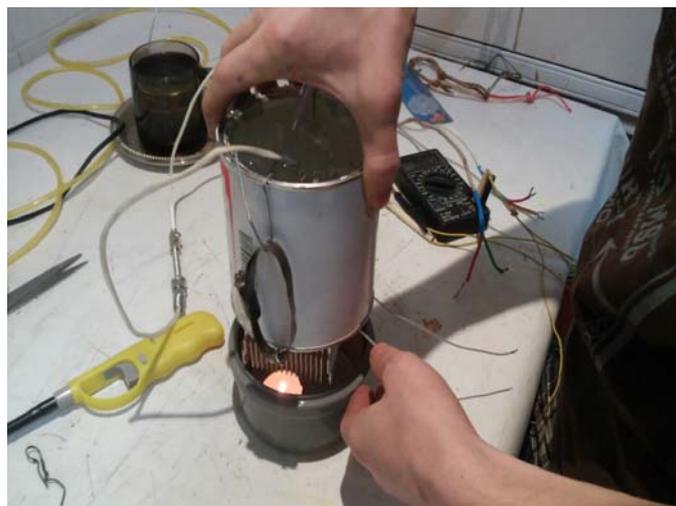


Рис. 3. Фотография термогенерирующей установки в работе

### Список литературы

- [1] Термоэлектрические элементы – О.И.Ильярский, Н.П.Удалов. – 1970. – 68 с.
- [2] Термоэлектрические генераторы – А.С.Бернштейн. – 1956. – 46 с.
- [3] Физика: Энциклопедия./ Под. Ред. Ю.В. Прохорова. - М.: Большая Российская Энциклопедия. – 2003. – 944 с.
- [4] Зисман Г.А. Курс общей физики. - М.: Наука. – 1972. – 366 с.
- [5] Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Высшая школа. – 1990. – 48 с.

# Требования к генерирующему оборудованию в части предоставления системных услуг по регулированию напряжения

В.А. Дьячков<sup>1</sup>, И.С. Окшин<sup>1</sup>

АО "СО ЕЭС"<sup>1</sup>

Москва, Россия

E-mail: okshin-is@so-ups

Генерирующее оборудование электростанций осуществляет как выработку активной мощности, так и выдачу или прием реактивной мощности. Регулирование реактивной мощности, как правило, не связано с дополнительными затратами, является стандартной функцией генерирующего оборудования, осуществляется по командам системного оператора и требует контроля качества его выполнения. Указанный контроль реализуется в рамках общей процедуры контроля готовности генерирующего оборудования к выработке электроэнергии и связан с оценкой исполнения команд на предоставление диапазона регулирования реактивной мощности и оценкой фактического диапазона регулирования реактивной мощности.

При сокращении диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования (далее – Диапазон) АО «СО ЕЭС» регистрирует показатель снижения Диапазона, приводящий к финансовым воздействиям (штрафам), стимулирующим реализовывать мероприятия по восстановлению Диапазона. В настоящее время показатель снижения Диапазона оценивается только на основании характеристик оборудования при установленной мощности. Подобный подход предоставляет возможности манипулирования характеристиками области допустимых режимов работы генерирующего оборудования по реактивной мощности, приводящими к фактическому сокращению Диапазона при отсутствии штрафных санкций. Данная ситуация требует разработки нового алгоритма определения показателя снижения Диапазона, исключающего возможность снижения допустимых выдачи и приема реактивной мощности при всех значениях генерации активной мощности без финансовых последствий для субъектов электроэнергетики.

*Ключевые слова: регулирование напряжения, генератор, электростанция, диапазон регулирования реактивной мощности.*

## Generating equipment requirements of voltage regulation auxiliary services providing

V. Dyachkov<sup>1</sup>, I. Okshin<sup>1</sup>

"SO UPS", JSC<sup>1</sup>

Moscow, Russia

E-mail: okshin-is@so-ups.ru

Power plants generating equipment generate both active and reactive power. Since reactive power producing is not associated with additional costs and is a standard function of the generating equipment as usual, this regulation is carried out by the commands of the system operator and requires quality control. This control is realized within the framework of the formal procedure of the generating equipment electricity generation availability assessment and is associated with the assessment of the commands for reactive power providing execution and the actual reactive power range.

In case of reactive power range of the generating equipment reduction (hereinafter referred to as the Range), SO UPS registers a Range reduction factor, leading to financial impacts (fees) that stimulate to restore the original Range. At present, the reduction of the Range is estimated only for the characteristics of the equipment at its installed power. This approach provides opportunities to manipulate the generating equipment Range characteristics by, leading to Range reduction without fees. This situation require a new algorithm for determining a reduction Range developing exclude the possibility of Range reduction for all values of active power generation without fees for equipment owner.

*Keywords: voltage regulation, generator, power station, range of reactive power.*

### I. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ГЕНЕРИРУЮЩЕМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Основной функцией генерирующего оборудования является производство активной мощности в целях

покрытия электропотребления. Однако, наряду с выполнением указанной функции, генерирующее оборудование электростанций осуществляет выдачу или прием реактивной мощности. Изменение режима работы генерирующего оборудования по реактивной мощности широко используется при управлении

электроэнергетическим режимом энергосистем по напряжению.

Регулирование реактивной мощности в подавляющем большинстве случаев не связано с дополнительными затратами и является стандартной функцией генерирующего оборудования. Указанное регулирование осуществляется по командам системного оператора и требует контроля качества его выполнения. Данный контроль реализуется в рамках формальной процедуры контроля готовности генерирующего оборудования к производству электрической энергии в части предоставления диапазона регулирования реактивной мощности.

В настоящее время реализуется процедура контроля готовности генерирующего оборудования к предоставлению диапазона регулирования реактивной мощности, которая предусматривает оценку двух показателей:

- качество выполнения команд Системного оператора на регулирование напряжения и/или реактивной мощности;
- предоставление полного объема диапазона регулирования реактивной мощности.

Оценка выполнения первого показателя осуществляется на основании формальных численных критериев (достижение целевых значений параметров электроэнергетического режима, указанных в командах Системного оператора).

Оценка выполнения второго показателя также в значительной степени формализована, однако до недавнего времени позволяла собственникам генерирующего оборудования сокращать диапазон регулирования реактивной мощности без возможности наложения штрафных санкций.

Ниже более подробно рассмотрены действующий и предлагаемый механизмы контроля готовности генерирующего оборудования в части предоставления диапазона регулирования реактивной мощности.

## II. ДЕЙСТВУЮЩАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Генерирующее оборудование должно находиться в постоянной готовности предоставления полного диапазона регулирования реактивной мощности. В случае заявленного участником оптового рынка сокращения диапазона регулирования реактивной мощности относительно базового диапазона (Рис.1) системный оператор регистрирует показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$  ( $R_{\text{диап},m}^g$ ), приводящий к финансовым воздействиям (штрафам), стимулирующим разработку и реализацию мероприятий по восстановлению исходного диапазона регулирования.

В настоящее время показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности определяется выражением (1).

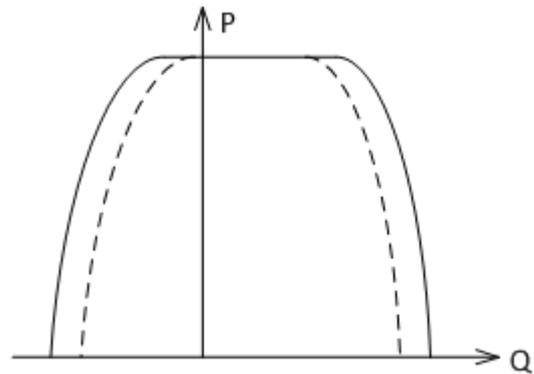


Рис.1. Сокращение диапазона регулирования реактивной мощности

$$R_{\text{диап},m}^g = \frac{Q_{\text{диап},\text{акт}}^g}{Q_{\text{диап},\text{баз}}^g} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{диап},\text{акт}}^g$  – значение диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$  в группе точек поставки (далее – ГТП) генерации  $j$  по состоянию на 01.01.2006 или определенное после изменения установленной активной мощности (Мвар);

$Q_{\text{диап},\text{баз}}^g$  – актуальное значение средневзвешенного за расчетный период диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$  в ГТП генерации  $j$  (Мвар), определяемое соотношением (2).

$$Q_{\text{диап},\text{акт}}^g = \frac{\sum_{i=1}^k (Q_{\text{диап},\text{акт},i}^g \cdot N_i)}{D_{\text{мес}}} \quad (2)$$

где  $k$  – количество различных диапазонов регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования в расчетном месяце  $m$ ;

$N_i$  – число часов работы генерирующего оборудования с диапазоном регулирования реактивной мощности  $i$  в расчетном месяце;

$D_{\text{мес}}$  – число часов в расчетном месяце;

$Q_{\text{диап},\text{акт},i}^g$  – актуальное значение диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , которое определяется соотношением (3).

$$Q_{\text{диап},\text{акт},i}^g = Q_{\text{акт},\text{макс},i}^g - Q_{\text{акт},\text{мин},i}^g \quad (3)$$

где  $Q_{\text{акт},\text{макс},i}^g$  – максимальное значение реактивной мощности актуального диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ ;

$Q_{\text{акт},\text{мин},i}^g$  – минимальное значение реактивной мощности актуального диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ .

При этом значения  $Q_{\text{диап,акт}}^g$  и  $Q_{\text{диап,баз}}^g$  определяются при установленной активной мощности генерирующего оборудования.

Показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности отношении каждой ГТП генерации  $j$  определяется аналогично в соответствии с выражением (4).

$$R_{\text{диап},m}^j = \frac{\sum_{g \in j} Q_{\text{диап,акт}}^g}{\sum_{g \in j} Q_{\text{диап,баз}}^g} \quad (4)$$

Приведенная методика оценки показателя снижения диапазона регулирования реактивной мощности имеет ряд существенных недостатков, которые позволяют участникам оптового рынка манипулировать характеристиками области допустимых режимов работы генерирующего оборудования по реактивной мощности, сокращая фактический диапазон регулирования реактивной мощности при отсутствии штрафных санкций. К основным недостаткам действующей методики относятся:

- отсутствие учета изменения диапазона регулирования реактивной мощности для величин активной мощности, отличных от установленной активной мощности генерирующего оборудования (Рис.2).
- отсутствие учета смещения диапазона регулирования реактивной мощности в область приема или выдачи реактивной мощности при сохранении величины базового диапазона регулирования (Рис.3).

В целях исключения вышеуказанных негативных последствий, существенно снижающих возможности привлечения генерирующего оборудования электростанций к управлению электроэнергетическим режимом энергосистем по напряжению и реактивной мощности, необходима корректировка методики определения показателя снижения диапазона регулирования реактивной мощности, исключающая возможность снижения выдачи или приема реактивной мощности без финансовых последствий для субъекта электроэнергетики.

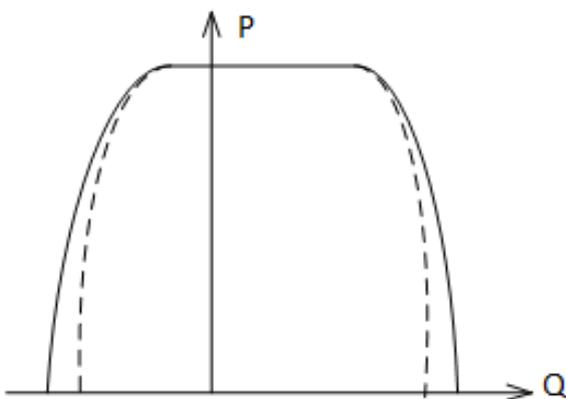


Рис.2. Сокращение диапазона регулирования реактивной мощности для величин активной мощности, отличных от установленной активной мощности генерирующего оборудования

В рамках решения вышеуказанной задачи системным оператором разработан новый алгоритм определения показателя снижения диапазона регулирования реактивной мощности.

### III. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ СНИЖЕНИЯ ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В соответствии с новым алгоритмом показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности определяется в соответствии со следующим расчетным выражением (5).

$$R_{\text{диап},m}^j = \sum_{g \in j} R_{\text{диап},m}^g \cdot K_g^g \quad (5)$$

где  $R_{\text{диап},m}^g$  – показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ ;

$K_g^g$  – коэффициент, характеризующий долю генерирующего оборудования  $g$  в ГТП генерации  $j$ .

Показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности каждой единицы генерирующего оборудования  $g$  определяется соотношением (6).

$$R_{\text{диап},m}^g = \frac{\sum_{i=1}^w (Q_{\text{диап,акт},g,i} / Q_{\text{диап,баз},g,i})}{w} \quad (6)$$

где  $w$  – количество интервалов активной мощности, в отношении которых осуществляется оценка предоставления диапазона регулирования реактивной мощности. При этом оценке подлежат значения реактивной мощности, соответствующие активной мощности в диапазоне от минимальной до максимальной активной мощности генерирующего оборудования,

$Q_{\text{диап,баз},g,i}$  – базовое значение диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , которое определяется соотношением (7).

$$Q_{\text{диап,баз},i}^g = Q_{\text{баз,макс},i}^g - Q_{\text{баз,мин},i}^g \quad (7)$$

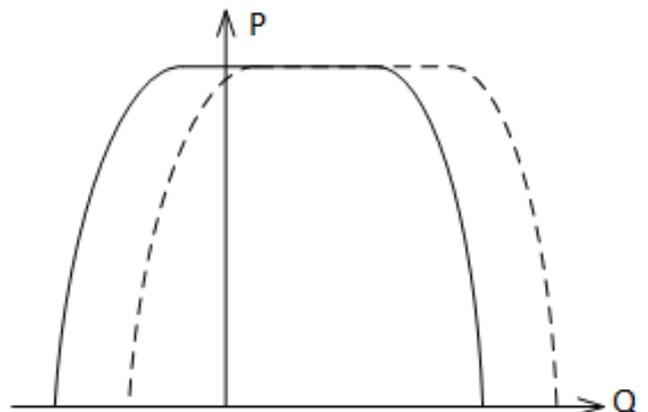


Рис.3. Смещение диапазона регулирования реактивной мощности в область выдачи реактивной мощности при сохранении величины базового диапазона регулирования реактивной мощности

где  $Q_{баз, макс, g, i}$  – максимальное значение реактивной мощности базового диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ ;

$Q_{баз, мин, g, i}$  – минимальное значение реактивной мощности базового диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ ;

$Q_{диап, акт, g, i}$  – актуальное значение диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , определяемое в соответствии с (8).

$$Q_{диап, баз, g, i} = \frac{\sum_{d=1}^k (Q_{диап, акт, g, i, d}^g \cdot N_i)}{D_{мес}} \quad (8)$$

где  $Q_{диап, акт, g, i, d}^g$  – актуальное значение диапазона регулирования реактивной мощности  $d$  генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ , определяется по (9).

$$Q_{диап, акт, g, i, d} = \min(Q_{акт, макс, g, i, d}; Q_{баз, макс, g, i, d}) - \max(Q_{акт, мин, g, i, d}; Q_{баз, мин, g, i, d}) \quad (9)$$

где  $Q_{акт, макс, g, i, d}$  – максимальное значение реактивной мощности актуального диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ ;

$Q_{акт, мин, g, i, d}$  – минимальное значение реактивной мощности актуального диапазона регулирования реактивной мощности генерирующего оборудования  $g$ , соответствующее значению активной мощности  $i$ .

$Q_{диап, баз, g, i}$  и  $Q_{диап, акт, g, i, d}$  определяются при одинаковых значениях активной мощности  $i$  генерирующего оборудования  $g$ .

Коэффициент, характеризующий долю генерирующего оборудования  $g$  в ГТП генерации  $j$ , определяется соотношением (10).

$$K_e^g = \frac{P_{уст, g}}{\sum_{g \in j} P_{уст, g}} \quad (10)$$

где  $P_{уст, g}$  – установленная активная мощность генерирующего оборудования  $g$  в ГТП генерации  $j$ .

Таким образом, в соответствии с новым алгоритмом оценки диапазона регулирования генерирующего оборудования по реактивной мощности, контролируется:

- величина диапазона регулирования реактивной мощности (разница между максимальным и минимальным значением реактивной мощности) для нескольких промежуточных величин активной мощности генерирующего оборудования, что

исключает возможность произвольной деформации характеристики регулирования реактивной мощности в диапазоне активных мощностей, отличных от установленной мощности генерирующего оборудования;

- отдельно диапазон регулирования реактивной мощности в режиме ее выдачи и в режиме ее потребления, что, в свою очередь, исключает произвольный сдвиг характеристики регулирования.

Кроме того, поскольку в состав ГТП генерации может входить генерирующее оборудование различной установленной мощности, в целях исключения непропорционального негативного влияния на показатель снижения диапазона регулирования реактивной мощности при изменении диапазона регулирования у генерирующего оборудования малой установленной мощности, расчет показателя снижения диапазона регулирования реактивной мощности осуществляется с учетом удельной доли каждой единицы генерирующего оборудования в общей установленной мощности ГТП генерации.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм определения показателя снижения диапазона регулирования реактивной мощности исключает возможность манипулирования характеристиками области допустимых режимов работы генерирующего оборудования по реактивной мощности, приводящего к сокращению фактического диапазона регулирования реактивной мощности при отсутствии штрафных санкций.

Применение предлагаемого алгоритма будет иметь следствием повышение ответственности собственников генерирующего оборудования в части соблюдения диапазонов регулирования реактивной мощности, позволит улучшить качество выполнения команд системного оператора, направленных на регулирование напряжения и увеличить надежность электроснабжения потребителей.

Новый алгоритм определения показателя снижения диапазона регулирования реактивной мощности принят 17 мая 2017 года решением Наблюдательного совета Ассоциации «НП Совет рынка» и вступает в действие с 1 января 2018 года.

#### Список литературы

- [1] Приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка «Регламент определения объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности» – 2010 – С. 10-13.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПИТАНИЯ БЫТОВЫХ ПРИБОРОВ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

О.С.Атрашенко<sup>1</sup>, А.Г.Сошинов<sup>1</sup>, В.С. Галушак<sup>1</sup>, Петренко С.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Камышинский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»  
г. Камышин, Россия

Вопрос электроснабжения от автономных источников питания становится все более актуальным в связи с повышением роста тарифов на электроэнергию и снижения ее качества. Одним из выходов из сложившейся ситуации авторы видят разработку электроснабжения постоянным током для жилищно-коммунального сектора. В статье приводятся примеры бытовых потребителей, которые смогут работать на постоянном токе, не теряя свои технические характеристики. Авторами создан стенд, с помощью которого можно практически проверить достоверность этого предположения.

*Ключевые слова — повышение тарифов, автономные источники, постоянный ток, бытовые потребители.*

## THE DIRECT CURRENT SUPPLY RESEARCH IN HOUSEHOLD APPLIANCES

O.S.Atrashenko<sup>1</sup>, A.G.Soshinov<sup>1</sup>, V.S. Galuschak<sup>1</sup>, Petrenko S.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kamyshin technological institute (branch) federal state budget high educational institute «Volgograd state technical university»  
Kamyshin, Russia  
E-mail: olgapasmenko@yandex.ru

The question of electrical power supply from independent power supplies becomes more and more urgent in connection with increase in growth of rates for the electric power and lowerings of its quality. One of outputs of the current situation authors see electrical power supply development by a direct current for housing-and-municipal sector. In article examples of home customers which will be able to work at a direct current are given, without losing the technical features. Authors created the bench by means of which it is possible to check reliability of this assumption practically.

*Keywords — increase in rates, independent sources, direct current, home customers.*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперты полагают, что в 2017 г. цены на электроэнергию возрастут в среднем на 7-15%. Однако, в этом году планируются дополнительные законодательные поправки. Согласно этому законопроекту, будет действовать ступенчатая тарификация для бытового сектора. Это означает, что потребители смогут оплатить по низкой цене 150 кВт•ч.

Решением этих проблем может стать развитие систем электроснабжения жилищно-коммунального сектора на основе автономных источников энергии. По оценкам энергетиков, к 2020 году доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе страны составит всего 1,5%. Из законодательных актов может сложиться впечатление, что в России созданы достаточные условия для развития ВИЭ на оптовом рынке. Тем не менее, выполнение намеченных целей находится под большим вопросом. Достигнуть 4,5% к 2020 году в нынешних условиях, по мнению многих экспертов, не удастся, так как это направление совершенно не поддерживается Минэнерго РФ [1].

Фактором, тормозящим развития альтернативной энергетики в России, является избыток генерирующих мощностей и как следствие, низкие цены на традиционные энергоносители, а также недостаток инвестиций.

Еще одним фактором, сдерживающим развитие ВИЭ, является отсутствие систем накопления и хранения электрической энергии на переменном токе промышленной частоты. Накопление и хранение электроэнергии в химических аккумуляторах возможно только на постоянном токе, при этом сложность преобразования постоянного тока в переменный для питания потребителей приводит к потере до 40% полученной энергии.

Следует заметить, что в современной бытовой технике, как правило, происходит преобразование переменного тока в постоянный, для его дальнейшего использования в схеме прибора. А это означает, что всем этим приборам тип питающего тока абсолютно безразличен, поскольку схема прибора адаптируется к входному напряжению и току [2].

Рассмотрим подробнее некоторые из них:

- импульсные блоки питания. Они предназначены для питания современной электроники: телевизоров, мониторов, компьютеров, зарядных устройств и т.д. В импульсных блоках входное напряжение преобразуется в постоянное и они работают в диапазоне напряжений от 100 до 250 В.

- термоэлектрические холодильники. Его принцип работы основан на Эффекте Пельтье. Они работают работающие от сети на 12 В и 24 В, имеют высокую надежность за счет отсутствия движущихся частей, малозумные, но перерасход электроэнергии возрастает с увеличением его объема;

- вентильные двигатели (инверторные). Они все чаще используются в бытовой технике: пылесосах, холодильниках, кондиционерах, в стиральных машинах. Вентильному двигателю безразлична форма питающего напряжения, т.к преобразует переменный ток в постоянный для регулирования рабочей скорости вращения мотора;

- нагревательные приборы. Они являются резистивной нагрузкой, в которой направление и форма тока не влияет на его тепловое действие. Все приборы, в том числе и биметаллические терморегуляторы будут работать на постоянном токе будут функционировать правильно.

Кроме того, промышленностью выпускаются аналогичное оборудование, работающее непосредственно на постоянном токе.

Для того, чтобы оценить возможность перехода от централизованной системы электроснабжения бытового сектора, необходимо исследовать возможность работы серийно выпускаемых бытовых приборов на постоянном токе.

При анализа современной литературы и научных статей, была найдена информация о разработке пилотного проекта для проведения технико-экономического сравнения схем электроснабжения на переменном и постоянном токе для двух однотипных домов офисно-бытовой техникой. Информации о его дальнейшей реализации и результатах исследования нет [2].

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является возможность перевода питания бытовых приборов серийного производства на постоянный ток повышенного напряжения.

Для проведения таких исследований авторами был создан экспериментальный стенд со следующими характеристиками: входное питание на переменном токе частотой 50 Гц, регулируемое однофазное напряжение 0-220 В; максимальный ток промышленной частоты 10А; выходное напряжение постоянного тока 0-220В, максимальная мощность потребления на постоянном токе 2 кВт.

Программа проведения экспериментов состоит из исследования приборов с коллекторными двигателями, нагревательных электроприемников, приборов СВЧ-группы, компьютерной техники и видео-, аудио-группы.

Проведение экспериментов, по разработанной авторами программе, позволило сделать выводы о возможности работы бытовых приборов на постоянном токе и определить пороговый уровень напряжения постоянного тока, при котором бытовой прибор развивает аналогичную мощность как если бы он питался переменным током промышленной частоты.

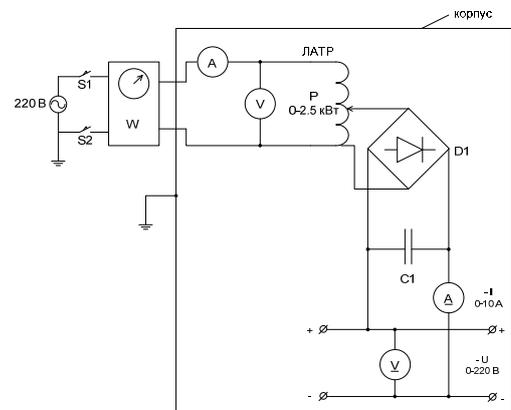


Рис.1 Схема экспериментального стенда

## III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение постоянного напряжения будет сопровождаться рядом трудностей: модернизация электропроводки, обеспечивающей полярность подключения, а так же устройств самих потребителей; разработка новых документов и стандартов для бытовых сетей постоянного тока[3].

При нарушении электроснабжения от сети постоянного тока, для ответственных потребителей должна быть предусмотрена система автоматического включения резерва. Он будет осуществляться от централизованного электроснабжения с преобразованием переменного тока в постоянный.

Предложенная авторами система электроснабжения постоянным током позволит более эффективно использовать ВИЭ напрямую без синхронизации и преобразования, что уменьшит потери энергии, снизит сроки окупаемости таких систем.

Снижение количества однофазной нелинейной нагрузки, по предварительной оценке экспертов, снизит потери электроэнергии до 20 %. Внедрение таких систем в масштабе страны снизит влияние нечетных гармоник трехфазной сети, что улучшит качество электрической энергии в целом.

Постоянный ток позволит повысить электробезопасность и уменьшить влияние электромагнитных полей на физиологию человека.

## Список литературы

- [1] Сухоручкина Т.Ю., Атрашенко О.С. Проблемы развития возобновляемых источников энергетики в России // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2016. № 2 (14). С. 40-43.
- [2] Яковлев Г.Н. Применение постоянного тока в электроснабжении социально-бытового сектора экономики с целью снижения потерь электроэнергии // Энергосовет. 2011. № 6 (19).С. 65-66
- [3] Кривошта Д. А., Янченко С.А. Оценка эффективности питания бытовой электроаппаратуры на постоянном токе // Потенциал современной науки. 2015. № 1 (9). С. 34-40.

# ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ СОБСТВЕННОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Ременюк Н.В.<sup>1</sup>, Минина В.А.<sup>1</sup>, Самойленко В.О.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия  
E-mail: [n.v.remenyuk@mail.ru](mailto:n.v.remenyuk@mail.ru), [ver.minina@gmail.com](mailto:ver.minina@gmail.com)

*Аннотация* - В связи с постепенным распространением распределенной фотоэлектрической генерации в отдельных энергосистемах в составе ЭЭС актуальным является исследование ее влияния на стратегию электропотребления в условиях розничного рынка электроэнергии и мощности. При наличии у потребителей собственной фотоэлектрической генерации оптимальная стратегия электропотребления зависит как от факторов, влияющих на мощность генерации и выработку электроэнергии, так и от параметров розничного рынка. При проведении исследования использовались методы математического анализа и оптимизации. При выполнении расчетов проводилось математическое моделирование покрытия графиков нагрузок фотоэлектрической генерацией. Подготовлены рекомендации по оптимизации графика электрической нагрузки при наличии собственной фотоэлектрической генерации с учетом сезонности, зависимости энергетических режимов генерации от погодных условий, степени соответствия поясного и истинного солнечного времени, выбора ценовых категорий розничного рынка. На основе проведенного анализа были сделаны выводы об оптимальной стратегии электропотребления в условиях розничного рынка электроэнергии при наличии потребительской фотоэлектрической генерации. Данные рекомендации актуальны для потребителей электроэнергии, а также для энергосбытовых и сетевых компаний при планировании технико-экономических показателей деятельности.

*Ключевые слова* - возобновляемые источники энергии (ВИЭ); солнечная энергетика; фотоэлектрическая генерация; суточный график потребления энергии; суточный график солнечной генерации; рынки электроэнергии.

## OPTIMAL STRATEGY OF ELECTRICAL ENERGY CONSUMPTION GIVEN DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION

Remenyuk N.V., Minina V.A., Samoylenko V.O.  
Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia  
E-mail: [n.v.remenyuk@mail.ru](mailto:n.v.remenyuk@mail.ru), [ver.minina@gmail.com](mailto:ver.minina@gmail.com)

*Abstract* - Due to the gradual spread of distributed photovoltaic (PV) generation in certain power systems of the United Power System, the issue of its influence on the strategy of power consumption in the retail electricity market is urgent nowadays. In case when consumers have their own PV generation, the optimal power consumption strategy depends upon factors influencing PV power and energy output as well as parameters of retail electricity market. The study includes methods of mathematical analysis and optimization. The calculations were carried out by means of a mathematical simulation of the coverage of the load graphs by PV generation. A guide for optimizing the electric load schedule using consumer's photovoltaic generation was made. The seasonality, the dependence of the energy generation modes upon weather conditions, the correspondence of local time and local solar time, and the price categories of the retail market are considered. Based on the analysis, the conclusions about the optimal strategy of electricity consumption in the retail electricity market in case when consumers have their own PV generation were made. These recommendations are relevant for consumers, for energy retailers and grid companies when planning technical and economic performance indicators.

*Key words* - renewable energy sources; solar energy; photovoltaic power generation; daily curve of energy consumption; daily curve of solar generation; energy markets.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых перспективных видов генерации на основе возобновляемые источники энергии (ВИЭ) является фотоэлектрическая (ФЭ) генерация [1]. В ходе работы был проведен анализ погодных условий Уральского региона в разные времена года на примере города Екатеринбурга. Дневная сумма солнечной энергии здесь составляет в летнее время 5,72 кВт\*ч/м<sup>2</sup> [2], что является средним показателем по России. К тому же, в [3] было показано, что регион обладает значительным потенциалом для внедрения фотоэлектрической генерации, что и происходит в настоящее время.

Постепенное распространение распределенной фотоэлектрической генерации в отдельных энергосистемах в составе единой энергетической системы (ЕЭС) вносит коррективы в стратегию электропотребления в условиях розничного рынка электроэнергии и мощности. Исследование этого влияния и анализ факторов, влияющих на оптимальную стратегию электропотребления, представлены в данной работе. Исследование проводилось для потребителей 1 и 2 ценовых категорий (ЦК), составляющих примерно 70%, от общего объема потребления юридическими лицами.

## II. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Исследование проводилось на основе фотоэлектрической панели SETC NES36-5-60M мощностью 60 Вт. Для фотоэлектрической панели была определена мощность для 4 сезонов. Расчеты выполнялись по формуле (1):

$$P_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{м}} \cdot I_{\text{солар}}}{P_{\text{инс}}} \quad (1)$$

где  $P_{\text{м}} = 60$  – максимальная мощность панели, (Вт);

$I_{\text{солар}}$  – интенсивность прямого излучения в течение дня, (Вт/м<sup>2</sup>);

$P_{\text{инс}} = 1000$  – мощность инсоляции на земной поверхности на одном квадратном метре, (Вт/ м<sup>2</sup>).

На следующем этапе проводилось математическое моделирование покрытия графиков нагрузок фотоэлектрической генерацией. Для этого строились графики цен на электроэнергию (ЭЭ) для двух ценовых категорий:

1 ценовая категория – расчеты по данному тарифу осуществляются для объемов потребления, определенных в целом за месяц.

2 ценовая категория – расчеты осуществляются для каждой зоны суток отдельно. Далее все полученные стоимости суммируются. Вторую ценовую категорию выбирают те потребители, которые имеют преимущественно внепиковый характер работы. Также был рассчитан сдвиг  $t_{\text{сдвиг}}$  астрономического времени точки потребления ЭЭ в положительную/отрицательную сторону относительно поясного времени между крайними координатами часовых поясов России по формуле (2). Например, для крайних точек 5 часового пояса (западная точка – Оренбургская область, восточная – Ханты-Мансийский Автономный округ (ХМАО)) расчет выглядит следующим

$$t_{\text{сдвиг}} = \frac{\pm \text{Долгота}}{15^\circ} + N_{\text{члп}} [\text{ч}] \quad (2)$$

образом:

где Долгота – координата граничной точки (восточная «-», западная «+»), (град);  $N_{\text{члп}}$  – номер часового пояса.

Для Оренбургской области расчет выглядит следующим образом:

$$t_{\text{сдвиг}}^{\text{Оренбургская обл.}} = \frac{-51^\circ}{15^\circ} + 5 = 1,6 \text{ ч} = 96 \text{ мин.}$$

Для ХМАО:

$$t_{\text{сдвиг}}^{\text{ХМАО}} = \frac{-86^\circ}{15^\circ} + 5 = -0,733 \text{ ч} = -44 \text{ мин.}$$

Таким образом, разница во времени между крайними точками 5 часового пояса составляет:

$$t_{\text{сдвиг}} = t_{\text{сдвиг}}^{\text{Оренбургская обл.}} + t_{\text{сдвиг}}^{\text{ХМАО}} = 96 + 44 = 140 \text{ мин} = 2 \text{ ч } 20 \text{ мин.}$$

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Графики генерации со сдвигом, совмещенные с графиками ценовых категорий представлены на рис. 1-4.

Можно заметить, что в разное время года продолжительность светового дня меняется и, соответственно, меняется мощность и выработка солнечной генерации. Минимум и максимум генерации приходится на дни зимнего и летнего солнцестояния, соответственно. Стоит также сказать, что на выработку солнечной энергии влияют такие факторы, как погодные условия: облачность, осадки, температура воздуха и т.д.

Для оценки возможности покрытия графиков нагрузок фотоэлектрической генерацией были построены графики долей покрытия нагрузки для 4 сезонов. Они показаны на рис. 5-8.

Таблица 1 – Сдвиг времени между крайними координатами часовых поясов России

Город	Долгота	Часовой пояс	Сдвиг	Город	Долгота	Часовой пояс	Сдвиг
Псковская обл.	-27,5	3	2 ч 34 м	Якутия	-105,5	9	2 ч 22 м
респ. Коми	-66			Якутия	-141		
Оренбургская обл.	-51	5	2 ч 20 м	Якутия	-139	11	1 ч 38 м
ХМАО	-86			Магадан. обл.	-163,5		
Красноярский кр.	-79	7	2 ч 14 м	Камчатский кр.	-155,5	12	2 ч 20 м
	-112,5			Чукотский АО	-190,5		

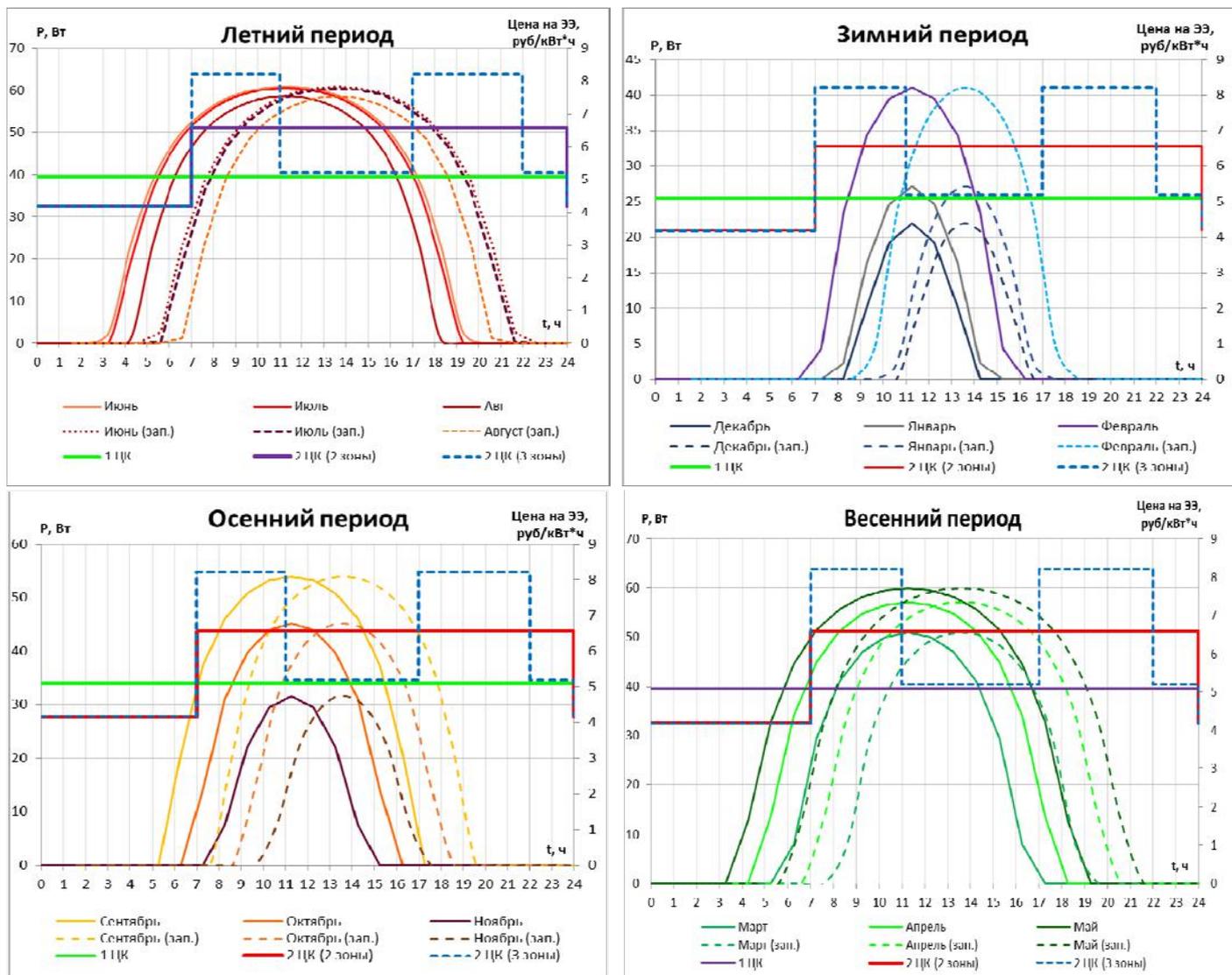


Рисунок 1-4 – Графики ФЭ генерации для 4 сезонов, совмещенные с графиками ценовых категорий, со сдвигом астрономического времени точки потребления электроэнергии в положительную (западную) и отрицательную (восточную) сторону относительно поясного времени

### III. Выводы и рекомендации

Исходя из полученных графиков генерации со смещением астрономического времени точки потребления электроэнергии в положительную или отрицательную сторону относительно поясного времени и графиков покрытия нагрузки фотоэлектрической генерацией, можно сделать следующие выводы:

#### 1. Для потребителей 1 ЦК:

В данном случае временной сдвиг не влияет на оптимальность потребления электроэнергии, т.к. на протяжении всего дня цена на энергию стабильна.

#### 2. Для потребителей 2 ЦК (2 зоны):

При расчете потребителей по данной ЦК наилучшим вариантом является сдвиг точки потребления энергии в положительную сторону, т.е. в сторону западной границы часового пояса. Тогда при самой высокой цене на энергию ФЭ генерацией будет покрываться: в зимнее и осеннее время года до 70% и 90% нагрузки

соответственно, а в летнее и весеннее - до 100% нагрузки.

#### 3. Для потребителей 2 ЦК (3 зоны):

В летнем периоде выгоден сдвиг времени точки потребления ЭЭ в отрицательную сторону (в сторону восточной границы часового пояса). В этом случае в утренние пиковые часы (7:00-11:00), где ЭЭ самая дорогая, ФЭ генерацией можно покрыть от 80 до 100% нагрузки, т.е. ФЭ панелью за это время будет вырабатываться от 48 до 60 Вт\*ч, а, в общем, за эти 5 часов - 280 Вт\*ч.

Для остальных периодов аналогично, выгодно смещение в отрицательную сторону. Тогда пик мощности будет попадать на период высокой стоимости ЭЭ, тем самым позволяя покрыть наиболее дорогую ЭЭ. В осенний и зимний период нагрузка покрывается лишь частично, но и это дает значительную экономию.

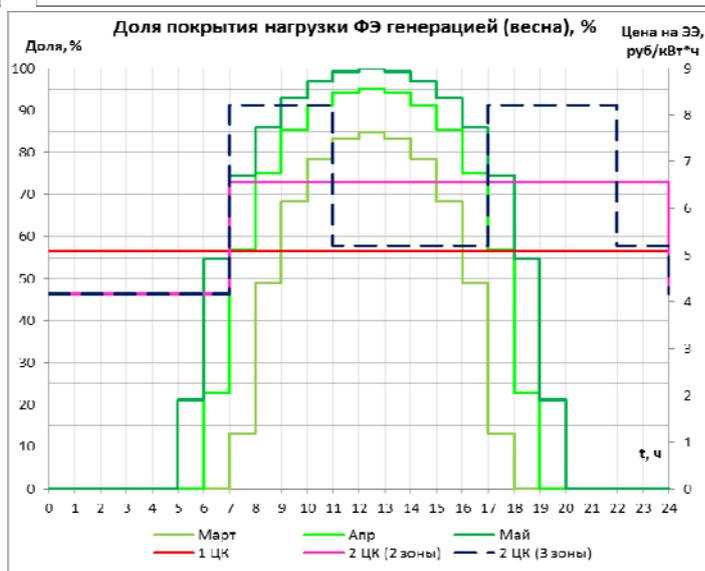
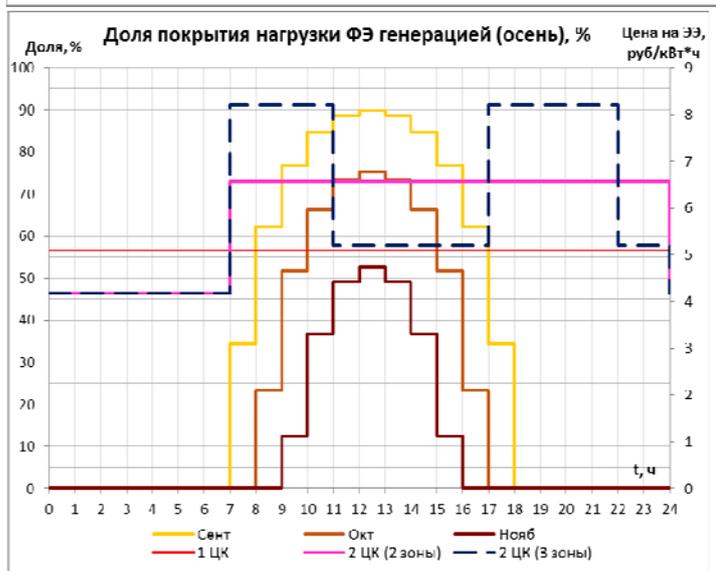
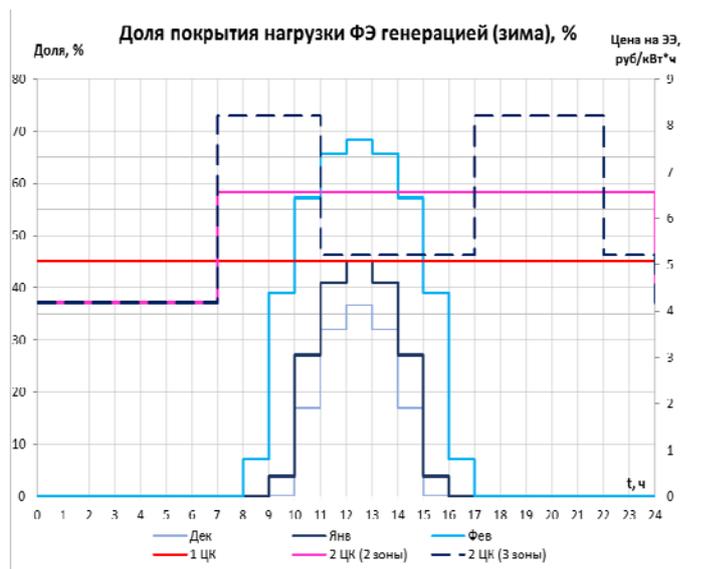
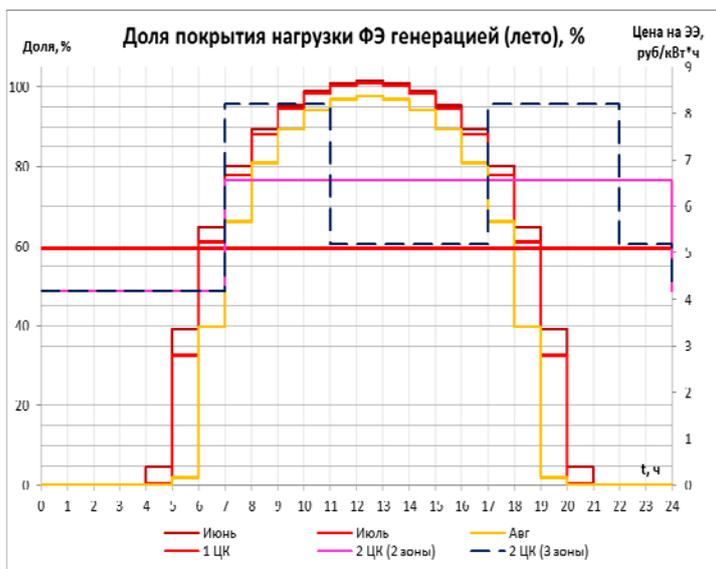


Рис. 5-8 – Графики покрытия нагрузки фотоэлектрической генерацией для 4 сезонов

Рекомендации: при сдвиге времени точки потребления ЭЭ в отрицательную сторону, следует использовать ФЭ генерацию для покрытия нагрузки, рассчитываемой по 2 ЦК с 3 зонами. А в случае, когда сдвиг происходит в положительную сторону – для 2 ЦК с 2 зонами.

Можно заметить, что в зимний и осенний сезоны пик нагрузки острее, по сравнению с летом и весной. В связи с этим зимой и осенью нагрузку необходимо планировать точнее, так как от этого сильно зависят затраты на оплату электроэнергии. Здесь же можно отметить, что графики ФЭ генерации зимнего и осеннего сезонов схожи друг с другом, так же, как и графики летнего и осеннего сезонов. Это отличается от сезонности потребления электроэнергии: зима-весна, лето-осень, что также необходимо учитывать при планировании.

### Список литературы

- [1] Картамышева Н. С., Картамышева Е. С., Вахрушин И. А., Трескова Ю. В. Экологические последствия развития солнечной энергетики [Текст] // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы III междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2015 г.). — СПб.: Свое издательство, 2015. — С. 59-62.
- [2] Сайт российского производителя солнечных батарей «SOLBAT-Солнечные батареи» [Электронный ресурс] // URL: <http://www.solbat.su/meteorology/insolation>
- [3] Ременько Н.В., Минина В.А., Самойленко В.О. Определение фактических характеристик фотоэлектрической генерации // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. –742с.

# Методический подход для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития электроэнергетической системы региона

К.С. Смирнов

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Иркутск, Россия

E-mail: k.smirnov@isem.irk.ru

**Аннотация** — Разработан методический подход для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития электроэнергетической системы региона. Даны рекомендации по выбору наиболее предпочтительного проекта экспорта электроэнергии из Восточной Сибири в Китай. Предлагаемый методический подход и модельный инструментарий может применяться для оценки эффективности экспортных проектов при разработке программ и схем развития электроэнергетики регионов.

**Ключевые слова** — комплексная оценка, эффективность, электроэнергетика региона, методический подход, экспорт электроэнергии, генерирующие мощности.

## A methodological approach to integrated assessment of comparative efficiency projects electricity exports in the conditions of uncertainty development of the electricity system in the region

Konstantin Smirnov

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Irkutsk, Russia

E-mail: k.smirnov@isem.irk.ru

**Abstract** — A methodological approach is developed to integrated assessment of comparative efficiency projects electricity exports in the conditions of uncertainty development of the electricity system in the region. The recommendations are given on how to select the most preferable variant of constructing the export-oriented power plants and transmission line for power export from East Siberia to China. The suggested methodological approach and model tools can be applied to assess the efficiency of export projects when developing the programs and plans on the regional development of the electric power industry.

**Keywords** — integrated assessment, efficiency, electric power industry of the region, methodological approach, electricity export, generating capacities.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Осуществление крупномасштабных экспортных проектов связано с решением ряда сложных задач. Для принятия обоснованных решений в этом направлении необходимо проведение детального и всестороннего анализа условий реализации и исследования возможных последствий таких шагов. Должна быть дана комплексная оценка стоимости ожидаемых затрат на реализацию новых проектов и тарифов на экспортируемую электроэнергию, возможностей и условий привлечения финансовых ресурсов для реализации проектов.

Теоретические и практические вопросы в области исследования эффективности экспорта электроэнергии и создания межгосударственных электрических связей

рассматривались в работах отечественных ученых: Л.С. Беляева [1], С.В. Подковальникова, В.А. Савельева, И.М. Волькенау [2], Л.Д. Хабачева [2,3], Н.И. Воропая, В.В. Ершевича, Ю.Н. Руденко [4] и др. К данной проблеме проявляли интерес и зарубежные ученые: J.Y. Yoon, D.W. Park [5], К.Н. Chung, В.Н. Kim [6], и др.

Исследованию энергетических проблем в условиях неоднозначности исходной информации посвящены работы Л.А. Мелентьева [7-9], А.А. Макарова [9-11], Л.С. Беляева [1, 12-13], А.Н. Зейлигера [2,3], Б.Г. Санеева [14,15], Ю.Д. Кононова [16], В.А. Смирнова [17], Л.М. Шевчук [18], С.А. Смоляк [19] и др.

Проведенный автором обзор работ показывает, что вопросам прогнозирования развития региональных электроэнергетических систем (ЭЭС) и проектам экспорта

электроэнергии в условиях неоднозначности исходной информации уделено большое внимание как в работах отечественных, так и зарубежных ученых. В то же время не достаточно изученной является очень важная в методическом и особенно в практическом плане проблема, связанная с комплексной оценкой сравнительной эффективности и выбором наиболее предпочтительных проектов экспортных проектов, вписываемых в ЭЭС региона в долгосрочной перспективе.

## II. ОПИСАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Реализация методического подхода предполагает выполнение следующих шагов (рис. 1):

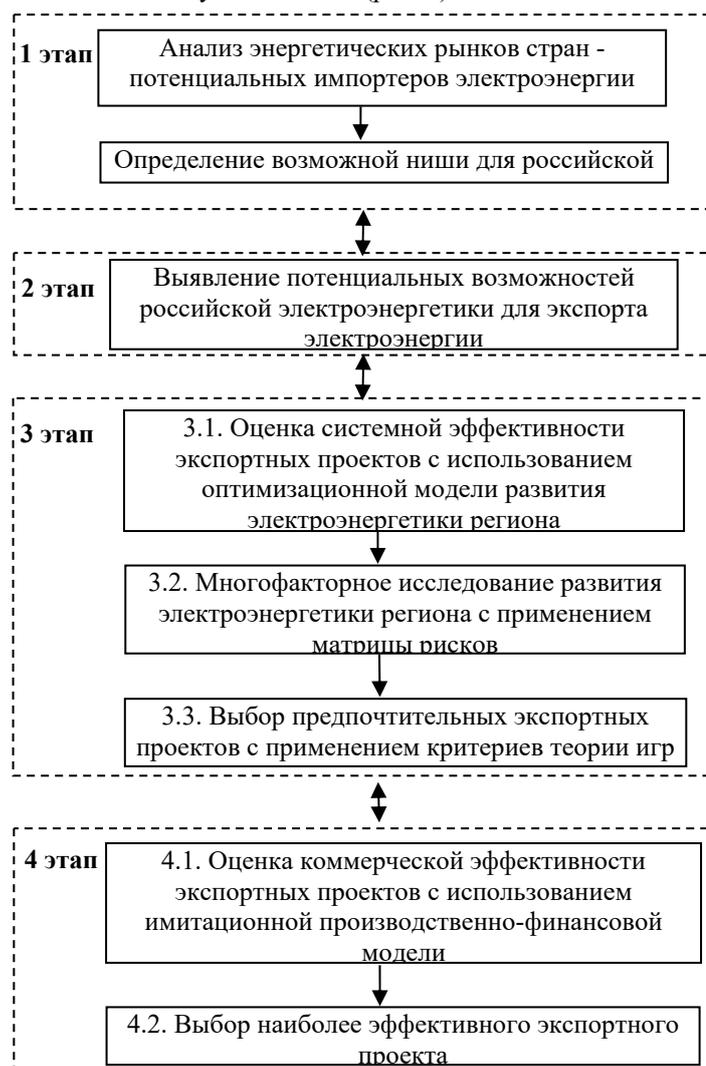


Рис. 1. Принципиальная схема методического подхода для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития ЭЭС региона

1. Проведение анализа энергетических рынков электроэнергии стран импортеров российской электроэнергии и определение возможной ниши для российской электроэнергии.

2. Выявление потенциальных возможностей российской электроэнергетики для экспорта электроэнергии с использованием модели ТЭК страны (расход топлива на электростанциях, замыкающие затраты

(цены на топливо), внешние перетоки электроэнергии, уровни электропотребления, объем экспорта электроэнергии)

3. Оценка системной эффективности экспортных проектов;

3.1. Построение оптимизационной модели развития ЭЭС региона с поочередным включением в нее каждого из рассматриваемых проектов сооружения экспортных электростанций и линий электропередачи в регионе;

3.2. Многофакторное исследование развития электроэнергетики региона с применением матрицы рисков;

3.3. С применением критериев теории игр осуществляется выбор наиболее эффективных проектов сооружения экспортных электростанций в регионе. Условия такого выбора зависят от вида используемого критерия теории игр. Применение формальных критериев теории игр позволяет выявить проекты неразличимых с точки зрения применяемых критериев. Такие проекты принято считать равноэкономичными. Существование равноэкономичных проектов обуславливает принципиальную невозможность полной формализации процесса принятия решений в условиях неопределенности развития ЭЭС региона.

4. Оценка коммерческой эффективности экспортных проектов (в качестве основного критерия коммерческой эффективности на этом этапе рассматривается минимальный тариф на экспортную электроэнергию в местах перехода границы)

4.1. Построение имитационной производственно-финансовой модели для оценки коммерческой эффективности отобранных на третьем этапе экспортных проектов

4.2. Выбирается вариант более предпочтительный с точки зрения коммерческой эффективности

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с предложенным методическим подходом (рис. 1) ниже представлена комплексная оценка сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в Китай в условиях неопределенности развития электроэнергетической системы региона, на примере Восточной Сибири.

Выполненный автором анализ различных источников по развитию китайской электроэнергетики, показал:

1) При реализации сценариев с повышенными уровнями электропотребления, дефицит электроэнергии в Китае к 2030 г. оценивается в 100 млрд. кВт·ч;

2) Доминирующую роль в структуре потребления энергоносителей в Китае играет уголь, самый экологически вредный в плане высокого содержания золы и серы. Он является главным источником загрязнения воздуха в стране. Несмотря на развитие ТЭС на газе доля установленной мощности на угле в структуре ТЭС прогнозируется к 2030 г. достаточно высокой - 86-93%. В связи с этим, Китай будет вынужден в больших количествах закупать электроэнергию из соседних стран, для энергообеспечения растущих потребностей в стране и снижения загрязнения воздуха.

3) Ниша для российской электроэнергии на китайском рынке оценивается в 16-20 млрд кВт·ч.

Выявление потенциальных возможностей российской электроэнергетики для экспорта электроэнергии с использованием модели ТЭК страны, показало, что объем экспорта из Восточной Сибири может составить 16 млрд кВт.ч. Это зависит от пропускной способности ЛЭП (3,2 ГВт) и числа часов работы (5000). Выдача электроэнергии в Западную Сибирь должна составить около 24 млрд кВт.ч.

Рассматриваются четыре возможных проекта экспорта электроэнергии [20], которые поочередно вписываются в модель развития электроэнергетической системы региона:

*Проект 1 – КЭС на ковыктинском газе на юге Иркутской области;*

*Проект 2 – КЭС на канско-ачинском угле (КАУ) в Красноярском крае;*

*Проект 3 -КЭС на угле в Республике Бурятия и Забайкальском крае (Олонь-Шибирская КЭС; Новая Харанорская КЭС);*

*Проект 4 – КЭС на мугунском угле в Иркутской области.*

Для оценки эффективности проектов экспорта электроэнергии используется разработанная автором статическая, оптимизационная, многоузловая модель развития электроэнергетики Восточной Сибири.

Расчеты проводились для четырех возможных вариантов сочетаний внешних условий развития электроэнергетики Восточной Сибири: низкие и высокие прогнозируемые уровни электропотребления в регионе (195-245 млрд кВт.ч), низкие и высокие цены на топливо (газ, уголь) для электростанций. Прогнозируемые цены на топливо для электростанций по региональным энергосистемам (РЭС) Восточной Сибири приведены в табл. I.

Таблица I. ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ЦЕНЫ\* НА ГАЗ И УГОЛЬ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ В 2030 Г., ДОЛ./Т У.Т.

РЭС	Газ		Уголь	
	Низкие цены	Высокие цены	Низкие цены	Высокие цены
Хакасская, Тывинская	-	-	40	55
Красноярская	115	150	40	55
Иркутская	115	155	45	60
Бурятская, Читинская	-	-	55	75

\* без учета инфляции

Далее в соответствии с предлагаемым методическим подходом строится матрица рисков (табл. II).

Таблица II. МАТРИЦА ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ НА РАЗВИТИЕ ЭЭС ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ, МЛН. ДОЛ.

Проекты	Условия развития ЭЭС				Критерии*	
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Лапласа	Сэвиджа
X <sub>1</sub>	0	0	25,7	27,9	<b>13,4</b>	27,9
X <sub>2</sub>	157	141	77	68	111	157
X <sub>3</sub>	221	234	132	164	188	234
X <sub>4</sub>	27,6	26,9	0	0	13,6	<b>27,6</b>

\* в столбце отмечен лучший вариант по соответствующему критерию

Вариант 1-4 соответствует четырем возможным вариантам сочетаний внешних условий развития электроэнергетики Восточной Сибири

На основании полученной матрицы рисков производится выбор проектов экспорта электроэнергии наиболее предпочтительных с точки зрения принятых в работе критериев теории игр (Лапласа, Сэвиджа).

Исследования показали, совместное применение формальных критериев теории игр позволяет выявить два проекта экспорта электроэнергии (табл. II), которые с точки зрения применяемых критериев можно считать равноэкономичными. В данном случае наиболее предпочтительными являются: по критерию Лапласа - вариант 1, предполагающий в качестве экспортной электростанции сооружение Ковыктинской КЭС на газе, по критерию Сэвиджа - вариант 4 - при сооружении Мугунской КЭС на угле.

Равноэкономичность выбранных выше экспортных проектов не делает окончательный выбор решения произвольным. Обязательное требование к выбираемому проекту – его практическая реализуемость.

В работе, с использованием разработанной автором имитационной производственно-финансовой модели, дается оценка коммерческой эффективности отобранных на третьем этапе двух экспортных проектов и делается выбор из них окончательного проекта, предлагаемого к реализации.

При выборе окончательного проекта сооружения экспортных электростанций предпочтение отдается проекту, обеспечивающему минимальный тариф на экспортную электроэнергию в местах перехода границы экспортных линий электропередачи с Китаем. Тариф определяется как минимально приемлемая для экспортера (России) цена на электроэнергию (без учета акцизов и пошлин), которая компенсирует все эксплуатационные издержки (включая плату за выбросы CO<sub>2</sub>), инвестиционные затраты и обеспечивает получение приемлемой прибыли на вложенный капитал.

При расчетах минимальных тарифов приняты следующие исходные посыпки:

- расчетный период службы электростанций составляет: для Ковыктинской КЭС на газе - 30 лет, для Мугунской КЭС на угле – 35 лет;
- расчетный период срока службы экспортной ЛЭП ±500 кВ – 25 лет;
- внутренняя норма доходности – 15%;
- источники финансирования – акционерный капитал;
- ставки налогов приняты по действующей в Российской Федерации системе налогообложения: налог на прибыль – 20 %;
- срок окупаемости КЭС – 18 лет;
- срок окупаемости ЛЭП – 15 лет;
- прогнозируемая цена на ковыктинский газ - 130-175 долл./1000 м<sup>3</sup>, на мугунский уголь - 23-30 долл./т

Результаты расчетов экспортных тарифов на границе с Китаем приведены в таблице III.

Таблица III. Тариф на электроэнергию на границе с Китаем, ц/кВт·ч

Показатель	КЭС	
	Ковыктинская	Мугунская
Тариф, всего	7,9-8,8	10,1-10,6
В том числе:		
генерация	6,5-7,4	8,7-9,2
передача	1,4	1,4

Из таблицы III видно, что проект сооружения экспортной КЭС на ковыктинском газе (на юге Иркутской области) с передачей электроэнергии по линии постоянного тока до границы с Китаем является более предпочтительным (по принятому критерию) по сравнению с проектом сооружения экспортной КЭС на мугунском угле в Иркутской области.

#### IV. Выводы

1. Разработан методический подход для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития ЭЭС региона, позволяющий:

а) провести анализ энергетических рынков электроэнергии стран импортеров российской электроэнергии и определить возможную нишу для российской электроэнергии;

б) выявить потенциальные возможности российской электроэнергетики для экспорта электроэнергии с использованием модели ТЭК страны

в) с использованием разработанной автором оптимизационной модели определить оптимальный состав энергетических объектов развития ЭЭС региона, необходимый для ее приспособления к различным внешним условиям и намечаемым экспортным проектам, и связанные с этим суммарные приведенные затраты;

г) на основе полученной информации построить матрицу затрат и матрицу экономических рисков и с помощью принятых критериев теории игр (Лапласа, Сэвиджа) сделать выбор наиболее эффективных (неразличимых с точки зрения принятых критериев) экспортных проектов;

д) с использованием разработанной автором имитационной производственно-финансовой модели дать оценку коммерческой эффективности экспортных проектов.

2. Проведена оценка системной эффективности четырех экспортных проектов в Восточной Сибири для экспорта электроэнергии в Китай: Ковыктинская КЭС на газе на юге Иркутской области; КЭС на канско-ачинском угле в Красноярском крае; КЭС на угле в Республике Бурятия и Забайкальском крае (Олонь-Шибирская КЭС; Новая Харанорская КЭС); КЭС на мугунском угле в Иркутской области. Проекты сооружения экспортных КЭС на ковыктинском газе и мугунском угле в Иркутской области с передачей электроэнергии по линии постоянного тока до границы Китая (район г. Забайкальска), являются более предпочтительными, по

сравнению с другими рассмотренными экспортными проектами в Восточной Сибири.

3. Дана оценка коммерческой эффективности (реализуемости) выбранных экспортных проектов. При этом предпочтение отдается проекту, обеспечивающему минимальный тариф на экспортную электроэнергию.

#### Список литературы

- [1] Беляев Л.С., Подковальников С.В., Савельев В.А., Чудинова Л.Ю. Эффективность межгосударственных электрических связей. Новосибирск: Наука, 2008.–239 с.
- [2] Волькенау И.М., Зейлигер А.Н., Хабачев Л.Д. Экономика формирования электроэнергетических систем. -М.: Энергия, 1981. - 320 с.
- [3] Зейлигер А. Н., Малкин П.А., Хабачев Л.Д. Вопросы обоснования развития межрегиональных и межгосударственных сетевых связей //Энергетическое строительство. - 1994. - № 3. - С. 2-4.
- [4] Воропай Н.И., Ершевич В.В., Руденко Ю.Н. Развитие межнациональных энергообъединений - путь к созданию мировой электроэнергетической системы. - Иркутск, 1995 - 28 с. - (препринт СЭИ СО РАН, 1995; № 10).
- [5] Yoon J.Y., Park D.W. Economic Analysis Methodology of Power System Interconnections considering conventional economic benefits and environmental effects URL: [http://www.iceec-con.org/papers/2002/papers/Vol No.1/1\\_pso/ps050.pdf](http://www.iceec-con.org/papers/2002/papers/Vol No.1/1_pso/ps050.pdf) (дата обращения: 10.10.12).
- [6] Chung K.-H., Kim B. H. Economic Feasibility on the Interconnected Electric Power Systems in North-East Asia URL: <http://www.jeet.or.kr/ltpksweb/pub/pubfpfile.aspx?ppseq=367> (дата обращения: 25.09.12).
- [7] Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. - 2-е изд., пере-раб. и доп. - М.: Наука, 1983. - 456 с.
- [8] Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики: Учеб.пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.:Высш.школа, 1982. -319 с.
- [9] Макаров А. А., Мелентьев Л. А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства.– Новосибирск: Наука, 1973. – 276 с.
- [10] Методы и модели согласования иерархических решений // Под ред. А.А.Макарова - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1979. - 240 с.
- [11] Макаров А.А., Веселов Ф.В., Волкова Е.А., Макарова А.С.. Методические основы разработки перспектив развития электроэнергетики. – М.: ИНЭИ РАН, 2007. – 103 с., ил.11.
- [12] Исследование эффективности межгосударственных электрических связей в Северо-Восточной Азии с применением математического моделирования / Л.С.Беляев, В.А.Савельев, Л.Ю. Чудинова и др. // Изв.РАН. Энергетика. -2000. -№5. - С.55-65.
- [13] Системный подход при управлении развитием электроэнергетики / Л.С. Беляев, Г.В. Войцеховская, В.А. Савельев и др. / под ред. Л.С. Беляева, Ю.Н. Руденко – Новосибирск: Наука, 1980, 240 с.
- [14] Макарова А.С., Соколов А.Д., Санеев Б.Г. Метод согласования двухуровневой иерархии линейных моделей в условиях неопределенности. -В кн.: Иерархия в больших системах энергетики. -Иркутск: СЭИ СО РАН СССР, 1978.-Т.2.-С.173-191.
- [15] Санеев Б.Г. Энергетическая кооперация России и стран Северо-Восточной Азии // Регион: экономика и социология. - 2004.-№ 1. - С. 136-144.
- [16] Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Оценка конкурентоспособности электростанций / Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. // Электрические станции. - 2009. - № 6. - С. 22-26.
- [17] Смирнов В.А. Проблемы повышения гибкости в энергетике. – М: Наука. – 1989.
- [18] Шевчук Л.М. Риск-анализ в задачах стратегического планирования для крупных энергетических компаний / Л.М. Шевчук, А.С. Лукьянов, А.А. Кудрявцев // Изв. РАН. Энергетика. – 2000. – № 2. – С. 52–64.
- [19] Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов в условиях риска и неопределенности (теория ожидаемого эффекта). - М.: Наука, 2002. – 182 с.
- [20] Лагерев А. В., Ханаева В. Н., Смирнов К. С. Приоритеты и перспективы развития электроэнергетики Восточной Сибири. // «Энергетик» №8 2011, с. 2-7.

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ РЕШЕНИИ ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАНЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Ю.П. Кубарьков<sup>1</sup>, Я.В. Макаров<sup>1</sup>, К.А. Голубева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет"

Самара, Россия

E-mail: tsara.cuba@yandex.ru

*Аннотация* - Расширение отношений на рынке электроэнергетики, высокие требования по качеству, а также надежности электроснабжения, рост технологических процессов, которые влияют на режимы работы электрических установок, непременно приводит к обязательной оценке их воздействия и на проблему оптимизации параметров схем электроснабжения. На данный момент оптимизационные задачи приобретают всё большую значимость в отрасли электроэнергетики. Образуется иерархия огромных управляемых систем, в которых управление функционированием, развитием можно осуществлять только при помощи современных оптимизационных методов (алгоритмов). Особенно важным является оптимизация задач электроэнергетики в расчетах режимов работы электрической сети с использованием современных методов, с целью предоставления показателей надёжности и экономических показателей. К оптимизационным задачам в электроснабжении осуществляется внедрение методологических подходов, объединяющих ряды задач, в зависимости от исходной информации (технической и экономической), и обоснованность решения конкретной данной задачи оптимизационным алгоритмом. Методы поиска оптимального значения разделяют на две основные группы: классические и алгоритмические. Применение современного методологического подхода при разработке, реконструкции, усовершенствовании электроэнергетических систем даст возможность для эффективного решения распределения заданных суммарных мощностей компенсирующих установок в узлах как радиальных, так и магистральных схем сети электроснабжения. Рассмотренный методологический подход при решении задач оптимизации электроснабжения даёт возможность сформировать больше десятка задач в электроснабжении со стороны свойств энергосистемы, которые выражены с помощью внедрения математических моделей.

*Ключевые слова:* методы оптимизации; методологический подход; режимы работы; параметры схем электроснабжения; математическая модель.

## METHODOLOGICAL APPROACH FOR MAKING THE MAIN CHALLENGES OF ELECTRICAL NETWORK OPTIMIZATION FOR EFFICIENT SOLUTION OF DISTRIBUTED PARAMETERS OF ELECTRICAL SUPPLY CIRCUITS

Y.P. Kubarkov<sup>1</sup>, Ya.V. Makarov<sup>1</sup>, K.A. Golubeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University,

Samara, Russian Federation

E-mail: tsara.cuba@yandex.ru

*Abstract* - Expansion of relations in the electric power market, high quality requirements, as well as reliability of power supply, the growth of technological processes that affect the operating modes of electrical installations, inevitably leads to an obligatory assessment of their impact and the problem of optimizing the parameters of power supply schemes. At the moment, optimization tasks are becoming increasingly important in the electric power industry. A hierarchy of huge controllable systems is formed, in which the management of functioning and development can be carried out only with the help of modern optimization methods (algorithms). Especially important is the optimization of the tasks of the electric power industry in calculating the operating modes of the electric grid using modern methods, with the aim of providing indicators of reliability and economic indicators. Optimization tasks in electric power supply implement methodological approaches that unite the series of tasks, depending on the initial information (technical and economic), and the reasonableness of the solution of a given problem by the optimization algorithm. The methods for finding the optimal value are divided into two main groups: classical and algorithmic. The application of the modern methodological approach in the development, reconstruction and improvement of electric power systems will enable an efficient solution of the distribution of the given total capacities of compensating installations in the nodes of both radial and trunk circuits of the power supply network. The considered methodological approach in solving problems of optimization of power supply makes it possible to generate more than a dozen tasks in power supply from the side of the power system properties, which are expressed through the introduction of mathematical models.

*Key-words* - optimization methods; methodological approach; modes of operation; parameters of power supply schemes; mathematical model.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергетическая система представляет собой совокупность электроустановок, которые взаимосвязаны для обеспечения электрической энергией производственных объектов номинального качества.

Расширение отношений на рынке электроэнергетики, высокие требования по качеству, а также надежности электроснабжения, рост технологических процессов, которые влияют на режимы работы электрических установок, непременно приводит к обязательной оценке их воздействия и на проблему оптимизации параметров схем электроснабжения [1].

На данный момент оптимизационные задачи приобретают всё большую значимость в отрасли электроэнергетики. Электроэнергетикой пронизывается всё народное хозяйство и образуется иерархия огромных управляемых систем, в которых управление функционированием, развитием можно осуществлять только при помощи современных оптимизационных методов (алгоритмов).

На основании этого, актуальной задачей является оптимизация задач электроэнергетики в расчетах режимов работы электрической сети с использованием современных методов, с целью предоставления показателей надёжности и экономических показателей.

К оптимизационным задачам в электроснабжении осуществляется внедрение методологических подходов, объединяющих ряды задач, в зависимости от исходной информации (технической и экономической), и обоснованность решения конкретной данной задачи оптимизационным алгоритмом [2].

Рассмотренный методологический подход при решении задач оптимизации электроснабжения даёт возможность сформировать больше десятка задач в электроснабжении со стороны свойств энергосистемы, которые выражены с помощью внедрения математических моделей.

Сформировано несколько видов задач оптимизации электроснабжения, которые требуют в комплексе определения характерных параметров электрооборудования и режимов работы энергосистем. Они в свою очередь обеспечивают безотказную работу указанной структуры, учитывая ограничения технических характеристик, которые определяют качество функционирования [2, 3].

Применение современного методологического подхода при разработке, реконструкции, усовершенствовании электроэнергетических систем даст возможность для эффективного решения распределения заданных суммарных мощностей компенсирующих установок в узлах как радиальных, так и магистральных схем сети электроснабжения. По статическим данным отказов электрооборудования выводятся показатели надежности, на основе которых определяется и объясняется оптимальная периодизация проведения технического обслуживания электрооборудования [2].

## II. ОБЗОР МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Осуществление одновременных и взаимосвязанных процессов производства, передачи и распределения электрической энергии присуще энергосистемам в целом, а не её отдельным элементам. Взять потоки мощностей по линиям, которые соответствуют пределам статической устойчивости энергосистемы, они как правило не равны предельному потоку той же линии, которая взята отдельно [3].

Производственно-экономическую систему электроснабжения подразделяют на два типа - динамическую и статическую.

Под динамической системой имеется ввиду система с переменными во времени параметрами и характеристиками.

Анализируя ряд фундаментальных работ, которые посвящены проблемам оптимизации [1,2,3,4,5], оптимизационные задачи в электроснабжении потребителей подразделяются на два типа.

К первому типу относится выбор оптимальных схемных решений электроснабжения, электрический расчет схем, чтобы обеспечить технические характеристики электроустановок в течение определения эксплуатационно-технических характеристик. Ко второму типу относят задачи режимов, прогнозирование надежности и логичности наилучшей периодичности профилактического обслуживания электрооборудования и так далее.

Смысл задач электроснабжения второго типа заключен в поиске, а также учете всех определяющих системных свойств, которые выражены с помощью математических моделей. С их использованием можно составить достаточно полноценную картину поведения системы, имеющие экстремальные значения параметров электроустановок и методы определения рабочей области параметров, которая наиболее оптимальна.

Методы поиска оптимального значения разделяют на две группы: классические и алгоритмические [3].

Динамическое программирование максимума Понтрягина, дифференциальное исчисление [3,4], вариационное исчисление [4] представляют собой группу классических методов.

Алгоритмические методы подразделяются на детерминированные и случайные. К детерминированным методам относятся итерационные, градиентные, направленного перебора, линейного программирования, нелинейного программирования. К случайным методам относятся методы Монте – Карло и методы случайного перебора [4].

Под специфичностью оптимизационных задач электроснабжения понимается необходимость внедрения и классических, и алгоритмических методов, ввиду того, что в них появляется необходимость комплексного определения требуемых характеристик электрических установок и режимов работы энергосистем, которые обеспечивают оптимальный уровень безотказности данной топологии, учитывая ограничения технических

характеристик, которые определяют качество функционирования.

К основным важным направлениям сохранения соответствующей надежности электроснабжения можно отнести математическую формализацию нормированных допустимых значений, коэффициентов статической устойчивости одновременно с сохранением динамической устойчивости [4, 5]. Таким образом, когда производится экономическая оптимизация электроснабжения, показатель надежности выражается в виде системы ограничений.

Трудность учета особенностей оптимизационных задач заключается в ограничении применения моделей оптимизации, которые имеют с точки зрения общности решения задач, но с некоторыми недостатками, которые заключаются в обязательном внедрении итерационных методов оптимизации, так как показатели надёжности имеют в большем числе случаев нелинейный характер.

К примеру сказать, допустимость безотказной работы одностранформаторной подстанции, с последовательным соединением линий электропередач, силового трансформатора, разъединителя, выключателя и др. посредством интенсивности отказов определяется как вероятность безотказной работы всех элементов в течении времени  $t$  [5]:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n \exp \left[ - \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(tdt) \right] \quad (1)$$

где  $\lambda_i(t)$  - интенсивность отказов.

Допустимость безотказной работы систем электроснабжения с резервированием характеризуется надежностью как основных электроустановок, так и устройств АВР, также выражающиеся через экспоненциальные законы.

Применяют аналитические методы в электроснабжении для того, чтобы определить экстремум целевой функции, связывают с весовыми сложностями. Для преодоления таковых вводят достаточно большое число допущений и упрощений, которые приводят к тому, что итоговые результаты аналитической оптимизации практически трудно реализуемы, даже для простых схем. Таким видом недостатка не обременены алгоритмические методы, которые учитывают исключительно способ отыскания экстремума [5].

Все методы оптимизации имеют этапы:

- разработка модели системы;
- выбор критерия оптимальности;
- выбор целевой функции и ограничений;
- поиск оптимального решения и анализ полученных погрешностей [5].

Системную модель строят на основе задач оптимизации, учитывая ограничения, а также на основе требуемой точности и объема имеющейся действительной исходной аналитической информации о системе электроснабжения и функционально-количественной взаимосвязи электрических установок.

Важно обозначить, что следует использовать реальную исходную информацию для получения практической ценности.

В таком ключе модели электроснабжения, которые описываются математически и устанавливают количественные взаимосвязи между элементами модели, будут экономическими, так как электроснабжение относится к числу систем, структуры которых считаются достаточно хорошо известными [5]. К таким можно отнести вероятностные модели надежности энергосистемы, логико-вероятностные методы расчетов надежности, периодизация профилактического обслуживания основного силового электрооборудования на основании параметров потока отказов, выбор мест установки батарей, которые компенсируют реактивную мощность и описываются в интервале времени нормальной системой независимых дифференцируемых уравнений, которые связывают к выходные параметры системы с параметрами состояния (E) и управляемыми параметрами (Π) (профилактические работы и др.).

$$U_i(\Pi, E, t) = \varphi_i(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_N, E_1, E_2, \dots, E_m, t) \quad (2)$$

где

$$i = 1, 2, 3, \dots, k; \quad N + M = k, \quad a \quad t_1 \leq t \leq t_2,$$

с ограничением в виде

$$\left. \begin{aligned} T_{z'} \leq T_z(\Pi, E, t) \leq T_z'' \\ \mathcal{E}_y \leq \mathcal{E}_y(\Pi, E, t) \leq \mathcal{E}_z'' \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Следующим шагом осуществляется выбор критерия оптимальности. В качестве такого критерия чаще имеются ввиду экономические критерии, которые представляют собой минимум финансовых, сырьевых, энергетических, трудовых затрат и др. Уместно указать, что во многих задачах электроснабжения, которые имеют различные инвестиции и различные издержки производства, в виде экономического функционала применяют приведенные затраты.

В таких транспортных задачах электроснабжения как ограничение передаваемой мощности по существующим линиям электропередач, учитывая допустимый нагрев, расчет передачи мощности через транспортные узлы и т.д., целевая функция представляет собой сумму произведений удельных стоимостей  $Z_{ij}$  на величины передаваемых мощностей  $X_{ij}$  от узла  $i$  к узлу  $j$ :

$$Z = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} z_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $n, m$  - число источников и число потребителей соответственно.

Чтобы оптимизировать такие функции, необходимо составить транспортную матрицу с применением симплекс-метода, распределительного метода потенциалов.

Особенную группу составляют задачи оптимизации при случайной изначальной информации [6]. К данной группе можно отнести расчет оптимальной периодичности проведения профилактических ремонтов

основного электрооборудования, изменения напряжений в узлах эксплуатируемых систем электроснабжения, задачи расчетов мощности нагрузок и др., которые решаются при помощи методов статического программирования. В таких задачах случайные величины, которые являются коэффициентами  $Z_i$  целевой функции, должны заменяться их математическими ожиданиями с последующим получением детерминированного эквивалента целевой функции:

$$M[z] = M[z_1]x_1 + M[z_2]x_2 + \dots + M[z_n]x_n \rightarrow \text{extr.} \quad (5)$$

Если коэффициенты  $b_i$  или  $\alpha_{ij}$  являются случайными величинами, то, детерминированными эквивалентами  $j$ -го ограничения будут соответственно выражения:

$$\sum_{i=1}^n a_{ji}x_i \leq M[b_j] + \eta\sigma[b_j] \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n M[a_{ji}]x_i + \eta \left\{ \sum_{i=1}^n \sigma[a_{ji}]x_i \leq b_j, \quad j = 1, 2, \dots, m, \right.$$

где  $\eta$  - значение стандартной случайной величины, вычисляемое по значению вероятности  $P_j$  каждого  $j$  ограничения.

Общая целевая функция задач с несколькими (многими) критериями и параметрами электроснабжения записывается в виде:

$$Z_{об} = \sum_{k=1}^S \frac{\alpha_k z_k}{z_{кнор}} \rightarrow \text{max.} \quad (7)$$

где  $z_k$  - целевая функция, которая выражает  $k$ -й критерий.

$Z_{кнор}$  - нормированное значение  $k$ -й целевой функции;

$\alpha_k$  - коэффициент  $k$ -й целевой функции;

$S$  - количество принятых критериев.

При делении  $z_k$  на нормированное значение  $Z_{кнор}$  в итоге приводит каждую из целевых функций к единым относительным единицам.

Решение задач с несколькими критериями не требует специфичности по сравнению с задачами, имеющие один критерий.

### III. ВЫВОДЫ

Оптимизационные задачи приобретают всё большую значимость в отрасли электроэнергетики. К оптимизационным задачам в электроснабжении осуществляется внедрение методологических подходов, объединяющих ряды задач, в зависимости от исходной информации.

Методологический подход при решении задач оптимизации электроснабжения даёт возможность сформировать больше десятка задач в электроснабжении со стороны свойств энергосистемы, которые выражены с помощью внедрения математических моделей [6].

Необходимость применения как классических так и алгоритмических методов является особенностью задач оптимизации электроснабжения потребителей. Ведь они нуждаются в комплексном определении требуемых характеристик электрических установок и режимов работы энергосистем, которые обеспечивают оптимальный уровень безотказной работы данной топологии, учитывая ограничения технических характеристик, которые определяют качество функционирования.

### Список литературы

- [1] Кубарьков Ю.П., Голубева К.А. Управление уровнем напряжения и потерь в электрических сетях с активно-адаптивными элементами // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, 9 – 13 ноября 2015, Иваново. – В 2 т.
- [2] Fakhm H., Colas F., and Guillaud X., Real-time simulation of multi-agent system for decentralized voltage regulation in distribution network, IEEE Power and Energy Society General Meeting (2011), 1-7.
- [3] Пилипенко Н.В., Сиваков И.А. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности инженерных систем и сетей. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 274 с.
- [4] M. J. Dolan, E. M. Davidson, I. Kockar, G. W. Ault, McArthur, and S.D.J., "Distribution Power Flow Management Utilizing an Online Optimal Power Flow Technique " IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 2, pp. 790-799, May 2012.
- [5] CLT Borges, DM Falcao. Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses, and Voltage Profile. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna. 2003.
- [6] R Jahani, A Shafiqhi Malekshah, H Chahkandi Nejad. Applying a new advanced intelligent algorithm for optimal distributed generation location and sizing in radial distribution systems. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011; 5(5): 642-649.

# Стратегия участия в торгах на оптовом рынке электроэнергии энергосбытовой компании, действующей в крупном промышленном энергетическом узле

А.И. Юлдашева, А.В. Малафеев

ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова"  
Магнитогорск, Россия  
alinayuldasheva1@gmail.com

*Аннотация* — Работа посвящена задаче выбора оптимальной стратегии при торгах на рынке на сутки вперед для энергосбытовых компаний (ЭСК). При формировании ценовых заявок использованы положения теории ожидаемой полезности. Для учета противоречивых критериев выигрыша и риска при выборе ценовой заявки применена двухкритериальная оптимизация на основе множества Парето. Для прогнозирования равновесных цен использованы методы математической статистики. Предложен подход к учету предпочтений при выборе вариантов ценовых заявок сбытовой компанией. Разработана методика формирования наиболее выгодной ценовой стратегии ЭСК.

*Ключевые слова* — оптовый рынок электроэнергии; энергосбытовая компания; оптимальная ценовая стратегия; промышленные потребители; ожидаемая полезность.

## Strategy of participation in trades on a wholesale electricity market for a retail energy sales company in condition of a large industrial energy hub

A.I. Iuldasheva, A.V. Malafeev

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Magnitogorsk, Russian Federation  
alinayuldasheva1@gmail.com

*Abstract* — The work is devoted to the choice of an optimal strategy for trading on the day-ahead market for energy sales companies (ESC). The formation of price bids used the provisions of the theory of expected utility. To take into account the contradictory criteria for winning and risk in the selection of a price bid, two-criteria optimization based on the Pareto set is applied. For the prediction of equilibrium prices, the methods of mathematical statistics are used. An approach to the accounting of preferences in the selection of options for price bids by a sales company is proposed. The methodology for the formation of the most advantageous price strategy for ESC has been developed.

*Keywords* — wholesale electricity market; retail energy sales company; optimal price strategy; industrial consumers; expected utility.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Торговля электрической энергии на оптовом рынке осуществляется с использованием основных рыночных механизмов: 1) рынок на сутки вперед (РСВ); балансирующий рынок (БР); 2) рынок регулируемых договоров (РД); 3) свободные договора купли-продажи (СДД). В рамках торговли на РСВ поставщики и покупатели подают ценовые заявки, в которых указывают, какой объём электрической энергии, в какой час и по какой цене они готовы поставить и купить соответственно. На основе данных заявок формируются кривые предложения и спроса на электроэнергию. На пересечении этих кривых определяется равновесная цена, по которой все поставщики, подавшие ценовые заявки с

указанием такой же или более низкой цены, а также все покупатели, подавшие заявку с указанием такой же или более высокой цены, продают и покупают электрическую энергию.

Энергосбытовая компания в крупном узле нагрузки с градообразующим предприятием (как правило – гарантирующий поставщик) способна за счет выбора стратегии участия в торгах повлиять на равновесную цену в связи с хорошей прогнозируемостью нагрузки предприятия. Такая стратегия позволит формировать ценовые заявки с наибольшим выигрышем, а также снизить розничные цены для потребителей третьей–шестой ценовых категорий, что может способствовать повышению спроса на электроэнергию. Таким образом, данная задача является актуальной на сегодняшний день.

## II. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Вопросам оптимального поведения на спотовом рынке электроэнергии – рынке на сутки вперед – посвящено большое количество работ, однако большая их часть рассматривает стратегии для генерирующих компаний. Участие в торгах покупателей – энергосбытовых компаний (ЭСБ) – рассмотрено слабо.

В [1] используется марковская модель изменения режима, а также разностный метод временного обучения с целью разработки стратегии генерирующей компании. Факторный анализ и стохастическое программирование использованы для формирования оптимальных ценовых заявок в условиях Пиренейского рынка электроэнергии в работе [2]. Работа [3] посвящена созданию вероятностной модели функционирования рынка электроэнергии, в которой конкурентная структура включает в себя энергетические пулы с централизованным оптимальным планированием. Модель генерации учитывает требуемую степень резервирования. При оценке операционного риска учитывается неопределенность нагрузки. Кривые риска используются для прогнозирования необходимости быстрого ввода резерва генерирующей мощности. Модель оптового рынка, предполагающего спотовые и форвардные сделки, представлена в [4] виде двухуровневой игры с моделью равновесия по Нэшу. Модель рынка на сутки вперед с одновременной оптимизацией на основе спроса на электроэнергию и резервную мощность разработана в [5]. Методика основана на использовании множества Парето и эволюционного алгоритма. Учитывается влияние уровней напряжения на потребляемую мощность.

Определению узловых цен на основе метода неопределенных множителей Лагранжа посвящена работа [6]. Определение локальной маржинальной цены на основе генетического алгоритма рассмотрено в статье [7]. В этой же работе предложена распределенная модель потерь. Для формирования среды поддержки принятия решений в условиях функционирования рынков электроэнергии, мощности и системных услуг в статье [8] рассмотрена модель поведения участников рынка на основе мультиагентного подхода. Разработке стратегии генерирующей компании с целью максимизации прибыли посвящена работа [9]. Для оптимизации графика выработки мощности предложен генетический алгоритм, показана его высокая вычислительная эффективность. Количественной оценке прибыли и риска в условиях функционирования спотового рынка и рынка двусторонних договоров посвящена работа [10]. Для учета неопределенности цен на спотовом рынке использованы модель Васичека и метод Монте-Карло. Разработке торговой стратегии генерирующей компании посвящена работа [11], в которой использован алгоритм «прыгающей лягушки». Положения теории управляемого хаоса в сочетании с динамической моделью Курно использованы в [12] применительно к дуополистической электроэнергетике. В [13] рассмотрена методика планирования деятельности генерирующих компаний на сутки вперед на основе стохастического моделирования с учетом неопределенности цен на электроэнергию и вынужденных отключений энергоблоков в условиях многоаукционных рынков электроэнергии.

Оценка риска для владельцев распределенной генерации и построение оптимальной стратегии

розничной торговли рассмотрена в [14]. Модель поведения участников рынка в результате молчаливого сговора, представляющая собой модель с равновесными ограничениями, рассмотрена в [15]. Принятию решений в условиях неопределенности, когда одним из факторов неопределенности является развитие распределенной генерации, посвящена работа [16]. Задача формирования стратегии торгов с учетом изменения спроса рассмотрена в работе [17]. Использован метод смешанного целочисленного линейного программирования.

## III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Крупные ЭСК (например, такие гарантирующие поставщики (ГП), как ООО «Магнитогорская энергетическая компания», ПАО «Челябэнергосбыт») могут за счет выбора наилучшей стратегии участия в торгах на РСВ влиять на равновесную цену. За основу взята модель равновесия Нэша, часто используемая как в отечественных, так и в зарубежных работах, в которой предполагается, что ни один из участников рынка не в состоянии повлиять на равновесную цену, если другие участники не изменят свои ценовые стратегии. Вследствие того, что рынок электроэнергии представляет собой олигополию, для описания ценовой конкуренции будем использовать модель Бертрана, согласно которой в случае некооперативной игры генерирующих компаний (ГК) устанавливают цену на уровне предельных издержек, учитывая, что РСВ в РФ предполагает маргинальное ценообразование (по ГК с наиболее дорогой электроэнергией из участвующих в покрытии нагрузки для рассматриваемого часового интервала). При этом необходимо учитывать тот факт, что спрос на электроэнергию низкоэластичен. Использование модели Курно затруднено, т.к. она предполагает, что функции издержек всех ГК должны быть известны всем участникам рынка.

Выбор оптимального варианта ценовой заявки [20] будем осуществлять с использованием множества Парето, построенного на плоскости «доход  $V$  – риск  $R$ ». Отношение ГП к риску будем учитывать путем использования кривых безразличия  $V(R)$  [19]. Все варианты, находящиеся на такой кривой, в одинаковой степени устраивают ГП. Каждый ГП характеризуется семейством таких кривых. Для ГП, не склонных к риску, такие кривые будут выпуклыми вниз. Для определения предпочтений при выявлении допустимых ценовых заявок будем использовать положения теории ожидаемой полезности. Также будем считать функцию полезности для ГП выпуклой вниз.

## IV. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Рассмотрим предложенную методику на примере ЭСК ООО «Магнитогорская энергетическая компания», крупнейшим потребителем которой является ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

На основе анализа динамики цен за предыдущие периоды предложена методика выбора оптимальной ценовой заявки. Согласно действующему регламенту определения равновесных цен [18] для ГТП потребления указывается до трех сочетаний «цена-объем» на одну часовую подзаявку, а для ГТП, закрепленных за гарантирующим поставщиком или ЭСО с потребителями 1 или 2 ценовых категорий всего 2 сочетания. В

соответствии с этим составлены 5 вариантов ценовых заявок для 24 декабря 2016 г. В таблице 1 приведены варианты ценовых часовых подзаявок для периода 18:00-19:00 ч.

Таблица I. ВАРИАНТЫ ЦЕНОВЫХ ЧАСОВЫХ ПОДЗАЯВОК (18:00-19:00 ч)

Подзаявка	Цена Ц, руб/МВтч	Объем P, МВт	Максимальная цена Ц <sub>max</sub> , руб/ МВтч	Минимальная цена Ц <sub>min</sub> , руб/ МВтч
1	1 328,37	558,44	1 301,37	1 301,37
	1 301,37	584,67		
2	1 303,33	567,23	1 336,98	1 303,33
	1 336,98	548,49		
3	1 311,33	560,83	1 323,35	1 311,33
	1 323,35	567,02		
4	1 306,14	577,91	1 321,63	1 306,14
	1 321,63	570,66		
5	1 315,67	553,08	1 325,33	1 315,67
	1 325,33	543,68		

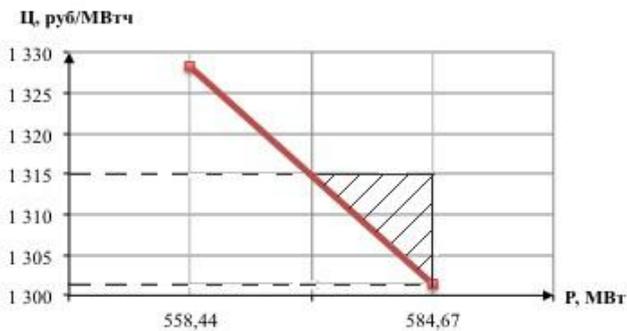


Рис. 1. Соотношение между объемом и ценой покупаемой электроэнергии для подзаявки 1.

Рассмотрим методику определения значений риска и выигрыша на примере подзаявки 1 (рис. 1). Результаты вычислений для всех подзаявок приведены ниже в таблице 2.

1. На основе ценовых подзаявок принимаем значение равновесной цены (1315 руб/МВтч). Данному значению соответствует значение мощности равное 572 МВт.

2. Значение выигрыша будет определяться как площадь многоугольника, ограниченного линиями с координатами: 1 - (P<sub>p</sub>; Ц<sub>p</sub>), (P<sub>max</sub>; Ц<sub>p</sub>) и 2 - (P<sub>max</sub>; Ц<sub>min</sub>), (P<sub>max</sub>; Ц<sub>p</sub>).

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ ВЫИГРЫШЕЙ И РИСКОВ

Подзаявка	Равновесная цена Ц <sub>p</sub> , руб/ МВтч	Мощность соответствующая равновесной цене P <sub>p</sub> , МВт	Максимальная мощность P <sub>max</sub> , МВт	Выигрыш V, руб/ч	Риск R, руб
1	1315	572	584,67	86,36	13,37
2	1320	558	567,23	76,96	16,98
3	1318	565	567,02	6,72	5,35
4	1312	575	577,91	8,53	9,63
5	1320	550	553,08	6,66	5,33

3. Значение риска как разница между равновесной и наибольшей ценой в заявке.

Соотношение значений рисков и выигрышей для предложенных выше ценовых заявок приведено на рис. 2. Для учета противоречивых критериев выигрыша и риска при выборе ценовой заявки применена двухкритериальная оптимизация на основе множества Парето. Ломаная на рис. 2 может быть интерпретирована как оболочка Эдджворта-Парето [21]. В качестве линий уровня функции полезности (кривых безразличия) приняты кривые, задаваемые уравнением (1):

$$V = U + k(R/R_{max})^2, \quad (1)$$

где U – некоторое заданное значение функции полезности; R<sub>max</sub> – наибольшее значение риска из рассматриваемых сочетаний; k – коэффициент, принятый в данном случае равным 100.

Тогда при использовании кривых безразличия, выпуклых вниз, что соответствует отрицательному отношению к риску со стороны гарантирующего поставщика, получаем в качестве оптимального сочетания «риск-выигрыш» точку с координатами (13,37; 86,36) касания средней из кривых безразличия, что соответствует варианту 1 в табл. II.

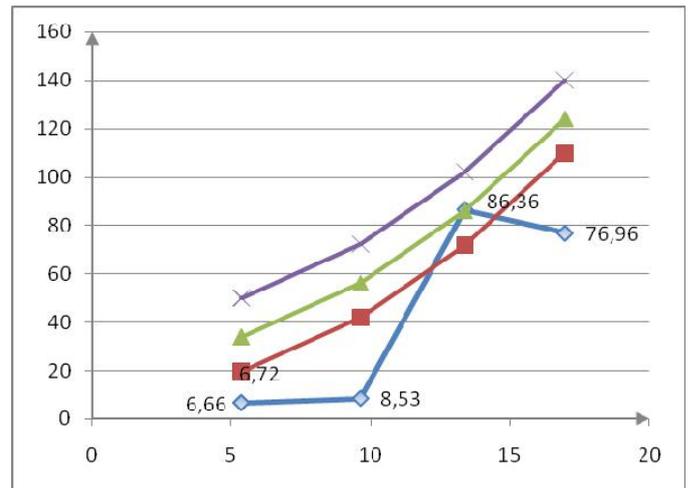


Рис. 2. Соотношение значений выигрышей (по оси ординат) и рисков (по оси абсцисс) для ценовых подзаявок

## V. ВЫВОДЫ

1. Как показал анализ литературных источников, основное внимание уделяется вопросам деятельности на оптовом рынке электроэнергии генерирующих компаний, участие же на этом рынке покупателей – энергосбытовых компаний освещено весьма слабо.

2. Наиболее выгодная стратегия участия энергосбытовой компании на оптовом рынке электроэнергии заключается, в первую очередь, в формировании часовых комбинаций «цена - объем» (часовых подзаявок), обеспечивающих оптимальное сочетание «выигрыш - риск» на каждый час плановых суток.

3. Для формирования оптимальных часовых подзаявок в настоящей работе предложена методика,

основанная на двухкритериальной оптимизации с использованием множества Парето.

4. Отношение к риску со стороны энергосбытовой компании предлагается учитывать с использованием кривых безразличия (зависимостей выигрыша от риска) в квадратичной форме, представляющих собой линии уровня функции полезности.

5. При практическом использовании методики необходимо для каждого часа плановых суток наметить к рассмотрению несколько вариантов подзаявок, каждый из которых указать в осях «выигрыш - риск». Количество ценовых ступеней в соответствии с действующими регламентами оптового рынка принимается равным двум – для гарантирующих поставщиков, трем – для свободных энергосбытовых компаний. Касание множества этих точек кривых безразличия позволит определить оптимальный вариант.

6. Рассмотрено использование разработанной методики на примере ООО «Магнитогорская энергетическая компания», являющейся одним из гарантирующих поставщиков на территории Челябинской области, поставляющей на розничном рынке электроэнергию крупным промышленным потребителям третьей и четвертой ценовых категорий.

### Список литературы

- [1] Yang, S., Yao, J. A learning method to evaluate a generation company's bidding strategy in the electricity market. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, January 2014, vol. 22, issue 1, pp. 34-42.
- [2] Muñoz, M. P., Corchero, C., Heredia, F.-J. Improving electricity market price forecasting with factor models for the optimal generation bid. *International Statistical Review*. August 2013, vol. 81, issue 2, pp. 289-306.
- [3] Ehsani, A., Ranjbar, A. M., Fotuhi-Firuzabad, M. Optimal and reliable scheduling of competitive electricity markets-a probabilistic approach. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V. )*, October 2007, vol. 32, issue 2B, pp. 281-300.
- [4] Holmberg, P. Strategic Forward Contracting in the Wholesale Electricity Market. *Energy Journal*. 2011, vol. 32, issue 1, pp. 169-202.
- [5] Surender Reddy, S., Abhyankar, A. R., Bijwe, P. R. Co-optimization of energy and demand-side reserves in day-ahead electricity markets. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, April 2015, vol. 16, issue 2, pp. 195-206.
- [6] Mahnitko, A., Umbrashko, I. Algorithm of nodal prices determination for inhomogeneous networks. *Journal of Electrical & Electronics Engineering*. December 2009, vol. 2, issue 2, pp. 43-47.
- [7] Murali, M., Kumari, M., Sydulu, M. Estimation of locational marginal price in a restructured electricity market with different loss cases using seed genetic algorithm. *Arabian Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V. )*, February 2014, vol. 39, issue 2, pp. 1089-1106.
- [8] Farshad, M. Multiagent-based simulation of simultaneous electricity market auctions in restructured environment, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2015, vol. 23, issue Sup.1, pp. 2240-2252.
- [9] Georgilakis, P. S. Genetic algorithm model for profit maximization of generating companies in deregulated electricity markets. *Applied Artificial Intelligence*. July 2009, Vol. 23 Issue 6, pp. 538-552.
- [10] Hayashi, T., Kita, H., Tanaka, E., Hasegawa, J. A study on bid strategies for electric power suppliers in bilateral market considering spot market. *Electrical Engineering in Japan*. December 2007, vol. 161, issue 4, pp. 1-11.
- [11] Jonnalagadda, V. K., Dulla Malleshm, V. K., Bidding strategy of generation companies in a competitive electricity market using the shuffled frog leaping algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2013, vol. 21, issue 6, pp. 1567-1583.
- [12] Junhai Ma; Weizhuo Ji. Chaos control on the repeated game model in electric power duopoly. *International Journal of Computer Mathematics*. June 2008, vol. 85, issue 6, pp. 961-967.
- [13] Vatani, B., Amjady, N., Zareipour, H. Stochastic self-scheduling of generation companies in day-ahead multi-auction electricity markets considering uncertainty of units and electricity market prices. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2013, vol. 7, issue 7, pp. 735-744.
- [14] Khojasteh, M., Jadid, S., Distributed generation dynamic planning using covariance matrix adaptation evolutionary strategy method considering uncertainties. *Journal of Renewable & Sustainable Energy*. 2014, vol. 6, issue 5, pp. 1-20.
- [15] Liu, A., Hobbs, B. Tacit Collusion Games in Pool-Based Electricity Markets under Transmission Constraints. *Mathematical Programming*. September 2013, vol. 140, issue 2, pp. 351-379.
- [16] Zangeneh, A., Jadid, S., Rahimi-Kian, A. Uncertainty based distributed generation expansion planning in electricity markets. *Electrical Engineering*. March 2010, vol. 91, issue 7, pp. 369-382.
- [17] Nojavan, S., Mohammadi-Ivatloo, B., Zare, K. Optimal bidding strategy of electricity retailers using robust optimisation approach considering time-of-use rate demand response programs under market price uncertainties. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2015, vol. 9, issue 4, pp. 328-338.
- [18] Регламент подачи ценовых заявок участниками оптового рынка [Электронный ресурс]. – Введ. 2017-02-07. – Режим доступа: <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/?ssFolderId=35>, свободный. – Загл. с экрана.
- [19] Вишняков, Я.Д., Радаев, Н.Н. Общая теория рисков. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с.
- [20] Гительман, Л.Д., Ратников, Б.Е. Экономика и бизнес в электроэнергетике. – М.: Экономика, 2013. – 432 с.
- [21] Холмов, В.А. Применение метода разумных целей для задач с неопределенностью // Вестник Бурятского государственного университета. – 2011. – №9. – С. 123-129.

# ПРОБЛЕМЫ ПРИНЯТИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНТЕРНЕТА

А.А. Юдина<sup>1</sup>, Е.М. Шишков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "СамГТУ", Самара, Россия

E-mail: n.astysya@yandex.ru

<sup>2</sup>филиал ФГБОУ ВО "СамГТУ" в г. Новокуйбышевске, Новокуйбышевск, Россия

E-mail: E.M.Shishkov@IEEE.org

*Аннотация* - глобальное энергетическое объединение – амбициозная концепция построения умной высоковольтной сети, объединяющей национальные сети нескольких континентов с целью использования возобновляемых энергетических ресурсов полярных и экваториальных областей. Среди проблем, которые необходимо решить для реализации этой концепции – значительная величина капитальных затрат, необходимых для создания сетевой и генерирующей инфраструктуры. Для оценки эффективности инвестиционных решений в работе использованы методы математического анализа, стохастического моделирования и технико-экономических оценок. В работе предложен алгоритм оценки возможных инвестиционных решений для различных элементов инфраструктуры глобального энергетического объединения, реализованный в виде мульти-агентного механизма. Разработанный алгоритм может быть использован для разработки инвестиционных планов по созданию элементов глобального супергрида.

*Ключевые слова* - глобальное энергетическое объединение, инвестиционные решения, возобновляемые источники энергии.

## THE PROBLEMS OF MAKING INVESTMENT DECISIONS WHEN CREATING THE INFRASTRUCTURE OF THE GLOBAL ENERGY INTERNET

A.A. Yudina<sup>1</sup>, E.M. Shishkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: n.astysya@yandex.ru

<sup>2</sup>Novokuybyshevsk Branch of Samara State Technical University, Novokuybyshevsk, Russian Federation

E-mail: E.M.Shishkov@IEEE.org

*Abstract* - the Global Energy Association is an ambitious concept of building an intelligent high-voltage network that unites national networks of several continents with the aim of using renewable energy resources of the polar and equatorial regions. Among the problems that need to be solved for the implementation of this concept is the significant amount of capital expenditures needed to create a network and generating infrastructure. To assess the effectiveness of investment decisions, the methods of mathematical analysis, stochastic modeling and technical and economic assessments. The algorithm an estimation of possible investment decisions for various elements of an infrastructure of a global power association, realized in the form of a multi-agent mechanism. The algorithm can be used to develop investment plans for the creation of elements of the global super grid.

*Key-words* - The Global Energy Association, investment decisions, renewable energy sources.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальный энергетический интернет - это сильная интеллектуальная энергосистема с высоковольтной сетью в качестве магистральной сети, обеспечивающая чистую энергию в избыточной и глобальных связях. Он состоит из межгосударственной многонациональной базовой сетевой системы и различных уровней напряжения сети во всем мире (энергосистема и распределительная сеть), соединяет большую энергетическую базу на Северном полюсе и экваторе, адаптируется к централизованному и распределенному источнику питания и имеют

возможность передавать энергию ветра, солнечную энергию, энергию прилива, гидроэнергетику, геотермальную энергию и другую возобновляемую энергию для всех типов потребителей [1]. Из-за того, что глобальное распределение возобновляемой энергии и центр загрузки находятся далеко, то страны с дефицитом энергии, столкнувшись с огромным спросом на энергоносители, могут получать энергию по низкой цене, за счет торговли электроэнергией и получить много преимуществ благодаря трансконтинентальной энергосистеме, более того, развитие СВЧ технологии обеспечивает техническую поддержку

межконтинентальной энергосистемы. Таким образом, построение глобального энергетического Интернета, интеграция разработки, распределение и использование глобальных энергетических ресурсов может обеспечить безопасность энергоснабжения, чистоту, эффективность и устойчивость энергосистемы, разрешить необоснованное соответствие между спросом и предложением и улучшить использование возобновляемых источников энергии, что приведет к большим выгодам в экономической, социальной и экологической областях. Простота использования

## II. ПРОБЛЕМЫ ИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ

Оптимальное инвестиционное решение генерации имеет важное значение для содействия развитию генерирующих мощностей их разработкам и координации. На рынке электроэнергии принятие решений об инвестировании в мощности сталкиваются с множеством неопределенностей, таких как волатильность электроэнергии, случайность возобновляемых источников энергии, изменения в политике, технологическое развитие и диверсификация инвесторов. Эти неопределенности приносят соответствующий инвестиционный риск для планирования и строительства сети. Чтобы решить эти проблемы инвестиционных решений, методы, предлагаемые исследователями в на родине и за рубежом, можно разделить на три категории:

1) Чистая приведенная стоимость (NPV), этот метод берет чистую приведенную стоимость как стандарт успеха для проекта, но он не может полностью измерить инвестиционные риски и неопределенность. Учитывая внутреннюю неопределенность и факторы риска для промышленных потребителей при планировании и инвестициях в электроэнергетику, в источнике [1] сравнили разницу между затратами на инвестиции и прогнозированием денежных потоков проектов и воспользовались предлагаемой динамической стохастической моделью для анализа взаимосвязи между оптимальным выбором и сроками инвестирования.

2) Основанный на методе теории реальных опционов, этот метод может учитывать неопределенность, чтобы предоставить инвесторам различные варианты инвестиций. В источнике [2] с помощью программной модели установили динамическую модель инвестиций в электроэнергетику, учитывая опционную стоимость инвестиционных проектов на основе традиционной чистой текущей стоимости. В литературе [3-4] применяется портфолио для создания модели для количественной оценки проекта по ветроэнергетике и количественно оценили влияние различных факторов на разных этапах принятия инвестиционных решений с учетом неопределенности цены на электроэнергию в электроэнергетике, влияния инвестиций в ветряную электростанцию, эксплуатационных расходов, инвестиционной политики, инвестиционных возможностей и других факторов на инвестиционный риск.

3) Основанный на методе теории игровых вариантов, поскольку комбинация реального варианта и игровой теории, теория игровых вариантов решает конфликты между ожиданием выбора и продвижением на реальном рынке в теории реальных вариантов. В литературе [5] установили математическую модель, основанную на теории игровых вариантов, предполагая, что

энергетические инвесторы сталкиваются с неопределенностью в принятии решений и рассматривают инвестиционное поведение других генерирующих компаний, и смогли решить ее.

Однако на фоне глобального энергетического Интернета для реализации широкомасштабной чистой энергии в разных странах и регионах, потребляющих во времени и месте, межконтинентальные инвестиционные решения в области энергосистемы будут сталкиваться с новыми проблемами, такими как:

1) Вовлечение большего количества субъектов, более широкий диапазон, не только учитывая различные отношения между поддержанием генерации, энергоснабжением и сетью внутри страны, а также взаимодействие между различными странами и континентами;

2) Большее количество факторов принятия решений, помимо национальной и региональной электросетей, планирования, эксплуатации, безопасности и других факторов энергоснабжения, должно добавить к системе ресурсов, финансам и налоговым условиям, экономическим и техническим требованиям, охране окружающей среды, рынок проектов, уровень международного сотрудничества и другие факторы в разных странах.

## III. ИНВЕСТИЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ ПРИ ГЛОБАЛЬНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИНТЕРНЕТЕ

Субъекты глобального энергетического интернета обычно относятся к различным странам, участвующим в энергетическом интернете. Для энергосистемы это относится к различным поставщикам энергии, независимым операторам, поставщикам передачи, пользователям, государственным и другим лицам. Рассмотрим преимущества основных национальных инвестиций, проблемы, которые необходимо учитывать среди разных субъектов, наконец, предоставляет методы решения проблем.

1) Показатель преимуществ различных инвестиционных субъектов

Разница в уровне развития электроэнергетики и рыночных структур в основных региональных и национальных результатах приносит многообразие льгот. При принятии инвестиционных решений, прежде всего, нам необходимо определить показатель выгод от инвестиций.

Цена передачи относится к сети, обеспечивающей стоимость услуг передачи, которая включает проект передачи энергии и поддержку сбора энергии, и получается путем итерационного расчета в соответствии с основными параметрами и внутренней скоростью возврата. Коэффициент передачи, тесно связанный со строительством линий электропередачи, является важным показателем инвестиций в проект передачи электроэнергии, что является ключевым звеном в процессе передачи инвестиций.

Цена генерации относится к цене, которую предприятие по выработке электроэнергии и покупатель учитывают, что является ключевым фактором, влияющим

на инвестиции в производство. На этом этапе цена на чистую электроэнергию выше, чем у угля, но субсидии в чистую энергию в каждой стране способствуют развитию чистой энергии. Со снижением стоимости экологически чистой энергии цена генерации постепенно снижается. Всестороннее рассмотрение планирования возобновляемых источников энергии и увеличения масштабов производства и снижения издержек, цены на энергию ветра и солнечной энергии будут снижены к 2030 году, и будут иметь лучшую экономическую конкурентоспособность по сравнению с ископаемой энергией.

В процессе строительства глобального энергетического Интернета, рассматривая линию электропередачи в разных странах и различные национальные системы налогообложения и тарифы на импорт электроэнергии, важно, чтобы каждая страна пропускала электроэнергию и определяла цену продажи в разных странах с помощью добавочного тарифа. Цена продажи в разных странах может быть рассчитана по формуле:

$$h = g * (1 + f)$$

Где,  $g$  - экспортная цена продажи в первой стране,  $h$  - цена генерации импорта во второй стране,  $f$  - тарифная ставка.

Уровни нагрузки являются ключевыми факторами, влияющими на решения об инвестициях в электроэнергию, а огромная неопределенность делает инвестиции в генерацию в глобальном энергетическом интернете серьезными проблемами неопределенности. Традиционные результаты прогнозирования нагрузки, как правило, детерминированы, и это лишь дает окончательное значение, поэтому недостатком является то, что результаты могут не обеспечить прогнозирование диапазона прерываний. Однако в глобальном энергетическом интернете из-за универсальности и разных часовых поясов распределения нагрузки в основных странах и регионах нам необходимо предсказать вероятный прогноз, который в соответствии с объективными требованиями путем применения анализа рисков и оценки надежности с учетом влияния «Замещения электрической энергии».

Увеличение поглощающей способности чистой энергии может улучшить использование чистой энергии и способствовать развитию производства чистой энергии. Различные страны проводят различные политики, направленные на продвижение нетрадиционной энергетики для доступа к сети заблаговременно. Китай обнародовал Закон о возобновляемых источниках энергии и разработал меры политики, такие как субрегиональные цены на электроэнергию, распределение расходов и доступ к сети заблаговременно, чтобы стимулировать развитие ветроэнергетики. Поэтому исследования по поглощающей способности чистой энергии являются незаменимым фактором принятия инвестиционных решений в рамках глобального энергетического Интернета.

2) Проблемы необходимо изучать в разных субъектах.

Основываясь на кластеризации в модели интеллектуального анализа данных и ассоциации,

эффективно извлекая связи между индикаторами, имитируя большие объемы операционных данных на фоне энергетического интернета, мы можем проанализировать основные факторы, влияющие на преимущества инвестиционных объектов. Проблемы, требуемые для изучения с учетом преимуществ различных предметов, являются следующими.

а) Взаимодействие между механизмом различного дохода в основных регионах и страной и системой цен на электроэнергию, содержащей стоимость передачи, цену генерации и цену продажи.

б) Исследование того, как регионы и уровень развития ВВП страны способствуют совместному планированию инвестиций в строительство чистой энергии и линий электропередачи в глобальном энергетическом интернете, а также как взаимосвязь между экономическим потенциалом основных регионов и странами с различными рыночными механизмами и инвестиционные выгоды.

Проблемы, требуемые для изучения в связи с различными вариантами инвестиционных решений в часовых поясах, таковы:

а) Исследование динамики производства и использования энергии возобновляемой энергии с характеристикой часового пояса, а также модель выгод от инвестиций с разнесением доходов в разных часовых поясах.

б) Изучить методы принятия инвестиционных решений в разные периоды времени и инвестиций с учетом характеристик часового пояса и различных путей передачи. Различные режимы передачи включают в себя линии на переменном токе, постоянном токе, переменнопостоянном токе, в [5] проанализированы методы оценки ценовой конкурентоспособности.

3) Методы исследования при принятии инвестиционных решений

а) При изучении преимуществ различных инвестиционных объектов мы можем количественно оценить факторы различных предметных выгод, таких как инвестиционный капитал, потребление чистой энергии, глобальное энергетическое интернет-строительство и внешняя инвестиционная среда, а также представлять продажи электроэнергии, цену продажи, надежность, Рыночные проекты для двухуровневой системы оценки «эффективность - факторы» для анализа решений, основанных на балансе выгод от инвестиций.

Верхний уровень определяется как индекс «индекса производительности», чтобы количественно оценить производительность, влияющую на различные преимущества. Нижний уровень определяется как «индексный слой факторов», чтобы проанализировать влияние показателей эффективности на отношение инцидентов. Например, рост цен на генерирующую энергию и продажи электроэнергии может увеличить инвестиционный капитал, способствуя тем самым созданию глобального энергетического Интернета. Нетрудно найти, что существует связь между индексом

двух слоев. Составляя ассоциацию, то есть мы можем использовать индекс факторов как независимые переменные и индекс производительности как зависимую переменную в системе оценки индекса, а также использовать комплексные данные моделирования для установления модели нелинейного сопоставления отношений, наконец, количественно оценить уровень производительности Индикаторы для оценки преимуществ посредством большого количества имитаций для его решения.

4) Различные объекты инвестиций в разных временных рамках планирования инвестиций сталкиваются с преобладающими факторами разнообразия, в результате чего разные субъекты фрагментируются в решениях планирования и инвестиций. Таким образом, мы должны использовать модель динамики системы для анализа связи субъектной дифференциации, влияния таких факторов, как рост нагрузки, расширение технологии производства электроэнергии, изменения на рынке и выявление механизма взаимодействия ключевых факторов и каждого субъекта в инвестиционном решении.

Динамика системы является междисциплинарной, основанной на теории системы, теории обратной связи и теории информации, а с помощью компьютерной имитационной технологии она может анализировать качественную и количественную систему, поэтому мы можем сконфигурировать основную структуру системы и моделировать динамическое поведение через структуру общей системы. При изучении многомерных инвестиционных объектов выгодной модели по часовым поясам мы можем применять динамику системы для анализа всех факторов, влияющих на преимущества инвестиционных объектов, выявления ключевых факторов, использования диаграммы причинности для сложных отношений между различными факторами, и использовать уравнение для квантования ключевых факторов. Затем мы изучаем взаимосвязь инвестиционных доходов и временных рядов, области потребления чистой энергии, рыночных проектов, в конечном итоге формируем модель предметной выгоды в основных регионах и странах на разных этапах.

3) Принятие инвестиционных решений в рамках глобального энергетического Интернета - это интерактивный и динамичный игровой процесс, поэтому необходимо использовать метод, который может описывать динамику рынка. Поэтому мы можем использовать теорию многоагентных систем для создания мультиагентной модели, которая содержит традиционных поставщиков энергии, поставщиков энергии, поставщиков возобновляемых источников энергии и агента пользователей в соответствии с особенностями основных регионов и имитирует динамическое поведение.

Рассматривая различные преимущества инвестиционных объектов, во-первых, мы можем анализировать динамическое поведение субъекта в основных регионах и странах и использовать теорию игр и теорию мультиагентных систем для построения имитационного и интерактивного механизма поведения субъекта. Во-вторых, благодаря большому количеству симуляций различного поведения субъекта мы изучаем макроскопический процесс динамической эволюции субъективной выгоды, учитывая влияние различных путей передачи, в зависимости от пикового потребления и кривой времени в часовых поясах. Наконец, мы анализируем динамическую взаимосвязь между поведением разных субъектов и инвестиционными решениями и предлагаем оптимальное принятие инвестиционных решений с учетом различных путей передачи и часовых поясов.

Подводя итог, мы можем использовать метод моделирования, динамику системы и многоагентную теорию игр для анализа факторов, влияющих на субъективные выгоды в процессе принятия решений о планировании и механизмах взаимодействия, выдвинуть метод планирования инвестиционного решения для адаптации к глобальному энергетическому Интернету, и оказывать поддержку в принятии инвестиционных решений в рамках глобального энергетического Интернета.

#### IV. Вывод

В этом документе представлена функция инвестиций в глобальный энергетический интернет, внедряется индексная система с различными преимуществами инвестиционных объектов, а другая проблема решения может быть изучена по соотношению показателей, в итоге разрабатываются три метода: симуляция, многоагентная теория игр и динамика системы Для решения проблемы преимуществ различных предметов. Он может служить справочным материалом для принятия инвестиционных решений в рамках глобального энергетического Интернета.

#### Список литературы

- [1] Liu Zhenya. Global Energy Internet. Beijing, China, Electric Power Press, 2015.
- [2] Wickart and Madlender R. "Optimal technology choice and investment timing: A stochastic model of industrial cogeneration vs. heat-only production". Energy Economics, vol.29,no.A,pp.934-952,2007.
- [3] A. Botterud, M D. Ilic, and I. Wangensteen, "Optimal investments in power generation under centralized and decentralized decision making", IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 1, pp. 254 - 263, Feb,2005.
- [4] Liu Min and Wu Fuli. "Wind power investment decisions based on real option theory".Automation of Electric Power Systems,vol.21 ,pp. 19-23,2009.
- [5] You Pei Yu, Wang Xiaohui and Zhang Yan. "Economic Research on Asia-Europe Long-Distance UHV Power Transmission".Power System Technology, vol.1.39,no.8,pp.2087-2093,20 15.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИХОХОДНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А.А. Татевосян, М.М. Сангов, В.С. Мищенко

ФГБОУ ВО "Омский государственный технический университет", Омск, Россия

E-mail: karol@mail.ru

*Аннотация* — Создание новых источников питания небольшой мощности (до 2 кВт) неразрывно связано с применением в магнитных системах генераторов постоянных магнитов из сплавов Nd-Fe-B. Поиск технических решений магнитных систем обуславливающих высокое выходное напряжение генератора при уменьшении таких факторов как момент страгивания и реакция якоря обладает особой актуальностью. Особый интерес представляет исследование магнитоэлектрического генератора построенного на базе асинхронной машины переменного тока, ротор которой заменен на индуктор с постоянными высококоэрцитивными магнитами. В статье приведено экспериментальное исследование и математическое моделирование магнитоэлектрического генератора с количеством  $2p=4$ , с размещенными на роторе удлиненными постоянными магнитами призматической формы.

Для проведения экспериментальных исследований выполнена разработка лабораторного стенда, включающая в свой состав асинхронный двигатель, частотный преобразователь, магнитоэлектрический генератор, выпрямитель, блоки контроля и измерения электрического состояния обмоток и энергетических параметров генератора. Для моделирования применялись программное обеспечение конечно-элементного анализа Elcut 6.0 и Ansys 16.

При выполнении экспериментов получены временные зависимости токов и напряжений в системе асинхронный двигатель - магнитоэлектрический генератор. Построена характеристика холостого хода генератора и внешняя характеристика при активной нагрузке и фиксированных значениях скорости вращения вала в диапазоне от 100 об/мин до 1300 об/мин. В ходе математического моделирования построены картины магнитного поля генератора, получено распределение магнитной индукции в воздушном зазоре при скорости вращения вала 400 об/мин.

При разработке генератора предложено техническое решение магнитной системы, позволяющее уменьшить момент страгивания индуктора при пуске, а также представлена схема соединения обмоток генератора позволяющая уменьшить реакцию якоря и увеличить выходное напряжение генератора. Создан стенд для испытания опытного образца магнитоэлектрического генератора и измерения его выходных характеристик. На представленный в статье магнитоэлектрический генератор получен патент на изобретение №2604051.

*Ключевые слова:* автономные, источники электроэнергии, генератор, тихоходный, магниты; обмотка; асинхронный двигатель.

## EXPERIMENTAL STUDY AND MATHEMATICAL MODELING OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

A.A. Tatevosyan, M.M. Sangov, V.S. Myschenko

Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

E-mail: karol@mail.ru

*Abstract* — The development of new power sources of low power (up to 2 kW) is inextricably linked with the use in magnetic systems of generators of permanent magnets made of Nd-Fe-B alloys. The search for technical solutions of magnetic systems that determine the high output voltage of the generator with a decrease in such factors as the moment of friction and the reaction of the armature is of particular relevance. Of special interest is the investigation of the magnetolectric generator of an alternating current constructed on the basis of an asynchronous machine whose rotor is replaced by an inductor with constant high-coercivity magnets. The article presents experimental research and mathematical modeling of a magnetolectric generator with an amount of  $2p = 4$ , with prismatic elongated permanent magnets placed on the rotor.

To carry out experimental research, a laboratory stand including an asynchronous motor, a frequency converter, a magnetolectric generator, a rectifier, blocks for monitoring and measuring the electrical state of the windings and power parameters of the generator has been developed. For simulation, the finite element analysis software ELCUT 6.0 and Ansys 16 was used.

During the experiments, the time dependences of currents and voltages in the system of an induction motor - a magnetolectric generator - were obtained. The idling characteristic of the generator and the external characteristic with an active load and fixed values of the shaft rotation speed in the range from 100 rpm to 400 rpm. In the course of mathematical modeling, the magnetic field of the generator is constructed, the distribution of magnetic induction in the air gap at a rotation speed of 1300 rpm is obtained.

In the development of the generator, a technical solution of the magnetic system is proposed that allows reducing the torque of the inductor during start-up, as well as a connection diagram of the generator windings that allows reducing the armature response and

increasing the output voltage. A laboratory bench was created for testing the magnetolectric generator and measuring its energy characteristics. The magnetolectric generator presented in the article received patent for invention No. 2604051.

**Keywords** — Autonomous, power sources, generator, slow-moving, magnets; winding; asynchronous motor.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высокий интерес научного сообщества уделяется исследованию электромеханических преобразователей ЭМПЭ выполненных с использованием высококоэрцитивных постоянных магнитов из редкоземельных сплавов ниодим-железо-бор (NdFeB) [1-4].

Проблемы, связанные с разработкой магнитоэлектрических машин и оптимизации разнообразных конструкций рассмотрены в работах: Буля Б.К., Демирчяна К.С., Иванова-Смоленского А.В., Кручининой И.Ю., Кулешов Е.В., Макаричева Ю.А., Овчинникова И.Е., Ряшенцева Н.П., Смелягина А.И., Тамма И.Е, Тозони О.В., Хитерера М. Я., Юринова В. М. и других [4-7].

Большой интерес представляют работы связанные с разработкой магнитоэлектрических генераторов, магнитная система которых построена на базе асинхронной машины переменного тока, в которой традиционный ротор заменен на ротор с размещенными на нем постоянными магнитами (индуктор). Многообразие форм и способов размещения постоянных магнитов на роторе, поиск оптимального соотношения числа пар полюсов машины и количество зубцов статора, особенности соединения обмоток статора определяет научную новизну, а применение указанных магнитоэлектрических генераторов в автономных системах электроснабжения для нужд малой энергетики определяет практическую значимость исследования [8-12].

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим магнитную систему магнитоэлектрической машины представленной на рис. 1. Магнитоэлектрическая машина содержит корпус 1, неподвижный статор 2, представляющий собой магнитопровод с пазами 3 в которых размещена трехфазная обмотка 4 и подвижный ротор 5 с постоянными магнитами 6. Ротор 5 от статора 2 отделён технологическим воздушным зазором  $\delta$ , число магнитных полюсов ротора 5 должно равняться числу магнитных полюсов трехфазной обмотки с током статора 2.

Для испытаний магнитоэлектрической машины работающей в генераторном режиме необходимо выполнить разработку экспериментального стенда, реализующего следующие функции:

- регулирование скорости вращения ротора магнитоэлектрической машины;
- измерение параметров состояния обмотки магнитоэлектрической машины;

- снятие энергетических характеристик магнитоэлектрической машины, важнейшей из которой является зависимость полезной мощности от скорости вращения вала.

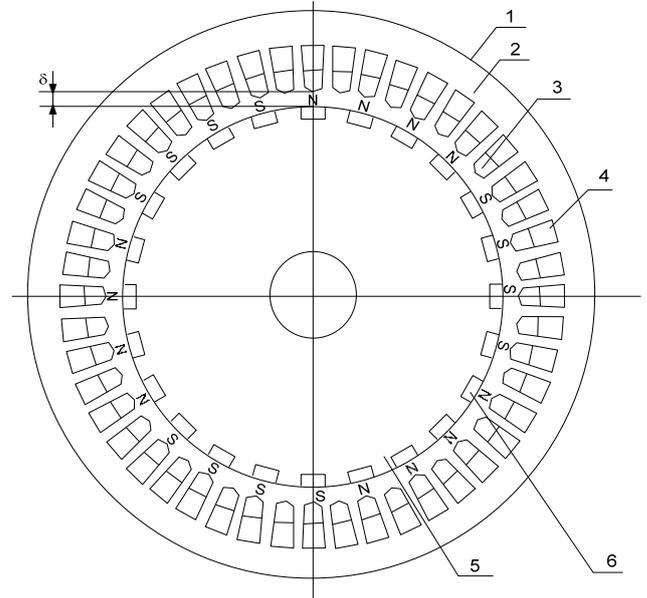


Рис. 1. Конструкция магнитной системы магнитоэлектрической машины

### III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

На рис. 2 представлена структурная схема для исследования магнитоэлектрической машины.

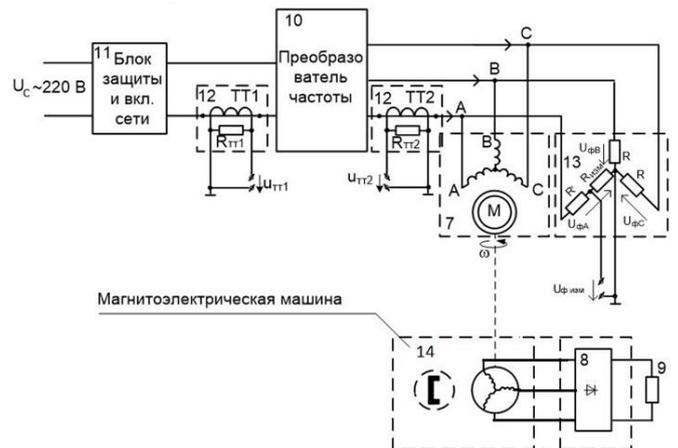


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

На схеме обозначены: 1 – корпус, 2 – неподвижный статор, 3 – паз, 4 – трёхфазная обмотка асинхронного двигателя, 5 – подвижный ротор, 6 – постоянные

магниты, 7 - асинхронный двигатель, 8 - трехфазный выпрямитель, 9 - нагрузочное сопротивление, 10 - частотный преобразователь, 11 - блок включения питания, 12 - трансформатор тока (ТТ1 и ТТ2), 13 - делитель напряжения, 14 - синхронный генератор на постоянных магнитах.

Внешний вид стенда для испытания магнитоэлектрической машины приведен на рис. 3



Рис. 3. Стенд для исследования режимов работы магнитоэлектрической машин

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТ

Величина индукции магнитного потока, сцепленного с обмоткой статора, достаточно высока и находится в диапазоне 0.5 Тл до 1.2 Тл в зависимости от угла поворота ротора [15, 16]. Большое значение индукции определяется, в том числе, и малым воздушным зазором, что при высокой технологичности сборки является несомненным преимуществом рассматриваемой магнитной системы. При подборе схемы выпрямления и стабилизации индуцированного напряжения в обмотке статора магнитоэлектрическая машина, работающая в генераторном режиме, в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к генераторам электрической энергии малой мощности.

Ротор магнитоэлектрической машины проводят во вращение от внешнего двигательного устройства, тем самым реализуя генераторный режим работы. За счет изменения магнитного потока, пронизывающего обмотку статора в последней наводится эдс индукции [13, 14]. Методика испытаний предусматривает снятие внешней характеристики генератора при различных скоростях вращения ротора: 500 об/мин, 700 об/мин, 1000 об/мин, 1300 об/мин. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя осуществляется частотным преобразователем.

Эксперимент направлен на определение такого режима работы генератора, при котором отдаваемая мощность потребителю будет максимальной.

На холостом ходу индуцированное выпрямленное напряжение составляет 220 В.

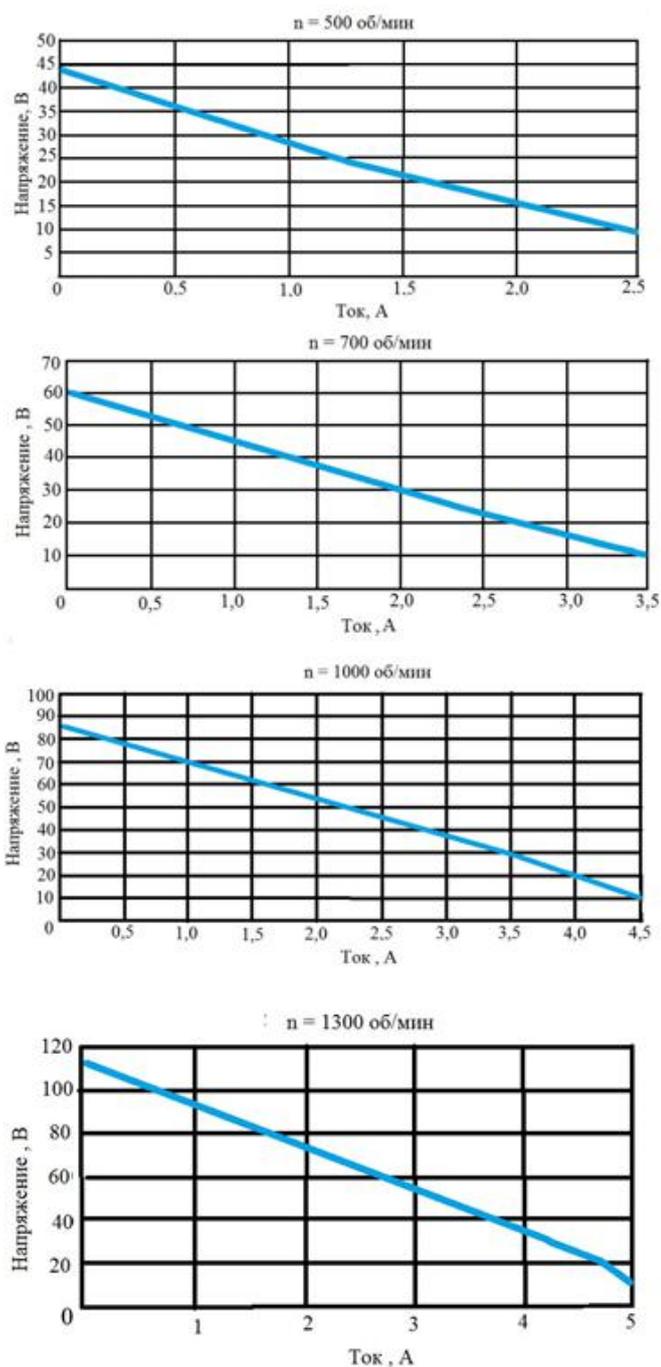


Рис. 4. Результаты испытаний магнитоэлектрического генератора при различной скорости вращения ротора

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ результатов испытаний позволяет сделать вывод о рекомендуемом диапазоне работы магнитоэлектрической машины в согласованном режиме при сопротивлении нагрузки 16 Ом.

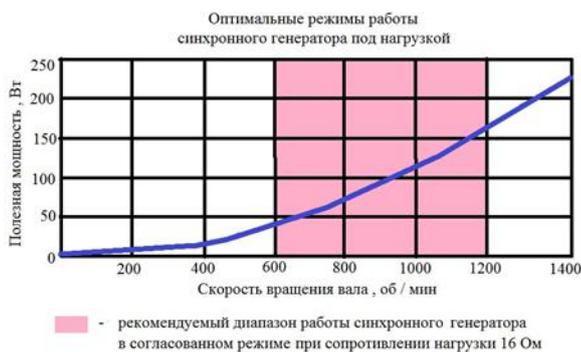


Рис. 5. Рекомендуемый диапазон работы магнитоэлектрической машины

Зависимость тока заряда аккумуляторной батареи от скорости вращения ротора магнитоэлектрической машины представлена на рис. 6.

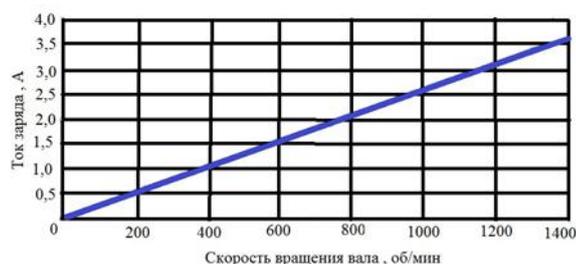


Рис. 6. Ток заряда аккумуляторной батареи

## VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе экспериментальных данных можно сделать вывод о рекомендуемом режиме работы исследуемой магнитоэлектрической машины. Максимальная полезная мощность отдаваемая потребителю находится в диапазоне от 50 до 150 Вт при скорости вращения ротора 1200 об/мин. При дальнейшем увеличении скорости вращения наблюдается интенсивный нагрев обмотки статора. Кроме этого, имеет место реакция якоря, существенно увеличивающая момент сопротивления. Для усиления магнитного потока в зазоре необходимо предусмотреть изменение в конструкции ротора магнитоэлектрической машины, заключающееся в размещении на внутренней торцевой поверхности постоянных магнитов дополнительного магнитопровода, представляющего собой тонкостенный цилиндр из ферромагнитного материала.

## VII. ВЫВОДЫ

1. Создан опытный образец магнитоэлектрической машины
2. Разработан испытательный лабораторный стенд и методика испытаний магнитоэлектрической машины
3. Получены экспериментальные характеристики магнитоэлектрической машины, работающей в генераторном режиме на холостом ходу и под нагрузкой

4. Проведенные исследования позволяют разработать методику расчета оптимальных конструкций магнитоэлектрических машин.

## Список литературы

- [1] Сафьянников И.А. *Проблемы развития малой энергетики Западной Сибири* / И.А. Сафьянников, И.Н. Россемахин // Современная техника и технологии: матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск: ТПУ, 2003.– Т.1. С. 242-243
- [2] Кулагин Р.Н. *Анализ конструкций тихоходных генераторов с постоянными магнитами*. Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. № 13(86) / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – 115 с. (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 7).
- [3] Кулешов Е.В. *Магнитоэлектрический синхронный генератор на базе асинхронной машины для автономной ветроэлектрической установки*. Автореферат на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Владивосток, ДВГТУ, 2001 – 20 с.
- [4] O. A. Lysenko. *Torque load observer of induction motor with double squirrel-cage of rotor*// 2015 International Siberian conference on control and communications (SIBCON): 2015.
- [5] Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. *Электромеханические системы с высококоэффициентными постоянными магнитами*. – М.: Машиностроение, 2014. – 267 с.
- [6] Харитонов С. А., Коробков Д. В., Маслов М. А., Бородин Н. И., Левин А. В., Юхнин М. М., Лившиц Э. Я. *Система генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения* // Электротехника. 2008. № 6. С. 27–32.
- [7] Zaharova N.V. *Improvement of magnetic system of the speed sensor in the devices of the impact parameters control*. // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings, art. no. 7147067
- [8] Гарганеев А. Г., Грабовецкий Г. В., Харитонов С. А. *Электромагнитные процессы в системе генерирования постоянного тока «МЭГ – однофазный мостовой выпрямитель»* // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 143–154
- [9] Гарганеев А. Г., Грабовецкий Г. В., Харитонов С. А. *Электромагнитные процессы в системе генерирования постоянного тока «МЭГ – двухполупериодный нулевой выпрямитель»* // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 2. С. 201–209.
- [10] Глазков В. П., Глазков О. В., Глазкова И. В. *Ротор электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов*: пат. РФ № 123254 U1, H02K21/12, заявл. 15.06.2012. опубл. 20.12.2012.
- [11] Суворов И. В., Фолимонов Л. В. *Ротор магнитоэлектрической машины, преимущественно синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов*: пат. РФ № 2308139 C2, H02K1/27, заявл. 10.02.2007; опубл. 10.10.2017. 49.
- [12] Левин А. В., Лившиц Э. Я., Хабаров В. А. *Способ установки постоянных магнитов в роторе электрической машины*: пат. РФ № 2230420 C1, H02K15/00, H02K15/03, заявл. 05.06.2003; опубл. 10.06.2004.
- [13] Татевосян А.А., Б.И. Огорелков, Татевосян А.С. *Расчет индуктированной эдс в витке при относительном движении постоянного магнита с различной формой поперечного сечения*. Омский научный вестник. 2014. № 3 (133). С. 179-183.
- [14] *Расчет индуктированной электродвижущей силы (ЭДС) синхронного магнитоэлектрического генератора на базе асинхронной электрической машины* // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612665 от 24.02.2015
- [15] Tatevirosyan A.A. *The calculation of the magnetic field of the synchronous magnetolectric generator*. // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2016 - Proceedings, art. №. 7819095
- [16] Tatevirosyan A.A., Tatevirosyan A.S. *Calculation of magnetic system of the magnetolectric machines* // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics, 2014 - Proceedings, art. №. 7005698.

# Алгоритм управления электрическим режимом изолированной микросети

Е.О. Солдусова<sup>1</sup>, А.В. Проничев<sup>1</sup>, Е.М. Шишков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "СамГТУ"

Самара, Россия

<sup>2</sup>филиал ФГБОУ ВО "СамГТУ" в г. Новокуйбышевске

Новокуйбышевск, Россия

E-mail: esoldusova@inbox.ru, teyoma@bk.ru, e.m.shishkov@ieee.org

*Аннотация* - Одним из перспективных направлений для поиска решений задач управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в электроэнергетических системах является применение технологий распределённого реестра – Blockchain, что обусловлено повышением доступности возобновляемых источников энергии. В настоящее время в РФ ввиду законодательных ограничений, налагаемых на операции на розничном и оптовых рынках электроэнергии, применение технологии Blockchain затруднено для энергосистем, работающих параллельно с региональными или объединёнными энергосистемами, однако основанные на технологиях распределённого реестра принципы функционирования рынка электрической энергии возможно применить в рамках небольших изолированных энергосистем – микрогридов. Моделирование и расчёт электрических режимов микрогрида были произведены в программе RastrWin3 с целью учёта потерь в электроэнергетической системе. В процессе моделирования была получена зависимость мощности на балансирующем узле от количества узлов нагрузки для разного отношения собственной генерации к потреблению в узле. В случае положительной мощности на балансирующем узле наблюдалась нехватка активной мощности в системе, а в случае отрицательной – её избыток. Использование распределённой генерации в малых изолированных энергосистемах является экономически оправданным: срок окупаемости устройств распределённой генерации значительно меньше срока их эксплуатации. Для организации взаиморасчётов между собственниками объектов малой генерации в микрогриде возможно применение технологии «блокчейн».

*Ключевые слова*—блокчейн; микрогрид; солнечная энергетика; распределённая генерация

## Algorithm for microgrid electric state management

E.O. Soldusova<sup>1</sup>, A.V. Pronitchev<sup>1</sup>, E.M. Shishkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Technical University

Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Novokuybyshevsk Branch of Samara State Technical University

Novokuybyshevsk, Russian Federation

E-mail: esoldusova@inbox.ru, teyoma@bk.ru, e.m.shishkov@ieee.org

*Abstract* - One of the promising directions for finding solutions to the problems of regimes management and commercial electricity accounting in electric power systems is the application of distributed ledger technologies - Blockchain, which is due to increased availability of renewable energy sources. Currently, in the Russian Federation, the use of Blockchain technology is difficult for electric power systems operating in parallel with regional or unified power system due to the legislative restrictions imposed on operations in the retail and wholesale market for electrical energy. However, based on the distributed ledger technologies, the principles of the functioning of the electric energy market can be applied within the framework of small isolated electricity systems - microgrids. Mathematical modeling and calculation of the microgrid electric regimes were performed in the RastrWin3 program with the aim of accounting for losses in the electric power system. During the simulation it was obtained dependence of the power at the slack node from the number of load nodes for a different ratio of own generation to consumption in the node. In the case of positive power, there was a shortage of actual power in the system at the slack node, and in the case of a negative one, there was an excess of it. The use of distributed generation is economically justified in small isolated electricity system: the payback period of distributed generation devices is much less than their lifetime. It is possible to use Blockchain technology to organize mutual settlements between owners of small generation facilities in microgrid.

*Key-words*—Blockchain; microgrid; photovoltaics; distributed generation

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современная электроэнергетика – одна из самых наукоемких и технологичных отраслей промышленности. Одним из перспективных направлений для поиска решений задач управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в электроэнергетических системах является применение технологий распределённого реестра – Blockchain, что обусловлено повышением доступности возобновляемых источников энергии, объединяемых в системы с распределённой генерацией[1].

В данной работе предлагается использование автоматического устройства, реализующего технологию Blockchain, для учёта переданной и потреблённой в каждом узле сети электроэнергии посредством системы самоисполняемых контрактов, а также осуществляющего функции автоматизированного управления режимами микрогрида.

Целью настоящей работы является обоснование и реализация принципов управления режимами и коммерческого учёта электроэнергии в микрогридах с помощью автоматического устройства, реализующего технологию Blockchain. Управление режимом в данном случае направлено на сокращение необходимых резервов мощности с учётом требуемого уровня надёжности электроснабжения и качества электроэнергии. При этом рыночный механизм в рамках микросети организован на основе подходов [2-3].

## II. АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МИКРОГРИДА

Расчет режима работы рассматриваемой системы был произведен в программе RastrWin3 с целью учета потерь в электроэнергетической системе.

Схема электроснабжения 0.4 кВ состоит из 20 узлов нагрузки и одного балансирующего узла. Каждый узел – это дом с собственной генерацией в виде небольшой солнечной электростанции в комбинации с аккумуляторными батареями. Активная нагрузка каждого дома (узла) - 5 кВт, коэффициент мощности 0.95. В качестве балансирующего узла в реальной системе может выступать вторичная обмотка трансформатора 6(10)/0.4 кВ, либо дизель-генераторная установка (ДГУ).

Для расчетов использовались 5 вариантов солнечных электростанций, в комплект каждой из которых входят: солнечные панели, крепеж, инвертор, аккумуляторные батареи. Их установленные мощности были равны 0.8, 2.4, 3, 3.2, 4 кВт.

Таблица I. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ МИКРОГРИДА

Установленная мощность в узле (кВт)	Соотношение выработки и потребления в узле (%)	Количество узлов, одновременно находящихся в нагрузке
0,8	16	2
2,4	48	8
3	60	10
3,2	64	11
4	80	14

Расчеты показывают (Таблица I), что при увеличении установленной мощности в каждом узле – возможна одновременная работа большего числа узлов без получения электроэнергии из внешней энергосистемы.

## III. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Для каждого из пяти вариантов комплектов рассчитана стоимость оборудования для всего поселка. Эта стоимость включает в себя саму солнечную станцию, а так же стоимость устройства АСКУЭ.

Зная количество узлов с собственной генерацией, был произведен расчет их выработки, считая что выработка происходит 12 часов в сутки.

По действующему тарифу электроэнергии на напряжение 0.4 кВ был произведен расчет экономии средств и срока окупаемости. Максимальный срок составляет 8 лет, что значительно меньше срока эксплуатации солнечной станции, который составляет 20 лет. Результаты расчетов представлены в Таблице II.

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Собственная генерация (кВт)	Собственная выработка за год (кВт·ч)	Экономия средств в год (руб)	Срок окупаемости
0,8	70080	180105,6	8,0
2,4	210240	540316,8	5,1
3	262800	675396	5,6
3,2	280320	720422,4	5,7
4	350400	900528	7,8

Однако, расчет срока окупаемости был произведен исходя из того, что не была учтена купля-продажа энергии внутри системы, а было учтено количество электроэнергии, которое не нужно покупать из внешней энергосистемы за счет собственной генерации.

Но если работает система Blockchain и отдельному потребителю не хватает собственной генерации, то он покупает её у того, у кого она в избытке за собственную внутрисетевую валюту.

## IV. ВЫВОДЫ

Использование распределённой генерации в малых изолированных энергосистемах является экономически оправданным: срок окупаемости устройств распределённой генерации значительно меньше срока их эксплуатации; Для организации взаиморасчётов между собственниками объектов малой генерации в микрогриде возможно применение технологии самоисполняемых контрактов.

### Список литературы

- [1] G. W. Arnold, «Challenges and opportunities in smart grid: a position article» *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 922–927, 2011.
- [2] C. Block, D. Neumann, C. Weinhardt «A Market Mechanism for Energy Allocation in Micro-CHP Grids» *Proceedings of the 41st Hawaii International Conference on System Sciences* – 2008, pp. 1–11.
- [3] J. Pascual, J. Barricarte, P. Sanchis, L. Marroyo «Energy management strategy for a renewable-based residential microgrid with generation and demand forecasting», *Applied Energy* 158 (2015) 12–25.

# Анализ ветроэнергетического потенциала Монголии

Э.Цэрэндолгор, Г.В.Дерюгина

ФГБОУ ВО "Научный исследовательский университет МЭИ", Москва, Россия

E-mail: invulnerable.nami@gmail.com

**Аннотация** - в Монголии, дефицит электроэнергии составляет около 20%, который покрывается за счет импорта электроэнергии из России. Снизить величину импорта можно за счет использования местных ресурсов, например, энергии ветра. В работе приводятся результаты исследований ветроэнергетического потенциала Монголии. Ряды наблюдений за скоростью и направлениями ветра на площадках наземных метеостанций с сайта "Расписание Погоды", статическая обработка данных, математическое моделирование. Валовой ветроэнергетический потенциал Монголии, эмпирические зависимости вертикального профиля ветра, многолетние характеристики ветра, карты распределения ветровых ресурсов по территории страны. Полученные результаты могут быть применены в проектных организациях на ранних стадиях проектирования при выборе площадок для размещения ВЭС, а также при проведении ветроэнергетических расчетов.

**Ключевые слова** - энергия ветра, вертикальный профиль ветра, коэффициент Хеллмана, ветроэлектрическая станция.

## Analysis of the wind energy potential of Mongolia

E. Tserendolgor, G.V. Derugina

«NRU «MPEI », Moscow, Russian Federation

E-mail: invulnerable.nami@gmail.com

**Abstract** - in Mongolia, the electricity deficit is about 20%, which is covered by the import of electricity from Russia. Reduce the value of imports can be through the use of local resources, such as wind energy. The paper presents the results of research of wind energy potential of Mongolia. Data series of wind speed & direction observations at ground weather stations from the "Reliable Prognosis" website, static data processing, mathematical modeling. Gross wind energy potential of Mongolia, empirical dependencies of the wind shear, long-term wind characteristics, wind resource maps across the country. The obtained results can be applied in the design organizations at the preliminary stages of project development when choosing wind farm construction site, as well as for wind energy calculations.

**Keywords** - wind energy, wind shear, Hellman coefficient, wind power plant.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Потребности Монголии в электроэнергии обеспечиваются в основном за счет внутреннего производства: в стране работают 7 угольных электростанций, 13 ГЭС, дизельные электростанции, малые солнечные коллекторы и ветроэнергетические установки. Дефицит электроэнергии в стране составляет около 20%, из них примерно 13% обеспечивается за счет импорта из России. Также импортируется электроэнергия из Китая. Электроэнергия широко доступна для бытового и промышленного потребления в городских центрах Монголии, но менее доступна за пределами этих центров, где энергетическая инфраструктура недостаточно развита. В Монголии функционируют четыре независимых энергосистемы: Центральная энергосистема (ЦЭС), Западная энергосистема (ЗЭС), Восточная энергосистема (ВЭС) и Алтай-Улиастайская энергосистема (АУЭС). Текущая общая потребность ЦЭС в электроэнергии составляет примерно 730 МВт (включая нагрузку медного рудника Эрдэнэт), или примерно 95% от общей нагрузки в стране. В регионе ЦЭС общая установленная мощность производства электроэнергии равна 826,3 МВт по сравнению с пиковым спросом в размере примерно 729 МВт. ЦЭС также соединена с энергосистемой Российской Федерации. Основная проблема ЦЭС заключается в том, что крупнейший энергоблок мощностью 100 МВт обеспечивает только около 20% средней нагрузки в

зимний период. Иногда этот энергоблок выходит из строя, что ведет к возникновению сильного дефицита электроэнергии. В такой ситуации энергоустановки не могут быстро адаптироваться к изменениям требований по нагрузке. Дефицит электроэнергии покрывается за счет выборочного сокращения нагрузки по принципу ротации или покупки электроэнергии у России. [1]. Снижение энергодефицита на территории Монголии возможно за счет строительства крупных сетевых солнечных и ветровых электрических станций..

Монголия обладает богатыми ресурсами ВИЭ и имеет благоприятные климатические и погодные условия для их эффективного использования. По данным ветрового атласа Монголии, 10% общей территории страны или 160 тыс.км<sup>2</sup> оценивается как пригодная для целей ветроэнергетики. По оценкам, ветровые потенциалы 12-и аймаков (территориально-административное деление страны) составляют более 20.000 МВт и 9-и аймаков – более 50.000 МВт. Самым крупным ветровым потенциалом свыше 300.000 МВт обладает аймак Умнеговь.

Для оценки перспективности строительства крупных ветроэлектрических станций (ВЭС) в Монголии был проведен подробный расчет и анализ ветровых ресурсов на всей территории Монголии по многолетним рядам

наблюдений (с 1995 г. по н.в.) 61-й наземных метеостанций с сайта «Погода России» [2]. Расположение метеостанций по территории Монголии показано на рисунке 1, они охватывают всю территорию Монголии, в том числе и удаленные и труднодоступные районы. На площадках 61-й МС Монголии на высоте 10 м были рассчитаны основные многолетние энергетические характеристики ветра: среднееголетняя скорость ветра  $V_0$ , удельная валовая мощность  $N_{уд}$ , коэффициент вариации  $C_V$ , повторяемости скорости и направлений ветра. Многолетние энергетические характеристики ветра меняются в широком диапазоне:  $V_0$  от 1,16 м/с (МС Гандан Хури) до 4,98 м/с (МС Мандалгоби);  $N_{уд}$ : 0,03-0,25кВт/м<sup>2</sup>;  $C_V$  0,056-0,209. На рисунках 2 и 3 показаны многолетние повторяемости скорости и направлений ветра по данным отдельных МС. На основе результатов расчета были построены карты с распределением среднееголетней скорости ветра (рис. 4). Как видно, наиболее перспективно использование энергии ветра на юге и востоке Монголии.

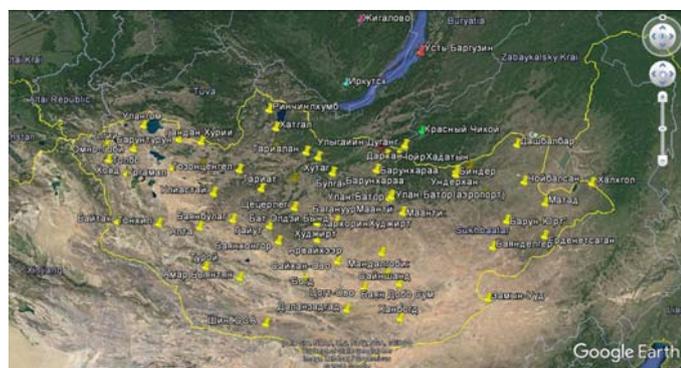


Рис. 1. Расположение наземных метеостанций по территории Монголии

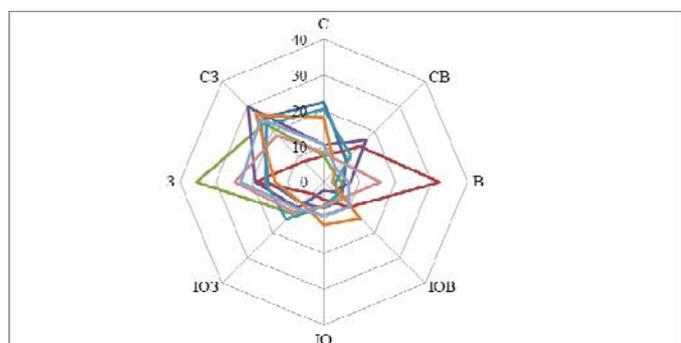


Рис. 2. Многолетние повторяемости направлений ветра по данным отдельных МС

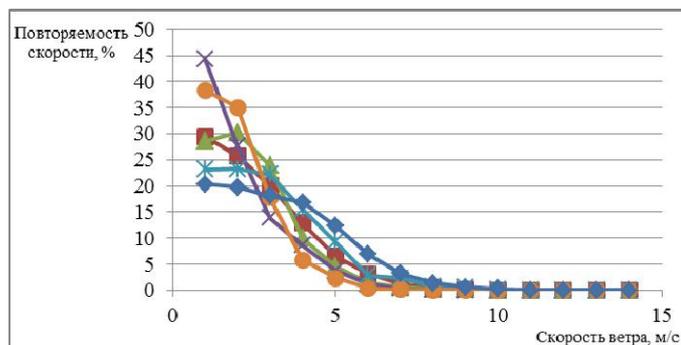


Рис. 3. Многолетние повторяемости скорости ветра по данным отдельных МС

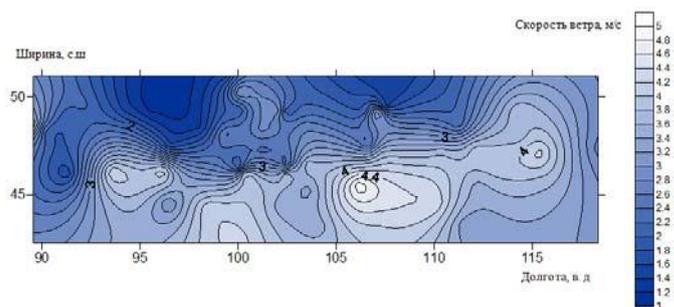


Рис. 4. Карта с изолиниями постоянных значений среднееголетней скорости ветра на высоте 10 м по территории Монголии

Более детальный анализ полученных результатов позволил выявить наиболее перспективные регионы Монголии для использования энергии ветра: на юге Монголии: Гоби - Средне-Гобийский (Дундгоби) аймак, Южно-Гобийский (Омногоби) аймак, Восточно-Гобийский (Дорногоби) аймак, Баянхонгорский аймак, Гоби-Алтайский аймак; на востоке Монголии - Хэнтийский (Хэнтий) аймак, Восточный (Дорнод) аймак, Сухэ-Баторский (Сухбаатар) аймак.

По фактическим данным 61-ой МС был определен валовой потенциал ветровой энергии всей территории Монголии  $\mathcal{E}_{вал}$  [3] на высоте 10 м по формуле:

$$\mathcal{E}_{вал} = \sum_{i=1}^k \mathcal{E}_{уд_i} \cdot F_i / 20 \quad (1)$$

где  $k$  – количество районов, на которые разбита территория Монголии;  $i$  – номер района,  $\mathcal{E}_{уд_i}$  – средняя (по данным всех МС из этого района) удельная валовая мощность ветра в  $i$ -м районе,  $F_i$  – площадь  $i$ -ого района. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. РАСЧЕТ ВАЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ ВСЕЙ МОНГОЛИИ НА ВЫСОТЕ 10 м

Район	$F$ , тыс.км <sup>2</sup>	$\mathcal{E}_{уд_i}$ , кВт·ч/м <sup>2</sup> в год	$\mathcal{E}_{вал_i}$ , млн кВт·ч в год	Кол-во МС
Западная Монголия	273,806	2078,3	6579,1	12
Северная Монголия	194,633	1434,2	4590,7	11
Центральная Монголия	312,934	3717,1	13174,0	15
Восточная Монголия	291,752	3317,1	16165,0	11
Гоби	490,991	6100,6	37183,8	12
Вся Монголия	1564,116	16647,3	77692,6	61

Валовой потенциал ветровой энергии на высоте 10 м всей Монголии составляет 77692,6 млн кВт·ч в год.

Также был рассмотрен вопрос энергетической эффективности различных моделей ветроэлектрических установок (ВЭУ) на одной из выбранных перспективных площадок под размещение ветроэлектрической станции (ВЭС) – недалеко от МС Мандалгоби с доступной площадью 12 км<sup>2</sup>. Выбор площадки ВЭС был сделан с учетом возможности присоединения к электрической сети, транспортной доступности и учета экологических условий.

Поскольку данные о поступлении ветровой энергии в свободном доступе могут быть получены только для высоты 10 м, а выработка ВЭС определяется по данным на высоте оси ветроколеса, то необходимо располагать либо фактическими данными на высоте оси ветроколеса ВЭУ (ветромониторинг), либо математическими

моделями вертикального профиля ветра. Большинство известных математических моделей вертикального профиля ветра основаны на эмпирических формулах и коэффициентах, справедливых только для определенной территории. Ввиду отсутствия фактических данных наблюдений на разной высоте в условиях выбранной площадки ВЭС моделирование ряда скорости ветра по высоте проводилось по степенному закону с использованием математической модели определения коэффициента степени (показателя Хеллмана) по разработанной методике на кафедре ГВИЭ НИУ «МЭИ» [4]. Математическая модель коэффициента степенной зависимости вертикального профиля ветра на выбранной площадке ВЭС была получена по данным аэрологической метеостанции аналога (АМС). Выбор АМС в качестве аналога производился из 4-х АМС, расположенных на территории РФ в приграничной зоне с Монголией, в радиусе до 1000 км от выбранной площадки ВЭС из СБД «Вертикальный профиль ветра» [5] (табл.2). В качестве аналога была выбрана АМС Иркутск по двум критериям: минимальное расстояние от АМС до МС Мандалгоби; минимальное среднее квадратичное отклонение годовой вариации скорости на площадке АМС от годовой вариации на МС Мандалгоби (на высоте 10 м). В таблице 3 и на рисунке 5 представлены годовые вариации скорости ветра на площадках АМС и МС Мандалгоби.

Таблица II. КООРДИНАТЫ БЛИЖАЙШИХ АМС ОТ ПЛОЩАДКИ ВЭС

Наименование АМС	$\phi$ , с.ш.	$\psi$ , в.д.	$h$ , м	Расстояние между МС и АМС, км
Усть-Баргузин	53,4	109	461	864
Красный Чикой	50,4	108,8	771	544
Иркутск	52,3	104,3	469	742
Жигалово	54,8	105,2	426	1002

Таблица III. ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ СКОРОСТИ (в о.е.) НА ПЛОЩАДКАХ АМС, РАССМАТРИВАЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ АНАЛОГА ДЛЯ МС МАНДАЛГОБИ

Месяц	МС Мандалгоби	Усть-Баргузин	Жигалово	Красный Чикой	Иркутск
1	0,87	1,28	0,75	0,9	0,87
2	0,95	0,88	0,75	0,75	0,98
3	1,09	0,75	1,08	1,35	1,15
4	1,23	0,97	1,58	1,8	1,47
5	1,33	0,66	1,17	1,5	1,31
6	1,16	0,57	1,08	0,75	0,98
7	0,96	0,35	0,92	0,75	0,87
8	0,96	0,62	0,92	0,45	0,82
9	0,91	0,93	0,83	0,9	0,76
10	0,93	1,15	1,08	0,9	0,98
11	0,82	1,81	1	1,05	1,04
12	0,79	2,03	0,83	0,9	0,76

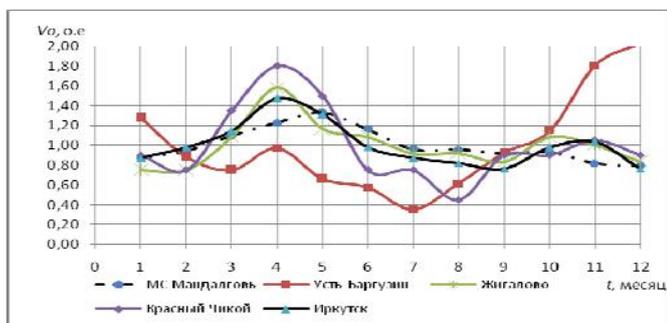


Рис. 5. Многолетние годовые вариации скорости ветра на площадках АМС и МС Мандалгоби

Математическая модель коэффициента степенной зависимости вертикального профиля ветра по данным АМС Иркутск была определена по разработанной методике на кафедре ГВИЭ НИУ «МЭИ» в виде эмпирической зависимости среднемесячных показателей Хеллмана  $m_l$  от среднемесячной скорости ветра  $V_l$  - на высоте 10 м:  $m_l = 0,6739 \cdot V_l^{-0,728}$  (рис.6).

Был проведен детальный расчет и анализ ветровых ресурсов для условий площадки ВЭС на разной высоте по данным МС Мандалгоби и АМС Иркутск. На рисунке 7 приведена многолетняя вариация средней скорости ветра на площадке ВЭС.

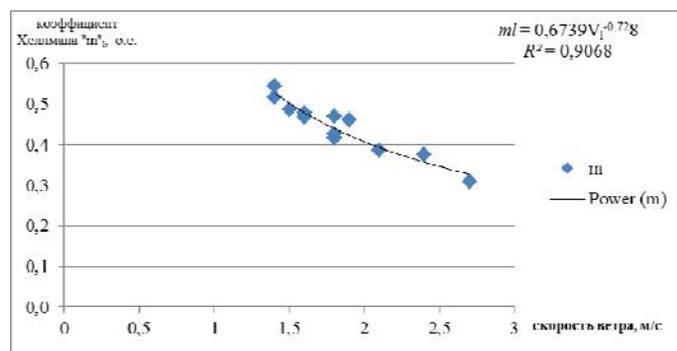


Рис. 6. Табулированная и эмпирическая зависимости среднемесячных показателей Хеллмана  $m_l$  от среднемесячной скорости ветра  $V_l$  на высоте 10 м по данным АМС Иркутск

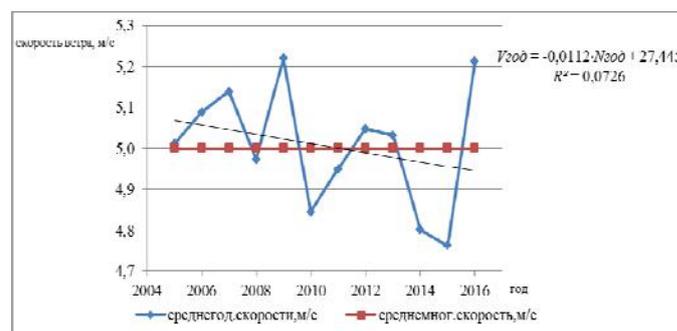


Рис. 7. Многолетняя вариация средней скорости ветра на площадке ВЭС

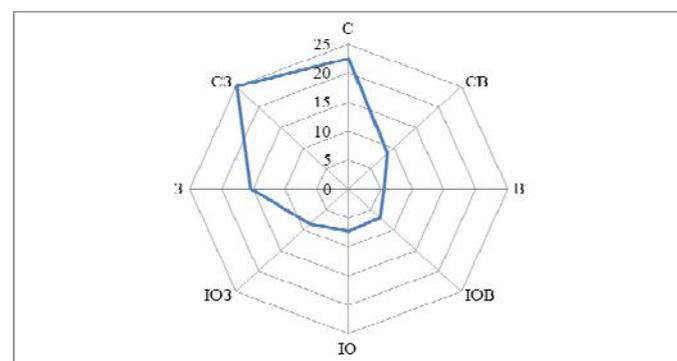


Рис. 8. Многолетняя «роза ветра» на площадке ВЭС

Выбор энергоэффективных моделей ВЭУ для условий площадки ВЭС производился по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности ВЭУ  $k_{\text{нум}}$  из 16-и предварительно отобранных вариантов в соответствии с ИЕС 61400-1 по данным СБД «Современное ветроэнергетическое оборудование». В качестве дополнительного критерия использовался

показатель удельной энергии с единицы ометаемой площади  $\mathcal{E}_{\text{взууд}}$  по ГОСТ Р 51991-2002. Годовая выработка единичных ВЭУ  $\mathcal{E}_{\text{взу}}$  определялась по их паспортным энергетическим характеристикам. Наиболее энергоэффективные варианты ВЭУ с разной высотой башни представлены в таблице 4.

Таблица IV. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАИБОЛЕЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ВЭУ

Фирма/ Модель	Enercon	Windtec	Enron	Vestas
	E82/2000	WT3000df/120	1.5sle	V90/3000
$N_{\text{уст}}, \text{кВт}$	2000	3000	1500	3000
$H_{\text{б}}, \text{м}$	78	80	80	80
$\mathcal{E}_{\text{взу}}, \text{МВт}\cdot\text{ч в год}$	7303,6	11333,9	5470,9	10074,1
$K_{\text{цум}}$	0,42	0,43	0,42	0,38
$D, \text{м}$	82	120	77	112
$F, \text{м}^2$	5281	11310	4657	9852
$\mathcal{E}_{\text{взууд}}, \text{МВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \text{ в год}$	1,38	1,00	1,18	1,02
$h, \text{ч/год}$	3652	3778	3647	3358
Фирма	Made		Made	
	G87		G90	
$N_{\text{уст}}, \text{кВт}$	2000		2000	
$H_{\text{б}}, \text{м}$	67	78	67	78
$\mathcal{E}_{\text{взу}}, \text{МВт}\cdot\text{ч в год}$	7386,9	7630,3	7588,6	7794,2
$K_{\text{цум}}$	0,42	0,43	0,44	0,45
$D, \text{м}$	87	87	90	90
$F, \text{м}^2$	5945	5945	6362	6362
$\mathcal{E}_{\text{взууд}}, \text{МВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \text{ в год}$	1243	1284	1193	1225
$h, \text{ч/год}$	3693	3815	3794	3897

В качестве наиболее энергетически эффективной модели ВЭУ для дальнейших исследований выбран вариант ВЭУ модели Made G90.

Выбор схемы размещения ВЭУ на площадке ВЭС производился с учетом топографии площадки и преобладающего направления ветра (рис. 9). Выбрана расстановка ВЭУ в два ряда, расстояние между ВЭУ вдоль преобладающего направления ветра  $10 \cdot D_{\text{вк}}$  и перпендикулярно -  $6 \cdot D_{\text{вк}}$  ( $D_{\text{вк}}$  – диаметр ветроколеса). При такой схеме на выбранной площадке возможно разместить 25 единичных ВЭУ. Уточненная выработка ВЭС мощностью 50 МВт с учетом различных видов потерь (около 11,5%) составляет 174524 МВт·ч в год.

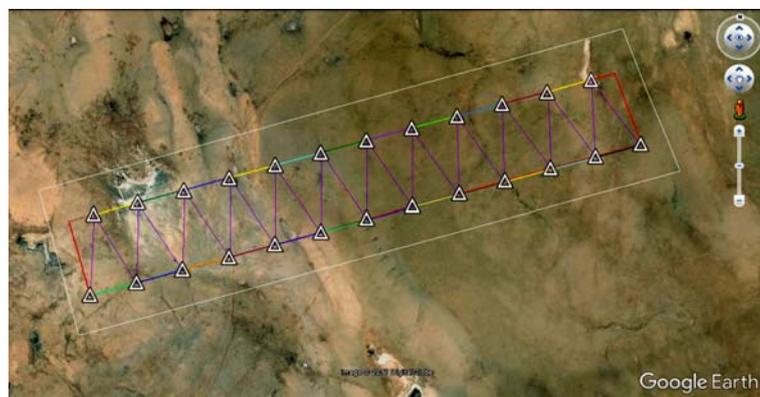


Рис. 9. Схема размещения ВЭУ на площадке ВЭС

Выводы:

1. Валовой потенциал ветровой энергии Монголии на высоте 10 м составляет 77692,6 млн кВт·ч в год.
2. Построены карты распределения среднесуточной скорости ветра и удельной мощности на высоте 10 м. Анализ карт выявил, что наиболее перспективно развитие ветровой энергетики в южных и восточных регионах Монголии.
3. Для условий выбранной площадки осуществлен выбор энергоэффективной модели ВЭУ, схемы размещения ВЭУ на площадке и определено максимально возможное количество ВЭУ для размещения на площадке.

#### Список литературы

- [1] Секретариат энергетической хартии, Углубленный обзор по инвестиционному климату и структуре рынка в энергетическом секторе Монголии. – 2013. – 66 с.
- [2] Российский метеорологический сайт «Расписание Погоды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rp5.ru>
- [3] Виссарионов В.И., Кузнецова В.А., Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Шван Д.Э., Расчет ресурсов ветровой энергетики: учебное пособие /–М: Издательство МЭИ, – 1997 г. –15 с.
- [4] Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие /–М: Издательство МЭИ, – 2012 г. –52 с.
- [5] Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2012620870. Специализированная база данных «Вертикальный профиль ветра» / Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Чернов Д.А.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" - №2012620664; заявл. 28.06.2012; опубл. 28.08.2012

# ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СОСТАВЕ ДИЗЕЛЬ-ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

И.С. Зонов, Е.А. Пономарева

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия  
Email: igor-zonov@mail.ru

*Аннотация* — В настоящее время наблюдается тенденция к использованию возобновляемых источников энергии при построении автономных систем электроснабжения. В частности, возможно использование комбинации дизельной электростанции и фотоэлектростанции в районах с высоким значением солнечной инсоляции для покрытия нагрузки потребителей. При проведении исследования была рассмотрена автономная энергосистема, содержащая дизельную электростанцию и фотоэлектростанцию. Для данной системы производилась оценка оптимальной установленной мощности фотоэлектростанции, обеспечивающей минимальный срок окупаемости. В ходе работы была получена зависимость срока окупаемости проекта системы автономного электроснабжения от установленной мощности фотоэлектростанции. Полученная зависимость позволяет выбрать установленную мощность солнечной электростанции, обеспечивающую минимальный срок окупаемости проекта системы электроснабжения. Данный метод может применяться при создании проектов автономного электроснабжения.

*Ключевые слова* — изолированные энергосистемы; солнечная электростанция; возобновляемые источники энергии; срок окупаемости.

## OPTIMAL RATED CAPACITY ASSESMENT OF SOLAR POWER PLANT WORKING IN THE COMPOSTION OF DIESEL-PHOTOVOLTAIC HYBRID POWER SYSTEM

I.S. Zonov, E.A. Ponomareva

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin  
Yekaterinburg, Russia  
Email: igor-zonov@mail.ru

*Abstract* — Nowadays there is a strong tendency for using the renewable energy sources in stand-alone power supplies. For example, it is possible to use combination of diesel power station and solar power station in areas that are characterized by high level of insolation. Research was carried out with analyzing the dependency of stand-alone power supply payback period on the solar power plant rated capacity. The dependence of stand-alone power supply payback period on the solar power plant rated capacity was obtained. The dependency found makes it possible to evaluate the solar power plant rated capacity that ensures the minimum of payback period. The method proposed may be used when working out the projects on stand-alone power supply.

*Keywords* — isolated power systems; solar power plant; renewable energy sources; payback period.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России существует множество районов, удаленных от крупных энергообъединений. Электроснабжение таких районов осуществляется с использованием автономных генерирующих установок. В основном в качестве источников питания применяются дизельные генераторные установки (ДГУ). К их преимуществам относятся простота установки и

эксплуатации, однако они характеризуются большим расходом топлива, что приводит к увеличению эксплуатационных затрат. Как правило, при их эксплуатации затраты на топливо значительно превышают прибыль от продажи электроэнергии. На рис. 1 представлены графики затрат на топливо и прибыли от продажи электроэнергии, рассчитанные для поселка Батакан в Забайкальском крае. Из рисунка видно, что

использование ДГУ в качестве основного источника питания экономически неэффективно.

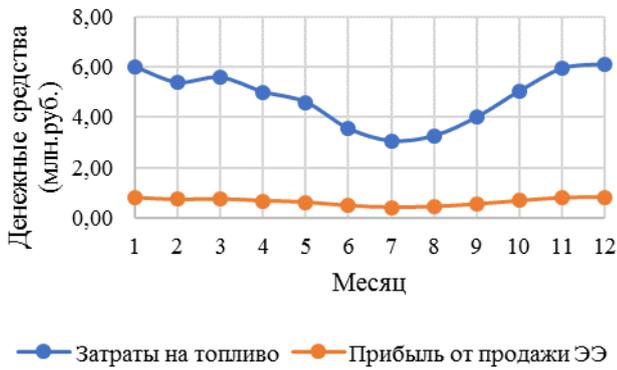


Рис. 1. Графики расходов и доходов при эксплуатации ДГУ

В последнее время для электроснабжения удаленных потребителей начинают использоваться возобновляемые источники энергии, такие как ветряные и солнечные электростанции малой мощности. Однако несмотря на преимущества в виде отсутствия необходимости в топливе, они имеют ряд особенностей, в первую очередь связанных с зависимостью эффективности работы от погодных условий. Кроме того, они требуют значительных капитальных вложений на этапе сооружения, что в свою очередь приводит к длительному сроку окупаемости. Тем не менее, в сравнении с ДГУ такой вариант экономически более эффективен.

В данной работе предлагается метод, позволяющий оценить оптимальную мощность фотоэлектростанции (ФЭС), работающей в составе дизель-фотоэлектрической гибридной энергосистемы. Оптимальной мощностью в рассматриваемом случае считается такая, которая обеспечивает минимальный срок окупаемости при совместном использовании ДГУ и ФЭС.

## II. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Предлагаемый метод используется для выбора оптимальной мощности ФЭС при ее установке в изолированной энергосистеме, содержащей дизель-генераторную установку. Подобная необходимость может возникнуть в случае роста нагрузки энергосистемы и необходимости ее покрытия.

## III. МЕТОДИКА

Выбор оптимальной мощности ФЭС осуществляется на основе расчета срока окупаемости для ряда электростанций различной мощности.

В качестве исходных данных используются:

- Месячные значения потребления энергосистемы;
- Значения солнечной инсоляции для рассматриваемого района;
- Параметры имеющегося генерирующего оборудования (ДГУ): установленная мощность, расход топлива;
- Цена топлива в рассматриваемом регионе (с учетом доставки);

Выбор оптимальной мощности ФЭС производится в несколько этапов

- 1) Расчет объема электроэнергии, вырабатываемого ФЭС;

- 2) Расчет объема электроэнергии, вырабатываемого ДГУ;
- 3) Расчет капиталовложений в сооружение ФЭС;
- 4) Расчет доходов;
- 5) Расчет расходов;
- 6) Определение срока окупаемости.

Следует отметить, что все расчеты, обозначенные выше, производятся для всех значений установленной мощности ФЭС. Расчеты объемов электроэнергии осуществляются для каждого месяца в году.

### A. Расчет объема электроэнергии, вырабатываемого ФЭС

Выработка ФЭС рассчитывается на основе данных о значениях солнечной инсоляции в рассматриваемом регионе, которые представляют собой количество энергии, обеспечиваемое солнечным излучением [1,2]. Расчет вырабатываемой ФЭС электроэнергии производится по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ФЭС}}^i = P_{\text{ФЭС}} \cdot \eta \cdot S_{\text{ПАН}} \cdot I^i, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ФЭС}}^i$  - энергия, вырабатываемая ФЭС за i-й месяц, кВт\*ч;  $P_{\text{ФЭС}}$  - установленная мощность ФЭС, кВт;  $\eta$  - КПД устанавливаемых солнечных панелей, о.е.;  $S_{\text{ПАН}}$  - удельная площадь устанавливаемых панелей, м<sup>2</sup>/кВт;  $I^i$  - значение солнечной инсоляции для i-го месяца, кВт\*ч/м<sup>2</sup>.

Такой расчет осуществляется для каждого месяца в году. Учитывая характер изменения солнечной активности в течение года, годовой график выработки ФЭС как правило имеет вид, представленный на рис. 2.

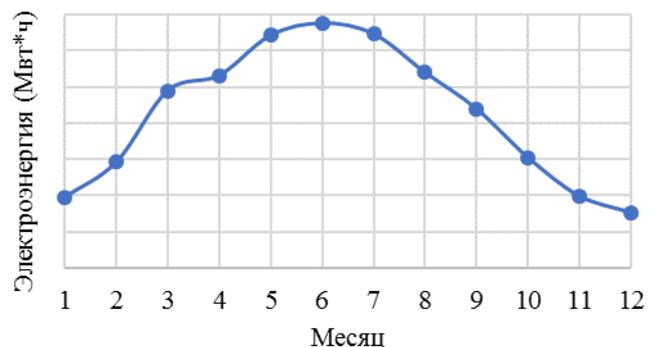


Рис. 2. Вид годового графика выработки ФЭС

### B. Расчет объема электроэнергии, вырабатываемого ДГУ

Особенностью ФЭС является неравномерная выработка электроэнергии в течение суток и года, как видно из рис. 2, а также зависимость от погодных условий. При ее функционировании возникающий дефицит мощности покрывается ДГУ, которая вырабатывает недостающий объем электроэнергии:

$$\mathcal{E}_{\text{ДГУ}}^i = \mathcal{E}_{\text{нагр}}^i - \mathcal{E}_{\text{ФЭС}}^i, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{ДГУ}^i$  - энергия, вырабатываемая ДГУ за  $i$ -й месяц, кВт\*ч;  $\mathcal{E}_{нагр}^i$  - потребление энергосистемы за  $i$ -й месяц, кВт\*ч.

Как видно из (1) и (2), увеличение мощности ФЭС приводит к росту ее выработки, тем самым снижая время работы ДГУ в течение года.

Помимо месячной выработки ДГУ, необходимо найти объем электроэнергии, вырабатываемый ДГУ за год, чтобы оценить затраты на топливо. Он рассчитывается посредством суммирования месячных объемов выработки:

$$\mathcal{E}_{ДГУ}^{год} = \sum_{i=1}^{12} \mathcal{E}_{ДГУ}^i . \quad (3)$$

#### C. Расчет капиталовложений в сооружение ФЭС

Расчет капитальных вложений в сооружение ФЭС как правило производится по удельной цене за сооружение 1 МВт установленной мощности при отсутствии более точных сведений о стоимости сооружения электростанции нужного типа:

$$K_{ФЭС} = K_{уд} \cdot P_{ФЭС} , \quad (4)$$

где  $K_{ФЭС}$  - капиталовложения в сооружение ФЭС, млн.руб.;  $K_{уд}$  - удельная стоимость строительства 1 МВт установленной мощности ФЭС, млн.руб./МВт.

#### D. Расчет доходов

Основным источником дохода при расчете является прибыль от продажи электроэнергии, которая определяется на основе годового объема потребления и устанавливаемого тарифа [3]:

$$C_{дох}^{год} = T \cdot \mathcal{E}_{нагр}^{год} , \quad (5)$$

где  $C_{дох}^{год}$  - размер годового дохода от продажи электроэнергии;  $T$  - тариф на электроэнергию для рассматриваемого региона, руб./кВт\*ч;  $\mathcal{E}_{нагр}^{год}$  - годовое потребление энергосистемы, кВт\*ч.

#### E. Расчет расходов

Основной статьей расходов при эксплуатации ДГУ являются затраты на топливо, которые напрямую зависят от объема электроэнергии, вырабатываемого данной генерирующей установкой:

$$C_{расх}^{год} = \mathcal{E}_{ДГУ}^{год} \cdot V_{топл.уд} \cdot (C_{топл} + C_{дост.топл} \cdot l) , \quad (6)$$

где  $C_{расх}^{год}$  - размер годовых расходов на топливо;  $\mathcal{E}_{ДГУ}^{год}$  - энергия, вырабатываемая ДГУ за год, кВт\*ч;  $V_{топл.уд}$  - удельный расход топлива ДГУ, л/кВт\*ч;  $C_{топл}$  - цена

топлива, руб./л;  $C_{дост.топл}$  - стоимость доставки топлива, руб./л\*км;  $l$  - расстояние до пункта поставки топлива, км.

#### F. Определение срока окупаемости

Срок окупаемости рассчитывается приближенно, при его определении принимаются следующие допущения:

- не учитывается дисконтирование;
- не учитывается естественный прирост потребления в энергосистеме.

С учетом указанных выше допущений срок окупаемости рассчитывается на основе капиталовложений в сооружение ФЭС и ежегодного притока денежных средств, определяемого как разность доходов и расходов:

$$t_{окуп} = \frac{K_{ФЭС}}{C_{дох}^{год} - C_{расх}^{год}} . \quad (7)$$

Как было обозначено выше, оптимальной мощностью ФЭС считается мощность, обеспечивающая минимальный срок окупаемости и, следовательно, максимальный экономический эффект.

### IV. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Представленный метод был применен при разработке проекта электроснабжения поселка Батакан в Забайкальском крае. Ниже на рис. 3 представлен годовой график потребления, в табл. I – основные исходные данные, в табл. II – значения солнечной инсоляции для Забайкальского края. В данном случае вариант ФЭС как источника питания был выбран по причине высокой солнечной активности в рассматриваемом регионе.

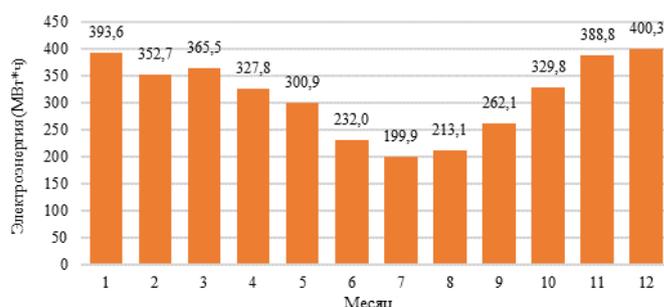


Рис. 3. График потребления пос. Батакан

Таблица I. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

№	Показатель	Величина
1	Максимум нагрузки	958 кВт
2	Мощность ДГУ	400 кВт
3	Расход топлива ДГУ	0,3 л/кВт*ч
4	Цена топлива	40 руб./л
5	Расстояние до пункта поставки топлива (г. Чита)	365 км

Таблица II. ЗНАЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ИНСОЛЯЦИИ  
ДЛЯ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

Месяц	Инсоляция в день, кВт*ч/м <sup>2</sup>	Дней в месяце	Инсоляция в месяц, кВт*ч/м <sup>2</sup>
январь	1,64	31	50,84
февраль	2,72	28	76,16
март	4,11	31	127,41
апрель	4,61	30	138,3
май	5,39	31	167,09
июнь	5,86	30	175,8
июль	5,42	31	168,02
август	4,53	31	140,43
сентябрь	3,81	30	114,3
октябрь	2,56	31	79,36
ноябрь	1,72	30	51,6
декабрь	1,28	31	39,68

С использованием представленной методики были рассчитаны сроки окупаемости ФЭС мощностью от 200 до 6000 кВт. Результаты расчетов представлены в табл. III.

Таблица III. РАСЧЕТ СРОКА ОКУПАЕМОСТИ  
ДЛЯ ФЭС РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

$P_{ФЭС}$ кВт	$\mathcal{E}_{ФЭС}^{год}$ кВт*ч	$K_{ФЭС}$ млн.руб	$\mathcal{E}_{ДГУ}^{год}$ кВт*ч	$C_{расх}^{год}$ млн.руб	$C_{дох}^{год}$ млн.руб	$t_{окуп}$ лет
0	0,0	0	3766	57,56	11,30	-
200	637,9	14	3129	47,81	11,30	-
400	1275,8	28	2491	38,06	11,30	-
600	1913,7	42	1916	29,28	11,30	-
800	2551,7	56	1519	23,22	11,30	-
1000	3189,6	70	1211	18,50	11,30	-
1200	3827,5	84	1008	15,40	11,30	-
1400	4465,4	98	865	13,22	11,30	-
1600	5103,3	112	722	11,04	11,30	428
1800	5741,2	126	592	9,05	11,30	56,1
2000	6379,2	140	501	7,65	11,30	38,4
2200	7017,1	154	432	6,61	11,30	32,8
2400	7655,0	168	364	5,56	11,30	29,3
2600	8292,9	182	296	4,52	11,30	26,9
2800	8930,8	196	228	3,48	11,30	25,1
3000	9568,7	210	159	2,44	11,30	23,7
3200	10206,6	224	99	1,51	11,30	22,9
3400	10844,6	238	76	1,17	11,30	23,5
3600	11482,5	252	57	0,88	11,30	24,2
3800	12120,4	266	38	0,59	11,30	24,8
4000	12758,3	280	19	0,30	11,30	25,4
4200	13396,2	294	0	0,00	11,30	26,0
4400	14034,1	308	0	0,00	11,30	27,3
4600	14672,0	322	0	0,00	11,30	28,5
4800	15310,0	336	0	0,00	11,30	29,7
5000	15947,9	350	0	0,00	11,30	31,0
5200	16585,8	364	0	0,00	11,30	32,2
5400	17223,7	378	0	0,00	11,30	33,5
5600	17861,6	392	0	0,00	11,30	34,7
5800	18499,5	406	0	0,00	11,30	35,9
6000	19137,5	420	0	0,00	11,30	37,2

На рис. 4 представлен график зависимости срока окупаемости ФЭС от ее установленной мощности. Из рисунка видно, что минимум соответствует мощности 3200 кВт, что позволяет достичь срока окупаемости

порядка 23 лет. Наличие минимума обусловлено тем, что при малой мощности ФЭС выработка ДГУ достаточно велика, что приводит к большим затратам на топливо. По мере увеличения мощности ФЭС доля выработки ДГУ снижается. Следует отметить, что объем потребляемой электроэнергии не зависит от мощности ФЭС, следовательно, величина дохода не меняется. Из-за этого при большой мощности ФЭС (более 3200 кВт) увеличение капиталовложений не уравновешивается увеличением притока денежных средств, и срок окупаемости увеличивается.

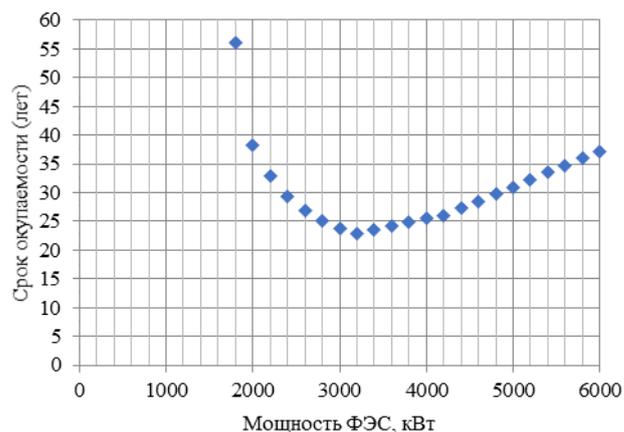


Рис. 4. Зависимость срока окупаемости ФЭС от установленной мощности

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В данной статье был предложен метод, позволяющий произвести оценку оптимальной мощности ФЭС, сооружаемой в энергосистеме, питающейся от ДГУ. Оптимальной мощностью считалась мощность, обеспечивающая минимальный срок окупаемости ФЭС. Представленный метод может быть использован при разработке проектов по электроснабжению изолированных энергосистем, направленных на повышение экономической эффективности.

Дальнейшее исследование будет сосредоточено на повышении точности оценки и учете большего количества факторов: естественный прирост нагрузки, дисконтирование, работа ДГУ для регулирования частоты, работа энергосистемы в ночное время и т.д.

## Список литературы

- [1] Охоткин, Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций / Г.П. Охоткин // Вестник Чувацкого университета. – 2013. - №3. – с.222-230.
- [2] Солнечная инсоляция – справочные таблицы [Электронный ресурс]. / Альтернативная энергетика: сайт URL: <https://alternativenergy.ru/solnechnaya-energetika/312-solnechnaya-insolyaciya.html>.
- [3] О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике: Постановление Правительства РФ от 29.12.2011 N 1178 // Собрание законодательства. – 2012. - №4. – Ст.504.

# Технико-экономическое обоснование строительства малых ГЭС в республике Хакасия

Е.В. Щербаков, М.В. Кяри  
ФГАОУ ВПО "Сибирский федеральный университет" Саяно-Шушенский филиал СФУ  
Саяногорск, р.п. Черёмушки, Россия  
E-mail: [Eugene\\_Shv@mail.ru](mailto:Eugene_Shv@mail.ru)

Е.А. Толстихина  
АО "СО ЕЭС"  
Москва, Россия  
E-mail: [catherine\\_t@bk.ru](mailto:catherine_t@bk.ru)

К.А.Никишин  
АО "НТЦ ЕЭС (Московское отделение)"  
Москва, Россия

*Аннотация* — произведено технико-экономическое обоснование строительства малых ГЭС в республике Хакасия на примере пяти станций. Показано, что окупаемость электростанций в среднем составляет 10 лет. Произведена уточнённая оценка процентной ставки из-за небольших сроков строительства. Рассчитана прибыль на каждый год эксплуатации с учётом инфляции. Расчёты показывают актуальность строительства малых ГЭС в республике Хакасия при достаточно низкой себестоимости электроэнергии. Проектируемые электростанции смогут обеспечить электроэнергией новые предприятия добывающей и обрабатывающей промышленности, а также предприятия этноэкономики.

*Ключевые слова* — срок окупаемости, процентная ставка, учёт инфляции, гидроэнергетический потенциал, малая ГЭС, чистый дисконтированный доход, капиталовложения, себестоимость электроэнергии

## Technical and economic substantiation of construction of small HPPs in the republic of Khakasia

E.V. Shcherbakov, M.V. Kiari  
Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch office  
Sayanogorsk, Cheryomushki, Russian Federation  
E-mail: [Eugene\\_Shv@mail.ru](mailto:Eugene_Shv@mail.ru)

E.A. Tolstikhina  
"SO UPS" JSC  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: [catherine\\_t@bk.ru](mailto:catherine_t@bk.ru)

K.A. Nikishin  
«STC of UPS» JSC  
Moscow, Russian Federation

*Abstract* — a substantiation for the construction of small HPPs in the Republic of Khakassia is made with using of the example of five stations. The payback period of the plants would take about 10 years. A refined estimate of the interest rate was made because of the short construction time. Calculated profit for each year of operation, including inflation. The provided computation results show high effectiveness of small HPPs in Khakassia at a sufficiently low cost of electricity. The projected power plant may cover all the needs of developing mining companies, factories and ethnic enterprises.

*Keywords:* — payback period, interest rate, accounting for inflation, hydropower potential, small HPPs, net present value, capital investment, cost of electricity

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач, стоящей перед современной электроэнергетикой, является обеспечение доступности электроэнергии для всех потребителей, в том числе значительно удалённых от централизованных энергоузлов. Наиболее простым решением такой задачи будет поиск местных источников электроэнергии. Для районов, богатых водными ресурсами, такими источниками будут являться малые ГЭС (МГЭС). Себестоимость производства электроэнергии на МГЭС в 7-10 раз дешевле, чем на тепловых и атомных электростанциях [1]. В условиях медленного прогресса в создании альтернативных источников электроэнергии в России, доля гидроэнергетики в энергетическом балансе страны со временем будет только возрастать, а уровень развития данной отрасли, в свою очередь, отразит достигнутый экономический потенциал страны, поэтому структурным лидером в развитии электроэнергетики на ближайшие десятилетия станет гидроэнергетика, как наиболее развитая и инвестиционно привлекательная отрасль народного хозяйства.

Общемировые тенденции современной энергетической отрасли заключаются в постепенном переходе к ВИЭ, при наращивании их доли в общем балансе энергетической системы и в будущем к отказу от невозобновляемых источников в пользу сравнительно экологически чистой и недорогой электроэнергии. Сегодня существует множество проектов по реализации малой гидроэнергетики во многих странах. Она способствует росту экономики в регионах, созданию новых рабочих мест. Системы автоматизированной работы МГЭС также ведут к снижению затрат на эксплуатацию.

В данной работе определены показатели эффективности инвестирования проекта строительства МГЭС, а также произведено технико-экономическое обоснование строительства станций.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАПИТАЛОВЛОЖЕНИЙ

Параметры МГЭС представлены в таблице 1[3].

### A. Исходные параметры МГЭС

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ МГЭС

Название/параметр	Аскизская	Онакская	Ербинская	Июсская	Тёйская
$N_{уст}$ , МВт	48,5	16,4	26	12	15
$\bar{E}_{год}$ , млн. кВт·ч	169,994	59,841	136,235	60,282	52,287
Напор, м	20	20	20	20	20

Для строительства МГЭС предлагается взять долгосрочный льготный кредит у банка. Возврат заёмных средств банку планируется осуществлять за счёт

поступлений от продажи электроэнергии потребителям. Выполнено обоснование инвестиций в строительство МГЭС, расположенных в республике Хакасия, а также оценена возможность погашения банковского кредита [8].

### B. Полная стоимость

Полная стоимость ГЭС (величина начальных капиталовложений) в долларах США [2]:

$$C_p = 9000 \cdot S \cdot kW^{0.7} / H^{0.35} \quad (1)$$

где  $S$  – фактор расположения [2, с. 2633] значения которого принимаются в диапазоне  $S = 5,1 \pm 25\%$   $kW$  – установленная мощность, кВт;  $H$  – напор, м.

Исходя из наличия производственных мощностей, развитой дорожной развязки, близости необходимых ресурсов для строительства, наличия высококвалифицированного персонала, принимаем  $S = 3,83$  [2].

Стоимость доллара к рублю принята, согласно [7]. Полная стоимость Аскизской ГЭС:

$$C_p = 9000 \cdot 3,83 \cdot 48500^{0.7} / 20^{0.35} = 23019718,15\$$$

В рублёвом эквиваленте:

$$C_p = 23019718,15 \cdot 88 = 2025,735 \text{ млн. руб.}$$

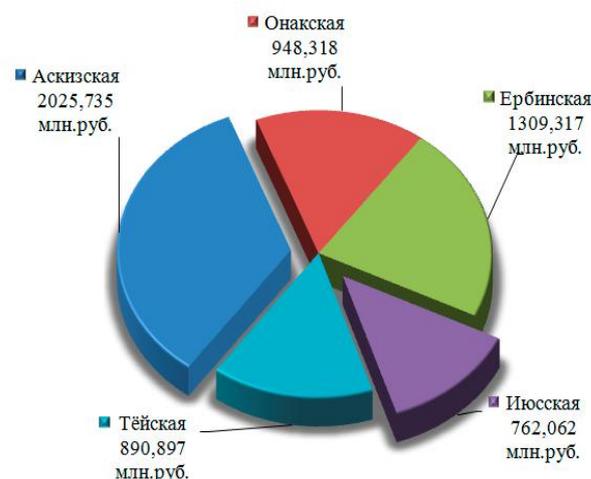


Рис.1 Полная стоимость строительства МГЭС

## III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 01.01.2002 № 1 (ред. от 24.02.2009) "О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы" для данных МГЭС будут характерны девятая и десятая амортизационные группы, принятые из ГОСТ Р 55001-2012 «Гидротурбины, гидроаккумулирующие насосы и турбонасосы. Восстановление и повышение эксплуатационных характеристик».

### А. Издержки на оплату труда

Учитывая, что данные электростанции будут полностью автоматизированы, численность работников (ЧР) составит 5 человек. Фонд оплаты труда ( $\Phi OT_{год}$ ):

$$\Phi OT_{год} = CZ \cdot ЧР \cdot 12 \quad (2)$$

где,  $CZ$  – средняя заработная плата работников, руб.  
 $CZ = 40000$  руб., тогда:

$$\Phi OT_{год} = 2,4 \text{ млн.руб.}$$

### В. Отчисления во внебюджетные фонды

Сумма отчислений во внебюджетные фонды, в которую входят отчисления в пенсионный фонд (ПФ), резервный фонд (РФ), фонд социального страхования (ФСС), федеральный фонд обязательного медицинского страхования (ФФОМС), территориальный фонд обязательного медицинского страхования (ТФОМС) [4]:

$$З_{соц. нужды} = \Phi OT_{год} \cdot 0,34 \quad (3)$$

$$З_{соц. нужды} = 2,4 \cdot 0,34 = 0,816 \text{ млн.руб.}$$

Рассчитаем амортизационные и ремонтные отчисления на содержание гидротехнических сооружений.

Норма амортизаций на содержание плотины:

$$H_{плот} = \frac{100}{\text{Срок службы}} = \frac{100}{100} = 1\% \quad (4)$$

Амортизационные отчисления:

$$A_{плот} = H_{плот} \cdot K_{ГЭС} \quad (5)$$

$$A_{плот} = 0,01 \cdot 2025,735 = 20,26 \text{ млн.руб.}$$

где,  $H_{плот}$  – коэффициент издержки;  $K_{ГЭС}$  – полная стоимость ГЭС.

Ремонтные отчисления на содержание гидротехнических сооружений [6]:

$$P_{плот} = H_{рем} \cdot K_{ГЭС} \quad (6)$$

где,  $H_{рем}$  – нормативный коэффициент ремонтных отчислений;  $K_{ГЭС}$  – капиталовложения,  $K_{ГЭС} = 0,16\%$ .

$$P_{плот} = 0,0016 \cdot 2025,735 = 3,24 \text{ млн.руб.}$$

### С. Издержки на износ основного энергетического оборудования

Стоимость основного энергетического оборудования определена по формуле, которая выражается, номинированной в фунтах стерлингов [2]:

$$C_{EM} = 12000 \cdot \left( \frac{kW}{H^{0,2}} \right)^{0,56} \quad (7)$$

Для Аскизской ГЭС:

$$C_{EM} = 12000 \cdot \left( \frac{48500}{20^{0,2}} \right)^{0,56} = 3609784,37 \text{ £}$$

Стоимость фунта стерлингов к рублю принята из прогнозных данных [4]. Тогда:

$$C_{EM} = 3609784,37 \cdot 70,32 = 253,840 \text{ млн.руб.}$$

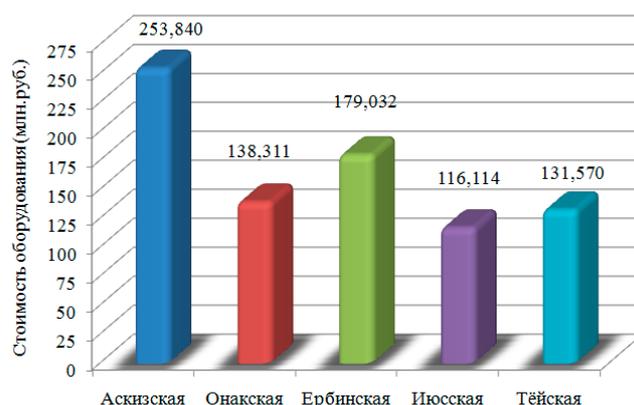


Рис.2 Стоимость основного энергетического оборудования

Издержки на износ основного энергетического оборудования [5]:

$$I_o = 0,022 \cdot C_{EM} \quad (8)$$

$$I_o = 0,022 \cdot 253,840 = 5,584 \text{ млн.руб.}$$

Таблица II. ИЗДЕРЖКИ МГЭС

Издержки	Аскизская	Онакская	Ербинская	Июсская	Тейская
$\Phi OT_{год}$ , млн.руб.	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
$З_{соц. нужды}$ , млн.руб.	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816
$A_{плот}$ , млн.руб.	20,257	9,483	13,093	7,621	8,909
$P_{плот}$ , млн.руб.	3,241	1,517	2,095	1,219	1,425
$I_o$ , млн.руб.	5,584	3,043	3,939	2,555	2,895

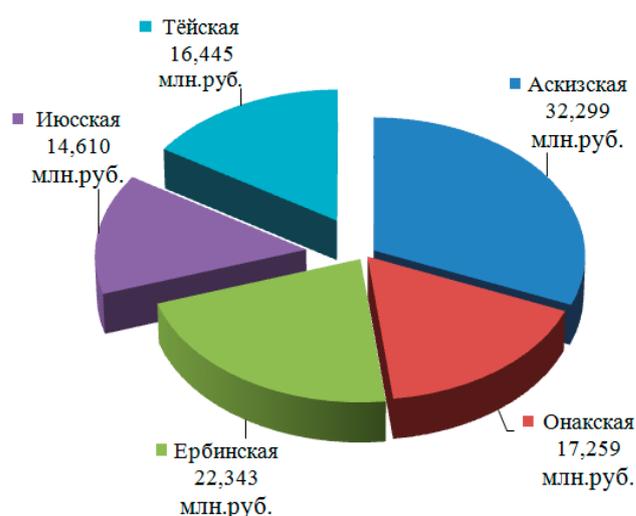


Рис. 3 Суммарные издержки на производство электроэнергии

## V. Выводы

1. Произведён расчёт сроков окупаемости МГЭС, который в среднем составляет 10 лет.
2. При определении ЧДД и срока окупаемости учтены издержки, при которых срок окупаемости увеличивается незначительно.
3. Себестоимость электроэнергии на МГЭС составила в среднем 14 коп./кВт·ч.
4. Неравномерность графика ЧДД обусловлена отладкой и испытаниями оборудования на начальном этапе эксплуатации ГЭС.
5. Последовательность определения технико-экономической эффективности актуальна в настоящий момент и отражает ситуацию в сложившихся экономических реалиях на российском рынке.
6. Учитывая, что срок строительства МГЭС составляет от 1 до 3 лет [9], можно говорить о приемлемости обоснования и определения технико-экономических показателей с большей точностью, нежели при обосновании больших и средних электростанций.

## Список литературы

- [1] Коновалова О.Е. Состояние ГЭС Кольского полуострова. //Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып. 5. Т.3 2012. С. 97-104.
- [2] The costs of small-scale hydro power production: Impact on the development of existing potential. Aggidis G. A., Luchinskaja E., Rothachild R., Howard D.C. Renewable Energy. 2010.35, №12, с. 2632-2638, Англ.
- [3] Е.Г.Сема, Н.С.Фроленко, А.В.Тенешев. Перспективы использования гидроэнергетических ресурсов республики Хакасия // Гидроэлектростанции в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской науч.-практич. конф. / под. ред. В.В. Татарникова. Саяногорск; Черемушки: Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал, 2017. – 344 с.
- [4] Электронный источник: <https://finance.rambler.ru/>.
- [5] Единые нормы амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР (утв. постановлением СМ СССР от 22 октября 1990 г. N 1072).
- [6] Российское акционерное общество энергетики и электрификации “ЕЭС РОССИИ” Нормативы затрат на ремонт в процентах от балансовой стоимости конкретных видов освоение средств электростанции СО 34.20.611-2003 Ю.В. Трофимов, О.Б. Осипов, Б.И.Шар.
- [7] Е.В.Щербаков., Л.В.Толстихина. Техничко-экономическое обоснование строительства малых гидроэлектростанций. // Гидроэлектростанции в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской науч.-практич. конф. / под. ред. В.В. Татарникова. Саяногорск; Черемушки: Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал, 2017. – 344 с.
- [8] Коновалова О.Е. Экономическая оценка наиболее привлекательных проектов малых гидроэлектростанций Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика. Вып. 11. Т.8 2015.С.85-93.
- [9] Местников Н.П. Актуальность эксплуатации малых ГЭС в условиях крайнего севера, СВФУ, Якутск, Россия. Научный диалог: Вопросы точных и технических наук. Сборник научных трудов, по материалам международной научно-практической конференции 12 декабря 2016 г. Изд. ЦНК МНИФ «Общественная наука», 2016. – 48с.



Рис.4 Себестоимость электроэнергии

## IV. Сроки окупаемости МГЭС

Определён чистый дисконтированный доход (ЧДД) [8]. Учтена процентная ставка, которая включает в себя уровень инфляции на каждый год эксплуатации [7]. Прибыль определена, исходя из среднесрочной выработки электроэнергии и прогнозного тарифа [7].

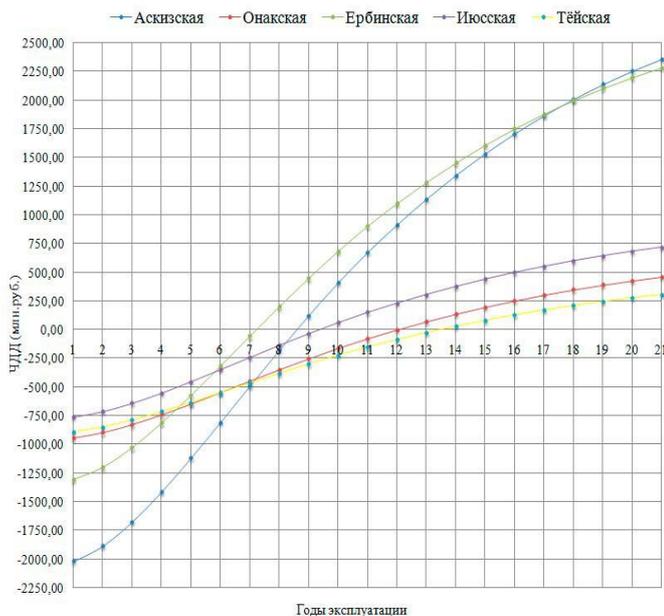


Рис.5 Чистый дисконтированный доход МГЭС

В результате, наименьший период окупаемости происходит у Ербинской ГЭС, он составляет 7 лет и 3 месяца. Аскизская ГЭС окупится через 8 лет и 7 мес., Июсская – 9 лет и 3 мес., Онакская – 12 лет., Тейская – 13 лет и 6 мес.

# Использование геоинформационных систем для поиска перспективного места строительства малых гидроэлектростанций в Республике Хакасия

Д.Н. Кургунов

ФГБОУ ВО "Сибирский федеральный университет" - "Саяно-Шушенский филиал"  
Черёмушки, Россия  
gevinic@mail.ru

*Аннотация* — в настоящее время в электроснабжении отдаленных районов республики Хакасия существует ряд проблем, решением которых является строительство малых ГЭС (МГЭС). Место будущего строительства малой ГЭС определить довольно сложно. Для этого необходимо провести анализ всех приемлемых вариантов и произвести их сравнение по факторам: геологическим, топографическим, гидрологическим и т.д., которые должны быть заранее определены. Из-за больших площадей исследования и большого числа факторов, влияющих на выбор месторасположения будущего створа ГЭС, возникает необходимость в использовании современных технологий. В настоящее время для определения места створа будущей МГЭС перспективным является метод с использованием геоинформационных систем (ГИС).

*Ключевые слова* — геоинформационные системы, малые ГЭС, выбор места строительства.

## Using geoinformation systems for searching a perspective place of construction of small hydro power plants in the Republic of Khakasia

D.N. Kurgunov

FGBOU VO "Siberian Federal University" - "Sayano-Shushensky branch"  
Cheryomushki, Russia  
gevinic@mail.ru

*Abstract*—at present, there are a number of problems in the electricity supply of remote regions of the Republic of Khakassia, the solution of which is the construction of small hydroelectric power plants (SHPPs). The location of the future construction of a small HPP is difficult to determine. To do this, it is necessary to analyze all acceptable options and compare them by factors: geological, topographical, hydrological, etc., which must be determined in advance. Due to large areas of research and a large number of factors influencing the choice of the location of the future power station, it becomes necessary to use modern technologies. At present, a method with the use of geoinformation systems (GIS) is promising to determine the location of future SHPP.

*Keywords* —geoinformation systems, small hydro power plants, choice of construction site.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие малой гидроэнергетики является перспективным направлением в освоении гидроресурсов нашей страны. С помощью малой гидроэнергетики можно решить много проблем в современном энергоснабжении, главной из которых является обеспечение электрической энергией удаленных и труднодоступных потребителей.

В настоящее время в электроснабжении отдаленных районов республики Хакасия существует ряд проблем, решением которых является строительство малых гидроэлектростанций (МГЭС).

На территории Хакасии учтено 324 реки. Регион является подходящим местом для развития малой гидроэнергетики. Место будущего строительства малой ГЭС определить довольно сложно. Для этого необходимо провести анализ всех приемлемых вариантов и произвести их сравнение по факторам: геологическим, топографическим, гидрологическим и т.д., которые должны быть заранее определены.

Из-за больших площадей исследования и большого числа факторов, влияющих на выбор месторасположения будущего створа ГЭС, возникает необходимость в использовании современных технологий. В настоящее время для определения места створа будущей МГЭС

перспективным является метод с использованием геоинформационных систем (ГИС).

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПОСОБА ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

До недавнего времени проектирование ГЭС основывалось на так называемом «традиционном» методе. Такой подход накладывает ограничение на количество рассматриваемых створов для одной реки, что ведет к неточностям при выборе места строительства ГЭС.

Современные технологии позволили пересмотреть подходы к проектированию. Применение ГИС технологий позволяет увеличить объем анализируемой информации (анализ больших пространств и территорий), что приводит к получению более подробных и точных результатов. При помощи ГИС возможно исследование максимального количества створов при максимальном числе определяющих факторов.

Задачей данной работы является определение наилучшего варианта МГЭС для электроснабжения объектов инвестиционной программы. Выполнение этой задачи производится путем сравнения различных вариантов створов и их параметров при помощи определяющих факторов, с применением ГИС технологий.

## III. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Под факторами в данной работе подразумевается совокупность условий, по которым происходит выбор створа, а под критериями – правила, исходя из которых будет производиться принятие решений на соответствие этим условиям.

Для наиболее полного обоснования строительства ГЭС, помимо решения задач эффективного и полного использования гидроэнергетических ресурсов, должны соблюдаться жизненно важные интересы социального характера и охраны окружающей природной среды [2]. Все факторы, влияющие на выбор створов, можно разделить на 4 группы [2]:

Экономические:

- основные параметры проектируемой ГЭС;
- затраты на создание водохранилища;
- срок строительства ГЭС;
- близость к ЛЭП;
- близость к автомобильным дорогам;
- близость к карьерам строительных материалов;
- близость к населенным пунктам;
- близость к потребителю;
- близость к месторождения полезных ископаемых.

Экологические:

- затопление заповедников и особо охраняемых природных территорий;
- затопление могильников и мест, представляющих археологическую ценность;
- затопление лесных массивов, пастбищ и пашен;
- ущерб, наносимый фауне.

Социальные:

- наличие населения в зоне затопления;
- потребность в электроэнергии;
- наличие программ по поддержке развития малой энергетики в регионе.

Технические:

- гидрология реки;
- топография местности;
- гидроэнергетический потенциал;
- инженерно-геологические условия.

## IV. АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ

После определения факторов целесообразно описать алгоритм, по которому будет производиться исследование. Алгоритм построен на основе отсекающих и определяющих критериев. Отсекающие критерии (например, определение применимости типовых гидротурбин) вводятся для выбраковки вариантов створов. Определяющие критерии служат для сравнения створов с точки зрения энергетических характеристик.

Началом алгоритма служат различные исходные данные (данные водомерных постов, план развития региона и т.д), на основе которых проводится исследование. Далее идет обработка этих данных для получения конечного результата, причем если исходных данных не хватает, или они представлены в форме отличной от требуемой, то производится их промежуточная обработка. После этого используются отсекающие критерии для выбраковки неподходящих вариантов. Например, после определения отметок нормального подпорного уровня (НПУ) и уровней нижнего бьефа (УНБ) производится проверка по критерию применимости типовых гидротурбин (возможна ли установка турбин входящих в стандартную номенклатуру). Если полученные данные не соответствуют предъявляемому критерию, то вариант считается выбракованным и далее не рассматривается.

Предложенный алгоритм представлен на рисунке 1.

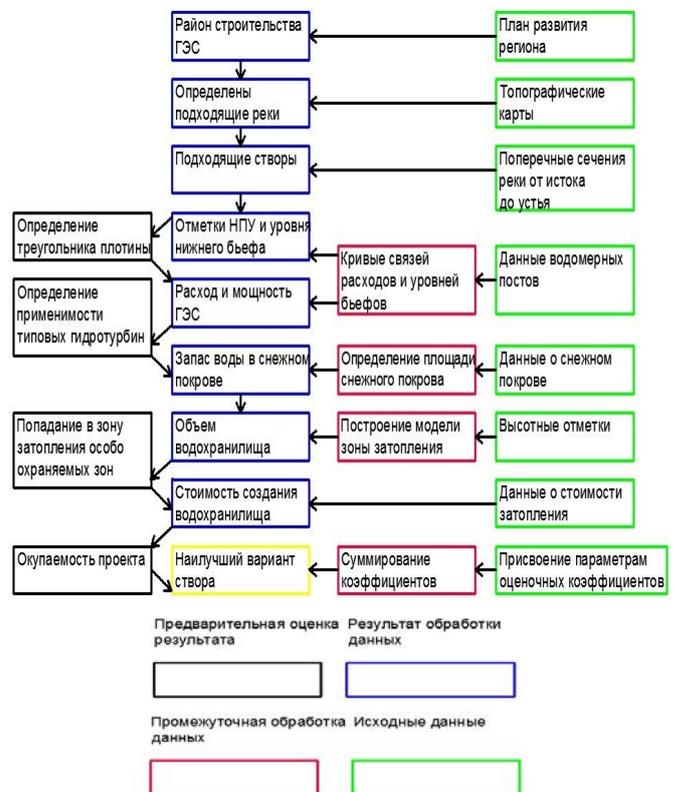


Рис. 1. Алгоритм исследования

Итогом алгоритма является последний этап в ходе которого каждому параметру всех не выбракованных створов присваивается оценочный коэффициент для сравнения.

Присвоение коэффициента производится по следующему принципу, продемонстрированному на примере параметра мощности ГЭС:

$$K_N = \frac{N_{ГЭС}}{N_{макс}}, \quad (1)$$

где,  $K_N$  - коэффициент по мощности ГЭС;  
 $N_{ГЭС}$  - мощность ГЭС;  
 $N_{макс}$  - максимальная мощность для рассматриваемой реки.

После нахождения коэффициентов для каждого параметра, производится их умножение (нахождение суммарного коэффициента створа) и упорядочивание по принципу от большего к меньшему.

Предпочтение отдается створам, получившийся суммарный коэффициент которых ближе остальных к значению равному единице.

## V. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА

Для проведения исследования были выбраны 4 реки (Тёя, Белый Июс, Большая Ерба, Она) находящиеся максимально близко к планируемым объектам строительства в соответствии с планом социально-экономического развития Республики Хакасия до 2030 года. Затем для каждой реки были выявлены створы, подходящие для строительства ГЭС. Для этого при помощи программы Google Earth на всем протяжении рек были рассмотрены их поперечные сечения. Пример рассматриваемого сечения представлен на рисунке 2.

В соответствии с данными [5] были построены кривые связей расходов и уровней бьефов, что позволило определить отметки НПУ и расходы (рисунок 3). После этого проводится оценка створов по предварительным параметрам будущей плотины (построение треугольника плотины).

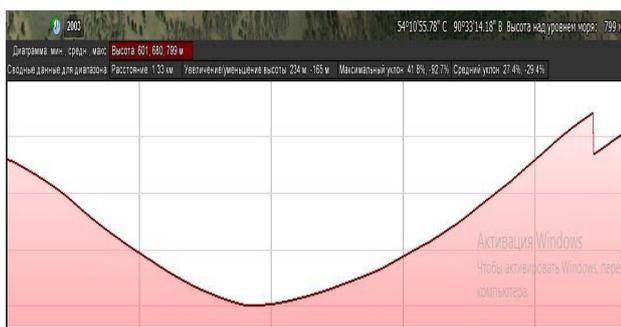


Рис. 2. Поперечное сечение реки Она

Мощность ГЭС для каждого створа определяется по выражению (2):

$$N_{ГЭС} = 9,81 \cdot H \cdot Q \cdot \eta, \quad (2)$$

где,  $N_{ГЭС}$  - мощность ГЭС, МВт;  
 $H$  -напор, м;  
 $Q$  -расход, м<sup>3</sup>/с;  
 $\eta$  -усреднённый параметр КПД гидроагрегата МГЭС.

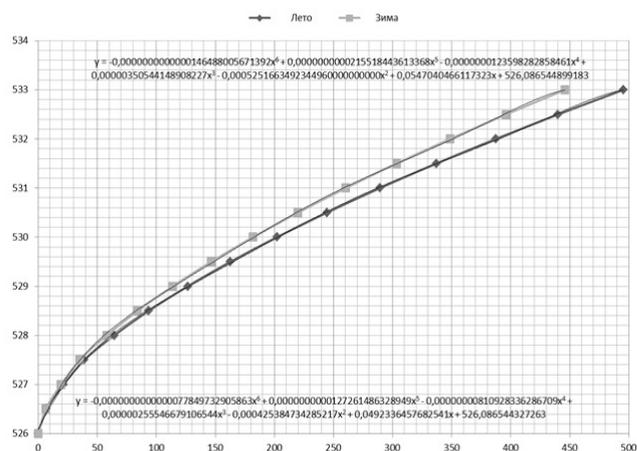


Рис. 3. Кривые связей уровней нижнего бьефа и расходов для реки Она

После нахождения основных энергетических параметров производится расчет запасов воды в снежном покрове, а также обработка данных о водохранилище.

В программном обеспечении ArcGisPro создается модель затопления водохранилища, а также определяется площадь снежного покрова, который попадает в водосборную часть долины реки.

Важным на данном этапе является обработка полученных данных на соответствие ряду факторов связанных с затоплением земель. Если в зону затопления попадают заповедники, места обитания редких видов представителей флоры и фауны, могильники и места, представляющие археологическую ценность, то створ следует считать выбракованным, рассмотрение которого дальше не производится. Затем необходимо рассчитать примерные затраты на затопление пашен, угодий, лесных массивов, переселение населения и сопоставить полученные результаты.

Далее, используя данные ГЭС-аналогов и усредненные показатели, определяются примерные затраты необходимые на создание водохранилища для каждой из отметок НПУ в каждом рассматриваемом створе.

Итогом работы по алгоритму являются наилучшие створы для каждой реки в отношении энергетических, экологических, технических факторов.

## VI. АНАЛИЗ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Определение близости объектов инфраструктуры при помощи ГИС заметно облегчает поставленные перед проектировщиком задачи, при этом, не снижая качества обработанных данных.

Анализ близости объектов инфраструктуры в выбранных районах будет производиться также с применением ГИС.

Для каждого из ниже представленных объектов инфраструктуры определяется расстояние от проектируемого места расположения гидроузла:

- ЛЭП;
- автомобильные дороги;
- карьеры строительных материалов;
- населенный пункт;
- потребитель;

- месторождения полезных ископаемых.

После этого, для установленных значений (измеренное расстояние от ГЭС до каждого объекта) вычисляется оценочный коэффициент, который представляет собой отношение вычисленного значения к минимальному расстоянию среди других створов.

Далее проводится анализ полной картины расположения объектов инфраструктуры.

## VII. Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Использование ГИС-технологий для выбора створов МГЭС позволяет получить результаты предпроектного характера.

2. Метод позволяет определить факторы, критерии и построить цифровую модель рельефа.

3. Рассчитаны параметры возможных створов с использованием ГИС для 4 рек и получены следующие результаты:

Онакская ГЭС –  $N=15,4$  МВт,  $Q=141,2$  м<sup>3</sup>/с;  
 $V=0,34$  км<sup>3</sup>;  $P=16527$  м<sup>3</sup>;  $S=42387,8$  тыс.руб;  $H=12,1$  м.

Тейская ГЭС –  $N=22,2$  МВт;  $Q=178,5$  м<sup>3</sup>/с;  
 $V=0,31$  км<sup>3</sup>;  $P=5287$  м<sup>3</sup>;  $S=38647,7$  тыс.руб;  $H=13,8$  м.

Ербинская ГЭС –  $N=27,8$  МВт;  $Q=152,4$  м<sup>3</sup>/с;  
 $V=0,4$  км<sup>3</sup>;  $P=4401$  м<sup>3</sup>;  $S=49868$  тыс.руб;  $H=20,3$  м.

Июсская ГЭС –  $N=14,3$  МВт;  $Q=141$  м<sup>3</sup>/с;  
 $V=0,47$  км<sup>3</sup>;  $P=8894$  м<sup>3</sup>;  $S=58594,9$  тыс.руб;  $H=11,2$  м.

где  $S$ - затраты на создание водохранилища;

$P$ - запасы воды в снежном покрове;

$V$ - объем водохранилища.

4. Строительство малых ГЭС поможет решить проблемы в электроснабжении и развитии региона.

## Список литературы

- [1] Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС // Инженерно-строительный журнал. – 2013 - №4(39). – с.70-82.
- [2] Нормы и требования / авт. НП «Гидроэнергетика России»; ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» // Гидроэлектростанции. Научное обоснование создания гидроэнергетических объектов. – Москва 2009 г.
- [3] C. Daly, G. Palomino A GIS-based assessment of maximum potential hydropower production in La Plata basin under global changes / Renewable Energy. - 2013 г.. - Т. 50. - стр. 103-114.
- [4] Пупасов-Максимов А. М. Задача оптимизации местоположения и структуры малой ГЭС на стадии обоснования инвестиций [Электронный ресурс] / Интернет-журнал «Науковедение». - 2013. - № 5 (18).
- [5] Сведения о водомерных постах России по данным ЮНЕСКО [Электронный ресурс]. <http://webworld.ru/>
- [6] ГИС Центра Регистра и Кадастра [Электронный ресурс]. <http://gis.vodinfo.ru/>
- [7] Постановление Президиума Правительства Республики Хакасия от 07.09.2015 № 87-п. Об утверждении Прогноза социально-экономического развития Республики Хакасия на период до 2030 года.
- [8] Иванов Т.С., Баденко Н.В., Олешко В.А., Арефьев Н. В., Никонова О. Г., Анализ мирового опыта автоматизированного расчета гидроэнергетического потенциала рек и поиска перспективных створов

гидроузлов / Гидротехническое строительство. – 2015. – №3. – с. 30-37.

- [9] Сема Е.Г., Фроленко Н.С., Тенешев А.В. Перспективы использования гидроэнергетических ресурсов Республики Хакасия/ Сборник материалов IV Научно-практической конференции «Гидроэлектростанции в XXI веке».-2017 г.
- [10] Толстихина Л.В., Кургунов Д.Н. Использование геоинформационных систем для поиска перспективного места строительства малых ГЭС в Республике Хакасия/ Сборник материалов IV Научно-практической конференции «Гидроэлектростанции в XXI веке».-2017 г.

# Анализ экономической и экологической эффективности применения источников альтернативной энергии для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов

Е.В. Уколова, И.Н. Шушпанов

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Иркутск, Россия

ukolovaevgenija@yandex.ru, ilis83@mail.ru

**Аннотация** — Бесперебойная работа аварийных задвижек на нефтепроводах является одним из критериев надежности транспортировки нефти. В настоящее время для электропитания приводов задвижек и телеметрии используются дизель-генераторы 10 кВт, потребляющие 3 литра топлива в час. Завоз топлива осуществляется либо в зимние время года или на специальном гусеничном транспорте, что приводит к удорожанию топлива в 2 – 3 раза.

Исходными данными являлись материалы компании ООО «Таас-Юрях нефтегазодобыча». При разработке алгоритма использовались методы математического анализа и основы экономической теории.

Приведено экономическое сравнение стоимости электроснабжения при использовании дизель-генераторов и альтернативной генерации. Рассчитаны показатели экономии топлива за год эксплуатации задвижек и срок окупаемости введения предложенной инициативы. Предложен алгоритм вычисления эффективности предложенной инициативы для внедрения на других нефтепроводах. Разработан алгоритм, который позволяет получить реальные экономические данные об эффективности замены топливной генерации на альтернативную, что является актуальным при реализации предложенной инициативы. Обоснована целесообразность замены дизель-генераторов на солнечно-ветряные установки для электроснабжения аварийных задвижек.

**Ключевые слова** - дизель-генератор, альтернативная генерация, электроснабжение, надежность, инновационность, бесперебойность.

## ALTERNATIVE GENERATION USED TO EMERGENCY SUPPLY OF GATE VALVES FOR OIL PIPELINES

E.V. Ukolova, I.N. Shushpanov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

ukolovaevgenija@yandex.ru, ilis83@mail.ru

**Abstract** - Uninterrupted operation of emergency valves on the oil pipelines is one of the criteria of reliability of oil transportation. At the present time, power for the actuators of the valves and telemetry used diesel generators 10 kW, consuming 3 liters of fuel per hour. Delivery of fuel is carried out either in the winter or on a special track vehicles, which increases the cost of fuel in 2 – 3 times.

Baseline data were material to the company "TAAS-Yuryakh Neftegazodobycha". While developing the algorithm we used methods of mathematical analysis and of basic economic theory.

Economic comparison of cost of electricity supply using diesel generators and alternative energy generation. The calculated values of fuel saving per year of operation of the valves and the payback period of the introduction of the proposed initiative. The algorithm for computing the efficiency of the proposed initiatives for implementation in other pipelines.

The Developed algorithm, which allows to obtain real data about economic efficiency of replacement fuel generation alternative, which is relevant for the implementation of the proposed initiatives. The expediency of replacing diesel generators with solar-wind installations for electricity supply emergency valves.

**Keywords** - diesel generator, alternative generation, electricity supply, reliability, innovation, continuity.

### I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день Россия занимает значимую позицию в обеспечении баланса спроса и предложений на рынках нефти. С точки зрения перспективы развития

нефтедобычи в России приоритетными регионами являются Дальний Восток и Восточная Сибирь. Развитие нефтедобычи должно предполагать: рациональное использование нефтяных запасов, внедрение энергосберегающих технологий, сокращение потерь на

всех этапах добычи и транспортировки нефти. Стратегией компаний по транспортировке нефти до 2020 г. должно быть предусмотрено:

- снижение использования импортной продукции до 3%;
- обеспечение транспортировки нефтепродуктов от вновь подключаемых нефтеперерабатывающих заводов к магистральным трубопроводам;
- снижение аварийности на магистральных трубопроводах до показателя 0,12 аварий на 1000 км эксплуатируемых трубопроводов;
- полное исключение сброса нефтепродуктов и недостаточно очищенных сточных вод.

## II. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Техническое обслуживание и ремонт трубопроводов – трудоемкие процессы и требуют больших затрат. В связи с увеличением срока эксплуатации магистральных нефтепроводов объем работ по их обслуживанию и ремонту возрастает. Поэтому перед специалистами нефтяной отрасли важнейшей задачей становится совершенствование технологий всех операций. При ремонте отечественных нефтепроводов широко применяется технология замены поврежденного участка с остановкой перекачки, когда обнаруженный аварийный участок перекрывают от остальной трассы двумя линейными задвижками. При авариях на нефтепроводах с системой телемеханизации происходит автоматическое отключение насосных агрегатов и локализация поврежденного участка линейными задвижками.

На магистральных нефтепроводах используются виды и типы арматуры различного функционального назначения в широком диапазоне давлений рабочей среды (до 12,5 МПа) и диаметров (до 1200 мм). Это шиберные и клиновые задвижки, предназначенные для перекрытия участков линейной части магистральных нефтепроводов в случае их повреждения, а также для технологической обвязки систем насосных станций, чистки и диагностирования магистральных трубопроводов и др. [1].

От надежного, безотказного выполнения арматурой своих функций в решающей степени зависит промышленная безопасность магистральных нефтепроводов. Обратные затворы обеспечивают защиту систем при возникновении обратного тока рабочей среды. Предохранительные клапаны предназначены для защиты систем от аварийного превышения давления.

Шиберная задвижка является очень надежным видом запорной арматуры и имеет характерные особенности исполнения запорного элемента. Затвор в данных задвижках чаще всего имеет названия «нож», «шибер» или «диск». В шиберной задвижке применяется металлическая пластина или металлический клин, который способен разрезать различные включения в жидкости, протекающей внутри ее тела. Из этого и следует назначение данного вида запорной арматуры: перекрытие потока рабочей среды, которая имеет повышенную вязкость, способность кристаллизоваться и характеризуется наличием твердых и абразивных частиц, которые большей частью являются активными химическими веществами.

К клиновым задвижкам относят изделия, затвор которых изготовлен в виде плоского клина. В этих

изделиях седла с уплотнительными поверхностями расположены параллельно уплотнительным поверхностям затвора и под определенным углом к направлению его движения. Задвижки производятся с цельным и упругим клином. Конструкция затвора этого изделия способна обеспечить в закрытом положении надежное уплотнение прохода. Под действием прижимного усилия, передаваемого шпинделем, он в закрытом положении изгибается в пределах упругой деформации, тем самым обеспечивает плотное прилегание поверхностей клина к седлам. Как правило, клиновая задвижка используется в случаях необходимости создания весьма высокой степени герметичности затвора в ее закрытом положении [2].

Задвижку шиберную ножевую применяют на трубопроводах, которые предназначены для транспортировки не только сточных вод, но и шахтной пыли, текстильных измельчений, тяжелых нефтепродуктов, полимерной крошки, цемента и т.д.

Задвижку ножевую используют на предприятиях нефтепереработки, водоочистки, в целлюлозно-бумажной промышленности и, конечно же, в химической промышленности. Такие задвижки находят свое применение на птицефабриках, различных рудниках и горно-обогажительных комбинатах.

Задвижка с запорным элементом, который выполнен в виде пластины из металла небольшой толщины, широко применяется в вакуумной технике. Это стало возможным благодаря тому, что изготовление шиберной задвижки может быть практически с любым сечением при ее минимальной длине, кроме того задвижка в открытом состоянии не содержит абсолютно никаких элементов, которые могут выступать внутрь трубы. Из-за этого сопротивление остаточного газа сводится к минимуму, что очень важно для эффективного формирования высокого вакуума.

Шиберную задвижку иногда используют для регулирования потока среды, но ее основное назначение – полное открытие или закрытие движения среды. Запорная арматура, устанавливаемая на нефтепроводах, нефтепродуктопроводах и трубопроводах сжиженного газа в местах перехода через реки или прохождения их на отметках выше населенных пунктов и промышленных предприятий на расстоянии менее 700 м, должна быть оборудована устройствами, обеспечивающими дистанционное управление.

Линейная запорная арматура газопроводов 1 класса диаметром 1000 мм и более, а также нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на переходах через водные преграды должна быть оснащена автоматикой аварийного закрытия, которая устанавливается на расстоянии не более 20 км. Средняя установленная электрическая мощность каждой задвижки составляет 9 кВт (3 кВт на электропривод задвижек, 1 кВт шкафа связи, 5,8 кВт на телеметрию, 3 кВт собственные нужды: обогрев, вентиляция, освещение). Круглый год требуется мощность на телеметрию. Электроэнергию на обогрев, которая используется только в холодное время года, и на электропривод, которая требуется только при срабатывании задвижек, можно получать от источника мощностью 3 кВт. Это допустимо из соображений, что время срабатывания задвижек 2–7 с, и за столь короткое время температура оборудования не может быстро

измениться до критически низких показаний. Один из вариантов решения – централизованное питание оборудования по линиям электропередачи. Однако прокладывать линии до установок экономически не целесообразно, если взять линию высокого напряжения 110 кВ и выше, передавая мощность, не будет соответствовать классу напряжения. А в линиях более низкого напряжения будут очень большие потери мощности.

В основном для электроснабжения устройств аварийной защиты используются дизельные генераторы мощностью 10 кВт, со средним потреблением топлива 3 л/ч. Однако для обеспечения их работы необходимо постоянное наличие топлива, что в условиях Восточной Сибири и Дальнего Востока весьма затруднительно и дорогостояще.

В последнее время наблюдается падение цен на нефть, и перед компаниями нефтегазовой отрасли встает вопрос об увеличении эффективности добычи, транспортировки и переработки углеводородов. Затраты на электроэнергию – основная составляющая операционных затрат на добычу нефти и газа (30–35% от общих затрат). Нефтяная промышленность потребляет 5,5% электроэнергии, вырабатываемой на территории России (50 млрд кВт·ч/год), а в себестоимости подготовки и транспортировки нефти доля затрат на электроэнергию составляет 8–23%. Когда завоз топлива осуществляется либо зимой, либо на специальном гусеничном транспорте, то это приводит к увеличению стоимости топлива в 2–3 раза по сравнению с розничными ценами. Дизельные генераторы хорошо показывают себя в эксплуатации, однако обладают следующими явными недостатками:

1. Перемерзание дизельного топлива при низких температурах.
2. Высокие затраты на транспортировку топлива и техническое обслуживание.
3. Сложность в ремонте топливной аппаратуры.
4. Дизели весьма чувствительны к качеству топлива и требуют постоянного мониторинга состояния узлов агрегата и работы двигателя.
5. Загрязнения очень быстро выводят топливную аппаратуру из строя.
6. Достаточно шумная работа дизельных генераторов.

На данный момент электроснабжение аварийных задвижек осуществляется дизель-генераторами марки АД-10С-Т400-1РМ18 ТСС PERKINS (10 кВт) с расходом топлива 3 л/ч. Работы по обслуживанию генератора: капитальный ремонт, замена масла, фильтров (масляный, топливный, воздушный), ремня ГРМ имеют периодичность и представлены в табл. 1.

Таблица 1. ПЕРИОДИЧНОСТЬ РАБОТ ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА

Операция	Перед каждым запуском	После первых 20 часов работы	Через каждые 100 часов работы
Проверка уровня масла	+	–	–
Замена масла	–	+	+
Очистка масляного фильтра	–	+	+

Проверка воздушного фильтра	+	–	–
Очистка воздушного фильтра	–	+	+
Замена фильтра топливного бака	–	–	+
Очистка топливопровода	Каждые два года		

В связи с тем, что затраты на обслуживание дизель-генератора высоки и имеется ряд других явных недостатков, следует вывод о том, что требуется новое решение проблемы электроснабжения.

### III. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с этим предлагается использовать солнечно-ветровые установки в качестве основного источника питания устройств аварийных задвижек. Альтернативная генерация носит вероятностный характер, поэтому полностью отказаться от дизель-генераторов нельзя. Они будут использоваться как резервные источники питания. Эффективность же предложенного метода будет определяться в разнице затрат на топливо с установкой и без нее [3].

Проведем апробацию данного метода на трубопроводе, соединяющем месторождение Таас-Юрях в республике Саха (Якутия) с магистральным нефтепроводом Восточная Сибирь – Тихий океан, длиной 160 км и объемом перекачки нефти до 5 тыс. т/г. (рис. 1).



Рис. 1. Трубопровод месторождения Таас-Юрях – НПС № 12 (нефтепровод ВСТО)

Количество аварийных задвижек на данном трубопроводе [2]:

$$n = \frac{L_{тр.}}{20} - 1 = \frac{160}{20} - 1 = 7 \quad (1)$$

где  $L_{тр}$  – длина.

Стоимость топлива за год при стоимости дизельного топлива 70 рублей за литр:

$$C_t = n \cdot q \cdot t \cdot C = 7 \cdot 3 \cdot 8760 \cdot 70 = 12,88 \text{ млн руб./г.},$$

где  $q$  – удельный расход топлива, л/ч;  $t$  – время работы дизель-генератора;  $C$  – цена за 1 л топлива с учетом доставки.

Затраты на обслуживание дизель-генераторов данного участка: капитальный ремонт, замена масла, замена фильтров (масляный, топливный, воздушный), замена ремня ГРМ.

$$C_o = 1,56 \text{ млн руб./г.}$$

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате произведенных расчетов видно, что обеспечение электроэнергией за счет дизель-генераторов имеет высокую стоимость. Таким образом, необходимо рассмотреть и проанализировать применение других средств электроснабжения. В связи с этим предлагается такой метод решения данной проблемы: использование солнечно-ветровых установок в качестве основного источника питания устройств аварийных задвижек [4].

КПД солнечной батареи преимущественно зависит от следующих факторов:

- радиационного воздействия солнца;
- количества световых дней.

КПД ветрогенератора зависит от среднегодовой скорости ветра.

Для выбора солнечных батарей и ветрогенераторов необходимо знать количество солнечного излучения вдоль трубопровода и среднюю скорость ветра соответственно. Входными данными для расчета служат координаты местности, где проложен нефтепровод. Таас-Юрях – НПС № 12 находится в координатах 61°47'14"N, 113°1'2"E. Расчет произведем с помощью специализированного сайта (табл. 2) [5].

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Параметр	Среднегодовое значение	Размерность
Относительная влажность	66,1	%
Ежедневный уровень инсоляции	2,88	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \cdot \frac{1}{\text{сут.}}$
Атмосферное давление	97,2	кПа
Скорость ветра	3,2	м/с

Годовой уровень инсоляции составит:

$$I = J \cdot 365 = 2,88 \cdot 365 = 1051,2 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \cdot \frac{1}{\text{сут.}}$$

Среднегодовая скорость ветра 3,2 м/с.

#### ВЫВОДЫ

В результате того, что в качестве основного источника питания устройств аварийных задвижек выполнен переход на использование солнечно-ветровых установок, экономия дизельного топлива составила 137970 литров в год или в денежном эквиваленте – 9,66 млн руб. Размеры площадки под территорию для размещения солнечно-ветровых установок – 13\*9 м. При затратах на возведение солнечных батарей окупаемость внедрения составляет 3,1 года, что является инвестиционно-привлекательным фактором [4, 6].

На основе проведенного исследования по внедрению солнечно-ветровых установок для питания аварийных задвижек предлагается следующий алгоритм расчета, применимый в Восточной Сибири и других регионах Российской Федерации:

Определяется количество аварийных задвижек на трубопроводе по формуле

$$n = \frac{L_{\text{тр.}}}{10} - 1 \quad (2)$$

При помощи сайта <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> считается уровень инсоляции и скорость ветра в тех координатах, где располагаются задвижки.

Определяется вид и стоимость солнечных батарей, ветрогенераторов, накопителей электроэнергии и дополнительного оборудования для монтажа.

Определяется цена годового расхода топлива всеми аварийными задвижками без учета введенных инициатив:

$$C_T = n \cdot q \cdot t \cdot C \quad (3)$$

Определяется стоимость обслуживания дизель-генераторов в год,  $C_0$ .

Определяется цена годового расхода топлива всеми аварийными задвижками с учетом введенных инициатив:

$$C_T^* = 0,15 \cdot C_T \quad (4)$$

Определяется срок окупаемости:

$$k = \frac{C_B}{C_T + C_0 - C_T^*} \quad (5)$$

Исходя из всего вышеизложенного, можно сделать два основополагающих заключения.

Во-первых, замена дизель-генераторов на солнечно-ветровые установки для снабжения электроэнергией оборудования аварийных задвижек на нефтепроводах является перспективной инициативой [6]. Она поможет экономить на закупках топлива и его транспортировках в тяжело проходимые места. Также она полностью окупаема, что является одним из ключевых пунктов при реализации любых проектов.

Во-вторых, немаловажным аспектом является то, что солнечно- и ветро-генерации экологически безопасны.

#### Список литературы

- [1] Бойко В.С. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. М.: Недра, 1990. 427 с.
- [2] Ямуров Н.Р., Крюков Н.И., Кусильдин Р.А. Промышленная безопасность в системе магистральных нефтепроводов. М.: Изд-во РАЕН, 2001. 159 с.
- [3] Suslov K. Development of isolated systems in Russia // IEEE Conference PowerTech, 2013. 6 с.
- [4] Ефимов Д.Н., Воропай Н.И., Суслов К.В. Виртуальные электростанции для изолированных и централизованных систем электроснабжения – перспективы и вызовы для России // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011. 110 с.
- [5] Официальный сайт НАСА [Электронный ресурс]. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (25.02.2016).
- [6] Суслов К.В., Конюхов В.Ю., Зимина Т.И., Шамарова Н.А. Технико-экономические аспекты применения возобновляемых источников энергии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. 220 с.

# СБЕРЕЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕЛОГЕНЕРАТОРА

В.В.Бочков, А.Р.Игамов

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия

E-mail: bochkov\_vv@rambler.ru

*Аннотация* - в настоящее время остро стоит вопрос сбережения электроэнергии и применения альтернативных источников. В статье рассмотрена тема использования модернизированных спортивных тренажеров вместо стандартных в качестве источников электроэнергии. Целью работы является разработка энергосистемы, позволяющей сэкономить электроэнергию при использовании велотренажера со встроенным генератором, обеспечивающим рекуперацию электроэнергии в аккумуляторную батарею. Тренажер должен способствовать уменьшению затрат на электроэнергию в спортивном зале, за счет энергии, генерируемой в тренировочном процессе. Расчет математической модели генератора и всей энергосистемы в целом производился в программе Mathcad. Построение 2d и 3d моделей производилось в программах Компас и SolidWorks. Моделирование работы энергосистемы осуществлялось с помощью программ Matlab и Proteus. В результате была получена работоспособная модель энергосистемы с применением велогенератора мощностью 0,5 кВт и аккумуляторной батареи ёмкостью 60 А\*ч. В данной системе предусмотрена функция автоматического переключения потребителей на питание от сети в случае нехватки электрической энергии, вырабатываемой генератором, при разрядке аккумулятора или неисправности тренажера. При этом срок окупаемости одного велогенератора по сравнению со стандартным велотренажером составил 12 месяцев. Разработанная энергосистема может быть использована как автономно, так и совместно с сетью. Данная модель не оказывает отрицательного воздействия на окружающую среду и позволяет при использовании велогенератора 6 часов в сутки сэкономить 120 кВт\*час электроэнергии в месяц.

*Ключевые слова:* альтернативные источники электроэнергии, велогенератор, автономный генератор, энергосбережение.

## SAVING ELECTRICITY WITH AN EXERCISE BIKE WITH A BUILT-IN GENERATOR

V.V.Bochkov, A.R.Igamov

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: bochkov\_vv@rambler.ru

**Abstract** - at present, the issue of saving electricity and using alternative sources is acute. The article discusses the theme of using modernized sports simulators instead of standard ones as sources of electricity. The aim of the work is to develop a power system that saves energy by using an exercise bike with a built-in generator that provides the recuperation of electricity into a battery. The simulator should help reduce the cost of electricity in the gym, due to the energy generated in the training process. Calculation of the mathematical model of the generator and the whole power system as a whole was carried out in the Mathcad program. The construction of 2D and 3D models was performed with the Compass and SolidWorks applications. Matlab and Proteus were used for the experimental part of the study and the construction of mathematical models. As a result, a workable model of the power system was obtained using a bicycle generator with power 0.5 kW and battery 60A\*hour. This system provides the function of automatic switching of consumers to mains power in the event of a shortage of electrical energy generated by the generator, when the battery is depleted or the simulator malfunctions. The payback period of a single a bicycle generator in comparison with a standard exercise bike was 12 months. The developed exercise bike can be used as an autonomous source of electricity or in conjunction with the network. This model does not have a negative impact on the environment and allows you to save 120 kW \* hour of electricity per month when using a bicycle generator 6 hours a day.

*Key words* - Alternative energy sources, a bicycle generator, an autonomous generator, energy saving.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время остро стоит вопрос сбережения электроэнергии и применения альтернативных источников. В статье рассмотрена тема использования модернизированных спортивных тренажеров вместо

стандартных в качестве источников электроэнергии. Целью работы является разработка энергосистемы, позволяющей сэкономить электроэнергию при использовании велотренажера со встроенным генератором, обеспечивающим рекуперацию электроэнергии в аккумуляторную батарею. Тренажер

должен способствовать уменьшению затрат на электроэнергию в спортивном зале, за счет энергии, генерируемой в тренировочном процессе.

Во время тренировок в спортивных клубах или тренажерных залах люди тратят приличное количество энергии, которая при этом расходуется впустую. Одним из способов использования этой энергии является применение энергосберегающих тренажеров взамен стандартным с целью преобразования механической энергии в электрическую. Одной из таких установок является велотренажер со встроенным генератором. Данное устройство должно накапливать электроэнергию в аккумуляторную батарею и затем отдавать её на нужды потребителей, что в свою очередь будет обеспечивать энергосбережение.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для того чтобы велогенератор имел небольшие габариты и вес, в качестве источника электроэнергии был выбран аксиальный генератор, установленный на месте втулки заднего колеса и соединенный с педалями цепной передачей (рис. 1). На роторе такого генератора располагаются постоянные магниты, а на статоре обмотки. Рассчитанный трёхфазный генератор переменного тока имеет мощность 0,5 кВт и при частоте вращения 500 мин<sup>-1</sup> (частота вращения ротора генератора соответствует скорости велосипедиста 30 км/ч) выдаёт ток 35,7 А. Для преобразования тока в постоянный был выбран выпрямительный блок, устанавливаемый на автомобильных генераторах, реле-регулятор и конденсатор. Для накопления электроэнергии была выбрана аккумуляторная батарея ёмкостью 60А\*ч.



Рис.1 Размещение аксиального генератора на велотренажере

Для того чтобы данная установка работала не только автономно, но и совместно с сетью и при понижении уровня заряда аккумулятора могла переключаться на питание от сети была составлена соответствующая схема с использованием реле (рис. 2).

Моделирование работы энергосистемы осуществлялось с помощью программы Proteus.

В первом случае нагрузка на схеме получает питание от аккумулятора емкостью 60 А\*ч. Аккумулятор выдает напряжение 12 В. При подаче питания на катушку реле

RL1 «возбуждается», то есть срабатывают контакты и тем самым нагрузки D5, D3, D4, D2 получают питание от аккумулятора.

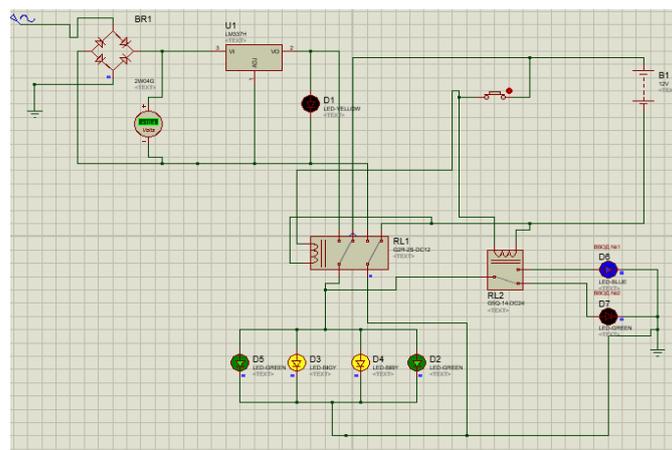


Рис. 2 Схема работы велогенератора при заряженной батарее

Вспомогательное реле RL2 оповещает, какой источник осуществляет питание. В случаи получения питания от аккумулятора загорается светодиод D6, от сети –D7

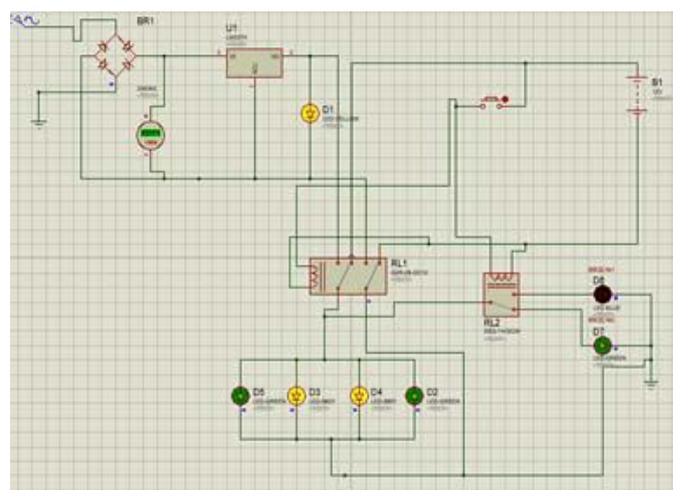


Рис. 3. Схема работы велогенератора при питании от сети

Во втором случае при разрядке аккумулятора, катушка реле RL1 размагничивается, меняя положения контактов. Вследствие чего нагрузка начинает получать питание от сети. Для выпрямления тока в схеме предусмотрен диодный мост, а для получения стабильного напряжения используется стабилизатор.

## III. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для того чтобы показать насколько выгодно использование такой системы с велогенератором приведем экономический расчет.

По подсчетам стоимости используемых материалов и устройств была получена приблизительная цена данной установки в размере 10000 рублей. Цена самого

бюджетного велотренажера, найденного в одном из интернет-магазинов составила 5040 рублей. Спроектированная установка оказалась дороже на 4960. При этом разница в цене окупается за 12 месяцев. То есть при использовании в тренажерном зале 8 таких установок вместо стандартных ежегодная выгода будет составлять 42278 рублей.

Стоимость велотренажера составляет - 5040 руб.

Стоимость велогенератора составляет 10000 руб.

разница стоимости 4960 руб.

Берем среднее время работы в день на велогенераторе, мощностью 0,5 кВт – 8 часов

тариф на электроэнергию – 3,67 руб. за 1кВт/ч

экономия энергии в день –  $\Delta d = 0,5 * 8 * 3,67 = 14,68$

Таблица 1

Время, мес.	Экономия, руб.	Разница, руб.
1	440,4	4960
2	880,8	4960
3	1321,2	4960
4	1761,6	4960
5	2202	4960
6	2642,4	4960
7	3082,8	4960
8	3523,2	4960
9	3963,6	4960
10	4404	4960
11	4844,4	4960
12	5284,8	4960

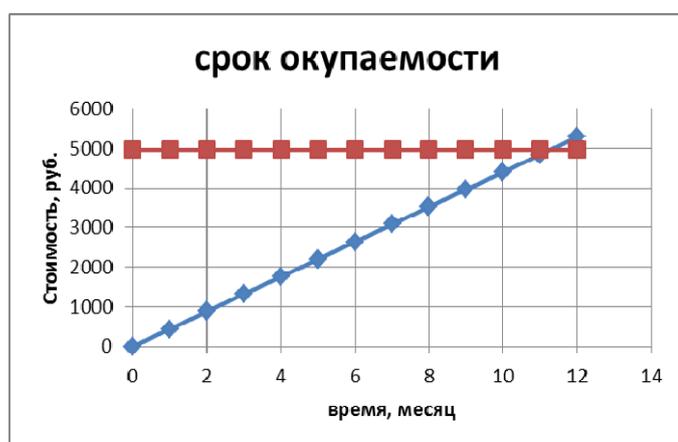


Рис. 4. Диаграмма срока окупаемости

Денежная экономия при использовании велогенератора за 10 лет приведена на рисунке 5.

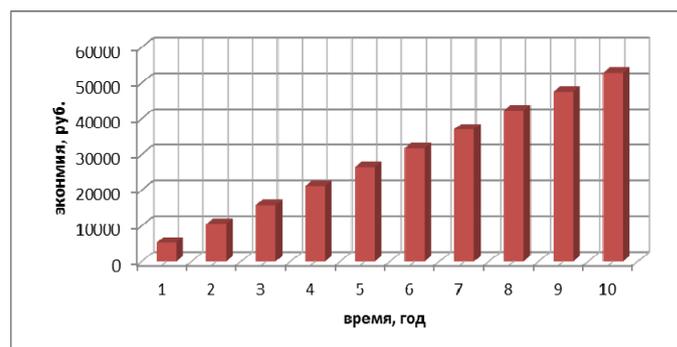


Рис. 5. Диаграмма экономии при использовании велогенератора за 10 лет

#### IV. ВЫВОДЫ

Приведена спроектированная модель энергосберегающей установки с использованием велогенератора. Данная установка способна питать потребителей постоянным током как автономно, так и бесперебойно совместно с сетью. При этом ежегодно такой велогенератор может экономить до 1440 кВт\*ч электроэнергии.

Данная модель не оказывает отрицательного воздействия на окружающую среду. Таким образом, занятия на велогенераторе способствуют не только улучшению здоровья, но и защите окружающей среды

#### Список литературы

- [1] Электрические машины: учеб. / И. П. Копылов. - 3-е изд., испр. - М. : Высш.шк., 2002. - 607 с.
- [2] Проектирование специальных электрических машин переменного тока - Балагуров В.А. - М. : Высш.шк., 1982. - 272 с.
- [3] Библия релейной защиты и автоматики. Федоров В.А.; 2004. -278 с.
- [4] Электрические системы, т. 1 Математические задачи электроэнергетики: учеб. пособие для вузов / под ред. В. А. Веникова. – М : Высшая школа, 1970. – 336 с.

# Метод выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке

О.И. Горте, В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, Г.А. Пранкевич  
ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет  
г. Новосибирск, Российская Федерация

E-mail: ogorte@gmail.com, zvmov@ngs.ru, kiryanova-ng@ya.ru, prankevich.gleb@mail.ru

*Аннотация* — В автономных и изолированных энергосистемах при соизмеримости мощностей отдельных потребителей и энергосистемы в целом, актуальны вопросы влияния характеристик и режимов работы потребителей на их статическую, динамическую устойчивость и качество электроэнергии. Прежде всего, это относится к энергосистемам, в составе которых имеются потребители с резкопеременной нагрузкой. Потребляемая ими мощность носит во времени стохастический характер. Зачастую такие энергосистемы удалены от «большой» энергосистемы и имеют с ней слабые связи, либо работают автономно. Возмущения, инициируемые такими потребителями, приводят к существенным колебаниям режимных параметров, которые приходится учитывать на стадии проектирования систем электроснабжения и которые могут существенно увеличивать затраты на их строительство и эксплуатацию. Применение накопителей энергии позволяет эффективно решать эту проблему. На основе анализа результатов натурных экспериментов определены амплитудно-частотные характеристики характерных нагрузочных диаграмм для ряда энергосистем, на основании которых формулируются требования к накопителям энергии и определяются основные параметры накопителей энергии. Разработана методика такого анализа. Сформулированы принципы определения параметров накопителей энергии и требования к их системам управления для подавления наиболее опасных или нежелательных колебаний режимных параметров.

*Ключевые слова* — накопители энергии, автономные и изолированные системы, устойчивость энергосистем, резкопеременная нагрузка, соизмеримость мощностей, стохастический характер нагрузки, гармонический анализ.

## The method of selecting the parameters of the energy storage devices with an abrupt variable load

O. Gorte, V. Zyryanov, N. Kiryanova, G. Prankevich  
Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: ogorte@gmail.com, zvmov@ngs.ru, kiryanova-ng@ya.ru, prankevich.gleb@mail.ru

*Abstract* — The influence of regime parameters and operational modes of consumers on their static and dynamic stability as well as power quality could be considered as actual. The problem presented for the case of autonomous and closed power systems with the commensurability of the capacities of individual consumers and the power system as a whole. First of all, this applies to power systems, which include consumers with an abrupt variable load. The power consumed by them has a stochastic character by time. Often, such power systems are remote from the Unified Power System and have weak links with it or operate autonomously. Perturbations initiated by these consumers result to significant oscillations of the regime's parameters. These perturbation have to be taken into account at the design stage of power supply systems. This can significantly increase the costs of their construction and operation. The applying of energy storage devices can effectively solve this problem. The amplitude-frequency characteristics of the characteristic load diagrams for a number of power systems was determined based on the analysis of the results of full-scale experiments. Based on this analysis was formed the requirements for energy storage devices and the main parameters of energy storage devices was defined. A methodology for such an analysis has been developed. Principles determining the parameters of energy storage devices as well as requirements for its control systems to suppress the most dangerous or undesirable oscillations of operating parameters are formulated.

*Keywords* — Energy storage, autonomous energy system, isolated energy system, power system stability, abruptly variable load, capacity comparability, stochastic character of load, harmonic analysis.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии накопления энергии позволяют решать многие актуальные проблемы, которые традиционными методами не могут быть решены или решаются не самым эффективным образом [1].

Одна из таких проблем – резкопеременная нагрузка. Электроустановки большой мощности, имеющие нестационарный стохастический характер потребления, могут оказывать значительное негативное влияние на режимы энергосистемы. В автономных системах это приводит в необходимости значительно завышать номинальную мощность генераторных агрегатов (ГА) по сравнению со средним значением нагрузки и к существенному перерасходу топлива. Кроме того, в резкопеременных режимах значительно растут потери в генераторах и сокращается моторесурс приводных двигателей. В объединённых и изолированных энергосистемах резкопеременная нагрузка способна провоцировать или усиливать низкочастотные колебания (НЧК) режимных параметров [2], снижать уровень статической, динамической устойчивости и ухудшать качество электроэнергии.

В литературе в большинстве случаев предлагается упрощенная методика определения основных параметров накопителей энергии: мощность и энергоёмкость. В качестве примера можно привести методику, предложенную в [3]. Эти методики не дают возможности определять параметры накопителя энергии для подавления гармоник, которые должны быть исключены из графика нагрузки.

В статье предлагается методика расчёта мощности и энергоёмкости накопителя по экспериментальным нагрузочным диаграммам.

## II. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Под автономными понимаются энергосистемы отдельных поселений, предприятий, морских платформ, судов, подъёмно-транспортных машин и т.п. Как правило, для них характерна соизмеримость мощностей основных наиболее крупных потребителей электроэнергии и электростанции. Количество ГА на таких станциях ограничено. Нередко на них устанавливается всего один ГА.

В автономных энергосистемах с резкопеременным характером нагрузки ГА работают в наиболее тяжёлых режимах. Прежде всего, это проявляется в том, что мощность ГА выбирается по максимальному значению нагрузки, в то время как её среднее значение не превышает 20 – 25%. Это приводит к завышению установленной мощности генераторных агрегатов по отношению к средней мощности нагрузки и соответственно, к существенному увеличению удельного расхода топлива.

На рисунке 1 приведён характерный фрагмент нагрузочной диаграммы автономной электростанции плавкрана, полученной в ходе пассивного эксперимента в нормальном технологическом режиме работы – при перегрузке сыпучего груза. При номинальной мощности электростанции (300 кВт) средняя мощность нагрузки составляет 66 кВт (22% номинальной мощности станции). Кроме снижения качества электроэнергии, работа

энергосистемы в таком режиме характеризуется значительным увеличением удельного расхода топлива (на 45% относительно номинального режима) [4].

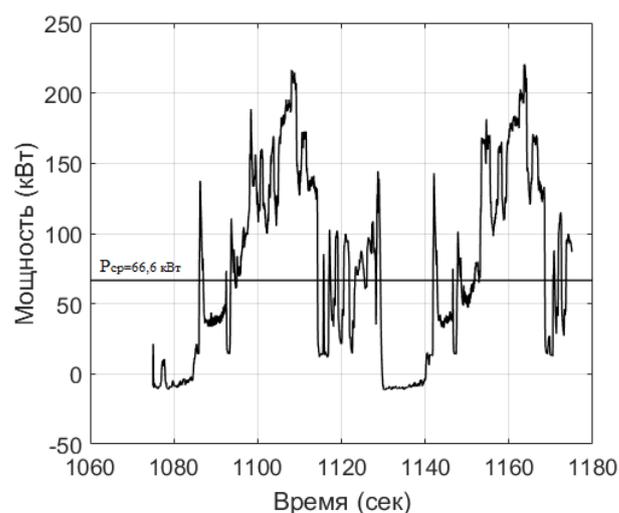


Рис. 1. Фрагмент нагрузочной диаграммы автономной электростанции плавкрана

Подобный характер нагрузки является обычным для всех подъёмно-транспортных механизмов циклического действия.

Гармонический анализ нагрузочной диаграммы, выполненный методом быстрого преобразования Фурье для непериодической функции, даёт бесконечный ряд гармоник. Наиболее значимые гармоники этого ряда сосредоточены в частотном диапазоне от 0 до 0,8 Гц (рисунок 2).

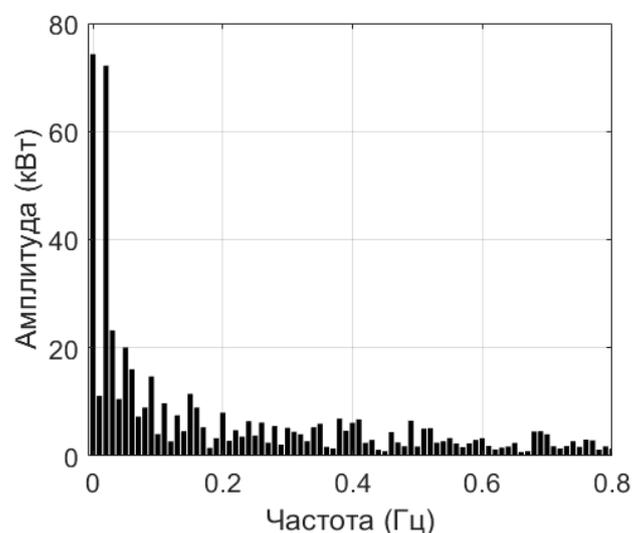


Рис. 2. АЧХ нагрузочной диаграммы плавкрана

Результаты гармонического анализа позволяют рассчитывать параметры накопителя энергии в зависимости от амплитуды и частоты тех гармоник, которые подлежат подавлению в нагрузочной диаграмме.

Одна из возможных стратегий применения накопителя энергии в этом случае – заменить «штатный» генераторный агрегат на агрегат мощностью близкой к среднему значению мощности нагрузочной диаграммы. Регулирование переменной части нагрузочной диаграммы

должно выполняться накопителем. При этом достигается комплексный эффект: минимальный удельный расход топлива, минимальная стоимость генераторного агрегата, минимальные издержки на его обслуживание, увеличение моторесурса приводного двигателя, снижение потерь в генераторе от переходных процессов, обусловленных резкопеременной нагрузкой.

Для решения поставленной задачи необходимо выбрать мощность и энергоёмкость накопителя энергии. Минимально необходимая мощность накопителя  $P_{нз}$  определяется из нагрузочной диаграммы (рисунок 1) как наибольшее отклонение мощности от среднего значения. В рассматриваемом случае  $P_{нз} = 150$  кВт.

Для определения энергоёмкости построена диаграмма изменения энергии накопителя, которой он должен обмениваться с энергосистемой. для поддержания постоянства мощности генератора (рисунок 3). Максимальный размах диаграммы энергии показывает минимально необходимую величину обменной энергоёмкости  $W_{обм}$ . Т.е. той энергии, которой накопитель обменивается с энергосистемой в процессе управления. Определить полную энергоёмкость накопителя  $W_n$  можно только после выбора типа накопителя, зная особенности конкретной технологии накопления энергии, которая определяет допустимую степень разряда/заряда накопительного элемента при сохранении достаточной величины располагаемой мощности. В соответствии с диаграммой (рисунок 3) обменная энергоёмкость накопителя  $W_{обм}$  должна быть не менее 0,8 кВт·ч или 2,88 МДж.

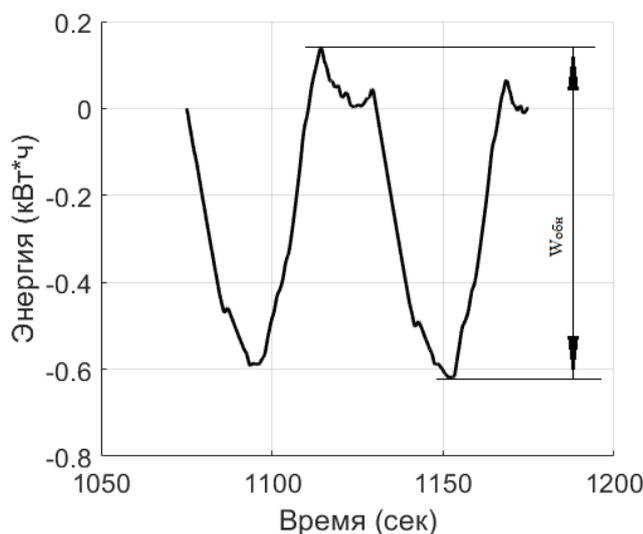


Рис. 3. Диаграмма изменения энергии накопителя в процессе управления

### III. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЯ ДЛЯ РАЙОННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Стохастический характер нагрузки характерен для многих промышленных предприятий. К потребителям, имеющим периодический или резкопеременный характер потребления мощности, относятся потребители нефтегазовой отрасли (станки-качалки), металлургии и машиностроения (двигатели для механизмов, работающих в широком диапазоне скоростей с частыми пусками и остановками), электродуговые печи, мощные подъёмно-транспортные механизмы и ряд других.

Наличие гармоник в нагрузочных диаграммах мощности в диапазоне 0,1 – 2,0 Гц способствует появлению и усилению НЧК режимных параметров энергосистемы.

На рисунке 4 приведён фрагмент нагрузочной диаграммы одного из каменноугольных карьеров Новосибирской области, полученной в процессе пассивного эксперимента в нормальном технологическом режиме работы. Основные потребители электроэнергии – карьерные экскаваторы с электроприводом, получающие питание от энергосистемы от подстанции 35/6 кВ.

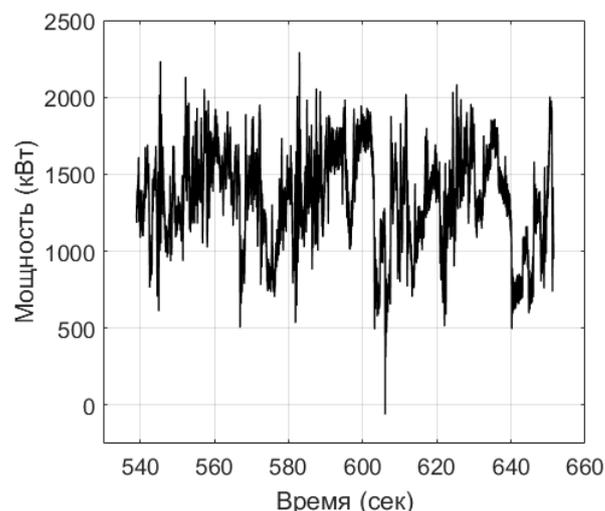


Рис. 4. Фрагмент нагрузочной диаграммы каменноугольного карьера

На рисунке 5 приведены результаты гармонического анализа нагрузочной диаграммы без учёта постоянной составляющей.

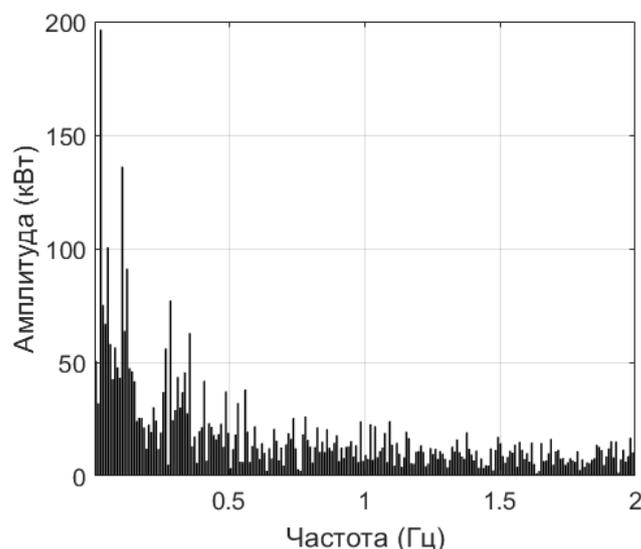


Рис. 5. АЧХ нагрузочной диаграммы каменноугольного карьера (без постоянной составляющей)

На рисунке 6 представлена суммарная диаграмма мощности гармоник в диапазоне 0,1 – 2,0 Гц, полученная из нагрузочной диаграммы каменноугольного карьера путём фильтрации указанных гармоник. По этой диаграмме должен работать накопитель для подавления гармоник.

#### IV. РЕЗЮМЕ

Для выбора мощности и обменной энергоёмкости накопителя необходимо:

1. Провести экспериментальное исследование нагрузочной диаграммы ГА (или узла нагрузки) в расчётном рабочем режиме.
2. Провести гармонический анализ нагрузочной диаграммы.
3. Выявить гармоники, подлежащие подавлению.
4. Построить диаграмму мощности подлежащих подавлению гармоник.
5. По диаграмме (п.4) по максимальному отклонению диаграммы от нулевого значения определить минимально необходимую мощность накопителя  $P_{нз}$ .
6. По диаграмме (п.4) построить диаграмму изменения энергии накопителя.
7. По максимальному размаху диаграммы (п.6) определить энергоёмкость накопителя  $W_{обм}$ .

#### Список литературы

- [1] Смоленцев, Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский вестник. - 2013. - №4-2. - С.176-181.
- [2] Климова, Т.Г. Анализ влияния периодически меняющейся нагрузки на возникновение низкочастотных колебаний / Т.Г. Климова, М.В. Савватин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : сборник докл. 5 междунар. науч.-техн. конф., Сочи, 1-5 июня 2015 г. - Сочи, 2015. <http://cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/materials/S.2.2.pdf>
- [3] Сокольникова, Т.В., Суслов, К.В., Ломбарди, П. Определение оптимальных параметров накопителей энергии для интеграции ВИЭ в изолированных системах с активными потребителями, Журнал "Вестник ИрГТУ", №10(105), 2015. – С. 206-211. ISBN 1814-3520.
- [4] Алемасов, В.А. Оценка перспектив снижения расхода топлива в судовой энергосистеме с накопителем энергии / В.А. Алемасов, А.А. Борисов, В.М. Зырянов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. - №2. - С.215-217.

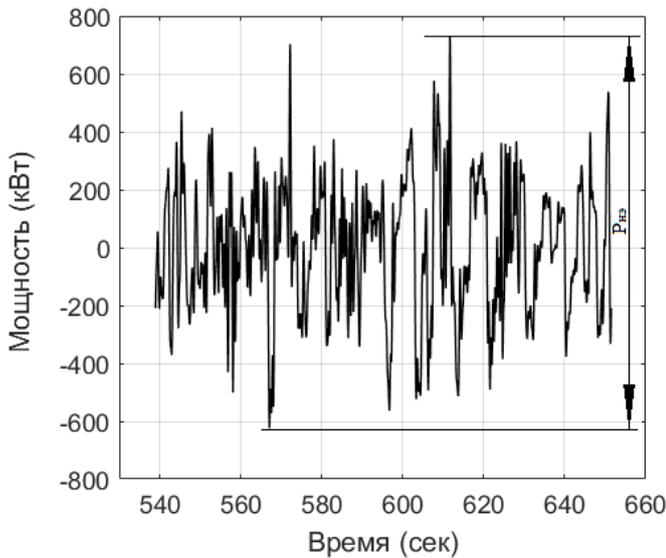


Рис. 6. Диаграмма обменной мощности накопителя с учётом гармоник 0,1 – 2,0 Гц

Минимально необходимая мощность накопителя энергии определяется по наибольшему отклонению кривой мощности от нулевого значения и составляет  $P_{нз} = 730$  кВт.

Для определения энергоёмкости строится диаграмма изменения энергии накопителя, которой он должен обмениваться с энергосистемой для подавления гармоник диапазона 0,1 – 2,0 Гц (рисунок 7). Максимальный размах диаграммы энергии показывает минимально необходимую величину обменной энергоёмкости  $W_{обм} = 0,66$  кВт·ч (2,38 МДж).

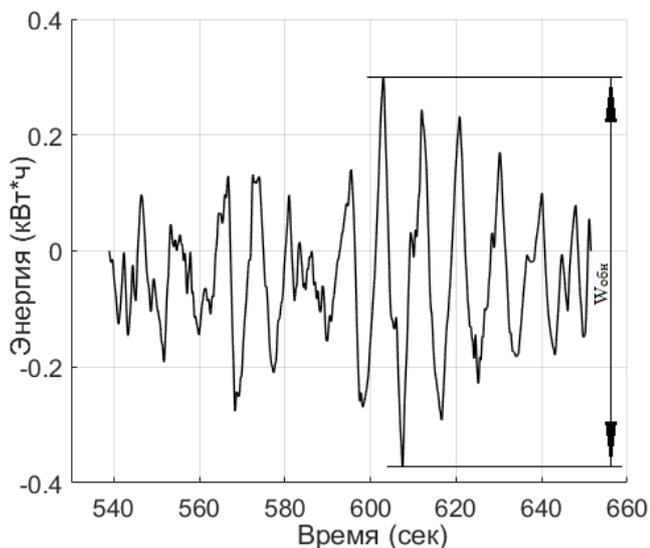


Рис. 7. Диаграмма изменения энергии накопителя в процессе управления

# Особенности прогнозирования выработки электроэнергии солнечными электростанциями

Д.А.Снегирев<sup>1</sup>, Р.Т. Валиев<sup>1</sup>, С.А.Ерошенко<sup>1</sup>, А.И. Хальясмаа<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup>ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина",  
Екатеринбург, Россия

E-mail: stas\_ersh@mail.ru, lkhalyasmaa@mail.ru, rust-1202@yandex.ru, den\_snegirev@mail.ru

**Аннотация** — В связи с развитием солнечной энергетики возрастает установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) в энергосистемах многих стран, в том числе и ЕНЭС России. В условиях вовлечения этого вида генерации в работу энергосистемы, в том числе на рынок электроэнергии, необходимость решения задач оперативного, краткосрочного и долгосрочного планирования выработки мощности становится критически важной. Специфика составления таких прогнозов требует учета множества факторов, связанных как с погодными условиями, так и с конструктивными особенностями СЭС. На основе ретроспективного анализа статистических данных о солнечной радиации и метеорологической информации получены сведения о точности рассматриваемой модели, что позволяет оценить применимость и эффективность её использования в реальных эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова** — прогнозирование выработки электроэнергии; солнечные электростанции; многофакторные модели; возобновляемые источники энергии.

## SPECIFIC FEATURES OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS GENERATION FORECASTING

D.A.Snegirev<sup>1</sup>, R.T. Valiev<sup>1</sup>, S.A.Eroshenko<sup>1</sup>, A.I. Khalyasmaa<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup>Autonomous Educational Institution of Higher Education

«Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin»

Ekaterinburg, Russian Federation

E-mail: stas\_ersh@mail.ru, lkhalyasmaa@mail.ru, rust-1202@yandex.ru, den\_snegirev@mail.ru

**Abstract** — In connection with the development of solar energy, the installed capacity of photovoltaic power plants in the power systems of many countries, including UPS of Russia, is increasing. In conditions of involving this type of generation in the power system and the electricity market, the need to solve the tasks of operational, short-term and long-term capacity planning becomes critical. The specific nature of the formation of such forecasts requires consideration of a plenty of factors related both to weather conditions and to the design features of photovoltaic power plants (PV PP). Based on retrospective analysis of statistics of solar radiation and meteorological information obtained data about the accuracy of the considered models, which allows to assess the applicability and efficiency of its use in actual operating conditions.

**Keywords** — forecasting of electricity generation; solar power plants; multifactor models; renewable energy sources formatting.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Появление солнечных электростанций (СЭС) в энергосистеме приводит к появлению дополнительного источника неопределенности, поскольку появляется необходимость учитывать вероятностный характер и нагрузки, и генерации. Соблюдение баланса производимой и потребляемой электроэнергии необходимо как для поддержания частоты в энергосистеме на номинальном уровне, так и для обеспечения экономичной работы других генерирующих установок, а также возможности осуществления торгов на рынке электроэнергии и мощности. Высокий процент установленной мощности солнечных электростанций неизбежно приведет к усилению влияния фактора неопределенности выдаваемой СЭС мощности на работу элек-

трической сети. Резерв, создаваемый для покрытия этой неопределенности, должен быть как можно меньше для получения максимальной выгоды от ввода в эксплуатацию СЭС. Специфика решаемой задачи часто связана с ограниченностью и неопределенностью исходной информации в части ретроспективных данных, в связи с этим наиболее целесообразным является использование комбинированной физико-статистической модели. Физическая часть модели описывает связь между географическим положением, погодными условиями, солнечным излучением и выработкой электроэнергии на СЭС. Входные данные включают численный прогноз погоды (ЧПП), локальные метеорологические измерения, данные о рельефе и типе земной поверхности. Физический подход в некоторых случаях не всегда оправдан ввиду сложности или невоз-

возможности точного учета тех или иных факторов, что требует введения статистического подхода для их определения. Оптимальная точность комбинированных моделей достигается путем коррекции коэффициентов статистических моделей с учетом постоянно меняющихся условий, описываемых физическими моделями.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Расчет солнечного излучения, падающего на поверхность фотоэлектрической панели и участвующего в выработке электроэнергии, можно разбить на три основных этапа.

### A. Солнечное излучение на границе атмосферы

Плотность потока энергии солнечного излучения на границе атмосферы Земли описывается солнечной постоянной  $G_{sc}$ , которая представляет собой суммарную мощность солнечного излучения, проходящего через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. Эта постоянная равна 1,367 кВт/м<sup>2</sup>. Величина  $G_{sc}$  не учитывает изменение плотности потока солнечного излучения в течение суток и в течении года для различных географических координат, данные факторы могут быть учтены с помощью формулы [1]:

$$\bar{G}_0 = \frac{12}{\pi} G_{on} \left( \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180^\circ} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right) \quad (1)$$

где  $\bar{G}_0$  – плотность потока энергии солнечного излучения на границе атмосферы (здесь и далее верхнее подчеркивание величины означает усредненное значение в рамках заданного временного шага), [кВт/м<sup>2</sup>];  $G_{on}$  – нормальная плотность потока энергии солнечного излучения на границе атмосферы, характеризует изменение солнечной постоянной  $G_{sc}$  на  $\pm 1,7\%$  в течение года ввиду эксцентриситета эллиптической орбиты вращения Земли вокруг Солнца, [кВт/м<sup>2</sup>];  $\varphi$  – географическая широта рассматриваемой точки, определяет угловое расположение к Северу или к Югу от экватора, [град];  $\delta$  – угол солнечного склонения, характеризует угловое положение Солнца в солнечный полдень (т.е. когда Солнце расположено над местным меридианом) относительно плоскости экватора, [град];  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – часовой угол в начале и конце рассматриваемого интервала соответственно, характеризуют угловое смещение Солнца к Востоку или к Западу от местного меридиана, вызванное вращением Земли вокруг ее оси, [град].

Часовой угол изменяется со скоростью 15 градусов в час, принимается отрицательным до солнечного полудня, положительным после, в солнечный полдень равен нулю. Ввиду того, что часовые углы заката и рассвета зависят от угла солнечного склонения, их величина будет меняться в течение года, что соответствует увеличению длительности солнечного дня летом, и уменьшению его зимой. При этом будет меняться и длина углового пути, проходимого Солнцем.

### B. Суммарное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность

Для оценки изменения плотности потока солнечного излучения при его прохождении через атмосферу Земли используется коэффициент прозрачности  $k_T$ , который учитывает воздействие таких факторов, как поглощение солнечного излучения озоном, пылью, молекулами воздуха, водяного пара, облачным покровом, а так же отражение части излучения в космическое пространство. Непостоянство данных факторов часто приводит к невозможности точного определения их степени влияния на величину коэффициента прозрачности. Для решения этой задачи можно использовать статистическую зависимость, учитывающую основные влияющие факторы соответствующими коэффициентами [2]:

$$\bar{k}_T = a_1 + b_1 \cdot (\bar{cc})^2 \cdot \sin \bar{\alpha} + c_1 \cdot (\bar{cc})^2 + d_1 \cdot \sin \bar{\alpha}, \quad (2)$$

где  $\bar{k}_T$  – коэффициент прозрачности, [о.е.];  $\bar{cc}$  – оценка облачности, которая используется для учета типа облачного слоя и его высоты, определяется исходя из метеорологического показателя облачности (доля небесного пространства, скрытая облаками при наблюдении из определенного места), [о.е.];  $\bar{\alpha}$  – угловая высота Солнца, которая представляет собой угол между нормалью от рассматриваемой поверхности к Солнцу и ее проекцией на горизонтальную плоскость, в рамках заданного временного шага, [град];  $a_1, b_1, c_1, d_1$  – коэффициенты, получаемые с помощью уравнений регрессионного анализа, могут отличаться для различных географических координат, а так же для различных диапазонов  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{cc}$ , [безразмерные величины].

Тогда суммарное солнечное излучение у поверхности земли  $\bar{G}$  равно [2]:

$$\bar{G} = k_T \cdot \bar{G}_0, \quad (3)$$

где  $\bar{G}$  – плотность потока энергии солнечного излучения у поверхности земли, падающего на горизонтальную поверхность, [кВт/м<sup>2</sup>].

### C. Совокупное солнечное излучение, падающее на наклонную поверхность

Для определения совокупного солнечного излучения, падающего на наклонную поверхность, необходимо определить две составляющие суммарного излучения  $\bar{G}$ : прямое излучение  $\bar{G}_b$  и рассеянное излучение  $\bar{G}_d$ . Доля рассеянного излучения  $\bar{G}_d$  характеризуется коэффициентом рассеяния  $k_d$ , который так же, как и коэффициент прозрачности, определяется по статистической зависимости, учитывающей влияние относительной влажности и температуры [3]:

$$\bar{k}_d = a_2 + b_2 \cdot \bar{k}_T + c_2 \cdot \sin \bar{\alpha} + d_2 \cdot \bar{T}_a + e_2 \cdot \overline{RH}, \quad (3)$$

где  $\bar{k}_d$  – коэффициент рассеяния, [о.е.];  $\bar{T}_a$  – температура воздуха, [°C];  $\overline{RH}$  – относительная влажность воздуха, [о.е.].

С учетом полученного показателя, можно определить рассеянную составляющую плотности потока энергии солнечного излучения  $\bar{G}_d$ :

$$\bar{G}_d = k_d \cdot \bar{G}, \quad (4)$$

где  $\bar{G}_d$  – плотность потока энергии рассеянного солнечного излучения у поверхности земли, падающего на горизонтальную поверхность, [кВт/м<sup>2</sup>];

Прямая составляющая солнечного излучения есть разность между суммарным  $\bar{G}$  и рассеянным  $\bar{G}_d$  излучением:

$$\bar{G}_b = \bar{G} - \bar{G}_d, \quad (5)$$

где  $\bar{G}_b$  – плотность потока энергии прямого солнечного излучения у поверхности земли, падающего на горизонтальную поверхность, [кВт/м<sup>2</sup>].

Совокупная плотность потока энергии солнечного излучения у поверхности земли, падающего на наклонную поверхность  $\bar{G}_T$  рассчитывается согласно выражению [1]:

$$\bar{G}_T = \bar{G}_b \cdot \bar{R}_b + \bar{G} \cdot r_g \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} + \bar{G}_d \cdot A_i \cdot \bar{R}_b \cdot (1 - A_i) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \left[ 1 + \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] \quad (6)$$

где  $\bar{G}_T$  – совокупная плотность потока энергии солнечного излучения у поверхности земли, падающая на наклонную поверхность, [кВт/м<sup>2</sup>];  $\bar{R}_b$  – среднее значение соотношения потока, падающего на горизонтально расположенную и наклонную панель, [о.е.];  $r_g$  – отражательная способность (альbedo) земной поверхности, [о.е.];  $\beta$  – наклон панели, [град];  $A_i$  – коэффициент анизотропии, характеризующий способность атмосферы пропускать прямое солнечное излучение [о.е.].

Первое слагаемое учитывает изменение доли прямого солнечного излучения в суммарном при изменении наклона панели. Второе слагаемое учитывает отражение части суммарного излучения от поверхности земли на наклонную панель. Третье слагаемое учитывает несколько ступеней рассеивания солнечного излучения: изотропное рассеянное солнечное излучение, получаемое от всего небесного купола; рассеянное околосолнечное излучение, получаемое в результате прямого рассеивания солнечных лучей, оно сосредоточено вокруг солнечного диска; и рассеянное солнечное излучение, сконцентрированное у горизонта, наиболее ярко проявляющаяся при ясном небе.

Точность прогноза плотности потока солнечного излучения на поверхности земли в первую очередь обуславливается точностью метеорологического прогноза облачности, который оказывает решающее влияние на точность определения коэффициента прозрачности  $k_T$ , а значит и на ошибку в прогнозе  $\bar{G}_T$ .

### III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СЭС

После получения необходимого значения плотности потока солнечного излучения по методике, представленной выше, осуществляется прогноз выработки электро-

энергии солнечной электростанцией, он состоит из двух основных этапов.

#### A. Определение выходной мощности постоянного тока фотоэлектрических панелей

Расчётная мощность одной фотоэлектрической панели (ФЭП) определяется по уравнению [4]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left( \frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (\bar{T}_c - T_{c,STC})], \quad (7)$$

где  $P_{PV}$  – мощность одной ФЭП, [Вт];  $Y_{PV}$  – номинальная мощность ФЭП при стандартных условиях (паспортная величина), [Вт];  $f_{PV}$  – коэффициент снижения общей эффективности панели в результате деградации фотоэлектрических модулей, [о.е.];  $\bar{G}_{T,STC}$  – плотность потока энергии солнечного излучения при стандартных условиях, принимается 1000 Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_p$  – температурный коэффициент мощности (паспортная величина), [%/°C];  $\bar{T}_c$  – температура ФЭП, [°C];  $T_{c,STC}$  – температура ФЭП при стандартных условиях, принимается 25 °C.

Эксплуатационная температура  $\bar{T}_c$  солнечных панелей и фотоэлементов внутри них влияет на производительность СЭС и учитывается с помощью температурной модели, описываемой уравнением:

$$T_c = \bar{T}_a + \frac{\alpha \cdot \bar{G}_T (1 - \eta_m)}{U_0 + U_1 \cdot \overline{WS}}, \quad (8)$$

$\alpha$  – коэффициент поглощения панели (паспортная величина), [о.е.];  $\eta_m$  – КПД панели (паспортная величина) [о.е.];  $\overline{WS}$  – скорость ветра, [м/с],  $U_0$  – постоянный коэффициент теплопередачи, [Вт<sup>-2</sup>×°C<sup>-1</sup>];  $U_1$  – коэффициент конвективного теплообмена, [Вт<sup>3</sup>×с×°C<sup>-1</sup>].

Указанные выше уравнения позволяют оценить выработку одной ФЭП. Для формирования фотоэлектрической батареи используется последовательное и параллельное соединение отдельных панелей.

Мощность фотоэлектрической батареи  $P_a$  определяется согласно уравнению [4]:

$$P_a = P_{PV} \cdot n_p \cdot n_s, \quad (9)$$

где  $P_a$  – выработка фотоэлектрической батареи, [Вт];  $n_p$  – количество параллельно соединенных панелей в батарее;  $n_s$  – количество последовательно соединенных панелей в батарее.

#### B. Определение выходной мощности переменного тока инвертора

При подключении СЭС к сети, для преобразования постоянного тока в переменный используются инверторы, при этом процесс, как правило, связан с потерями мощности, которые могут быть учтены выражением [5]:

$$P_{ac} = \frac{P_{ac0} (P_{dc} - P_{s0})}{P_{dc0} - P_{s0}}, \quad (10)$$

где  $P_{ac}$  – выходная мощность на стороне переменного тока инвертора, [Вт];  $P_{ac0}$  – номинальная мощность на стороне переменного тока инвертора (паспортная характеристика), [Вт];  $P_{dc}$  – мощность, вырабатываемая на стороне постоянного тока, [Вт];  $P_{dc0}$  – номинальная мощность на стороне постоянного тока инвертора (паспортная характеристика), [Вт];  $P_{s0}$  – мощность собственного потребления инвертора (паспортная характеристика), [Вт].

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Географическая точка, выбранная для расчета – город Базель, Швейцария (47°33'30" с. ш. 07°37'00" в. д.). Выбор обоснован тем, что для данного города существует обширный архив общедоступных метеоданных, в том числе по облачности и измеренному значению плотности потока энергии солнечного излучения у поверхности земли, что позволяет провести анализ погрешности прогнозирования. Кроме того, этот город расположен в Северном полушарии, приблизительно на той же широте, на которых могут располагаться СЭС в России. В качестве иллюстрации работоспособности методики приведены результаты расчета на часовых интервалах для одного солнечного дня (29.04.2017) на рис.1 и для одного облачного дня (25.04.2017) на рис.2.

Анализ параметров ошибки прогноза при рассмотрении ясных дней показывает, что модель обладает небольшой средней абсолютной ошибкой, равной 11,3%. При этом среднеквадратичная ошибка прогноза, нормализованная на рассматриваемом диапазоне плотности потока солнечного излучения, составляет 2,8 %.



Рис. 1. Сводная диаграмма результатов для 29.04.2017 (ясный день)

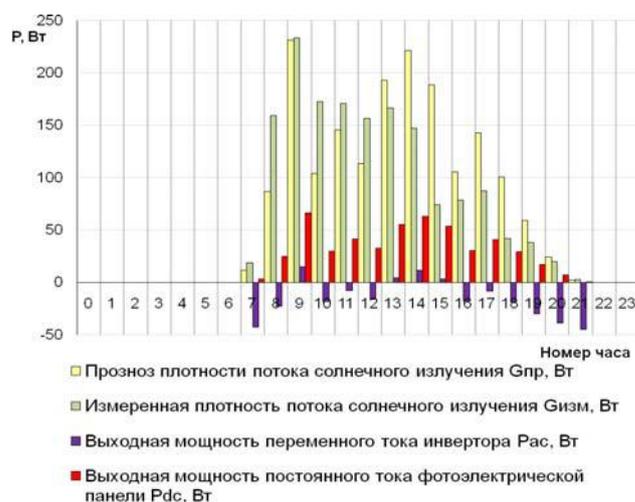


Рис. 2. Сводная диаграмма результатов для 25.04.2017 (облачный день)

Анализ параметров ошибки прогноза при рассмотрении облачных дней показывает, что средняя абсолютная ошибка равна 48,6%, тогда как абсолютная ошибка прогноза изменяется в широких пределах от 5%, до 150% в отдельные часы, что указывает на низкую универсальность коэффициентов регрессии, полученных для (2). Нормализованная среднеквадратичная ошибка составляет 22,3 %.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная физико-статистическая модель прогнозирования обладает приемлемой точностью, особенно в ясные дни, на которые и приходится основная часть выработки СЭС. Значения выходной мощности фотоэлектрической панели  $P_{pv}$  и выходной мощности инвертора  $P_{ac}$ , главным образом, зависят от плотности потока солнечного излучения, изменяясь в течение суток пропорционально величине  $\overline{G_T}$ . Модель является достаточно гибкой, ошибка прогнозирования при использовании может быть снижена за счет более корректного определения коэффициента прозрачности посредством рассмотрения большей выборки при регрессионном анализе, кроме того, она может быть адаптирована для любых географических координат.

#### Список литературы

- [1] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineering of Thermal Processes. University of Wisconsin-Madison, 2013. – 928 с.
- [2] W. D. Turner, Abdulaziz Mujahid. The Estimation of Hourly Global Solar Radiation Using a Cloud Cover Model Developed at Blytheville, Arkansas. // Journal of Climate and applied meteorology. – 1984. – № 23. – С. 781-786.
- [3] Sokol Dervishi and Ardeshir Mahdavi. Comparison of models for the derivation of diffuse fraction of global irradiance data for Vienna, Austria. // Сборник докладов Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney. – 2011. – № 12. – С. 765-771.
- [4] Chiou-Jye Huang, Mao-Ting Huang, and Chung-Cheng Chen. A Novel Power Output Model for Photovoltaic Systems // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. – 2013– № 2. – С. 139-147.
- [5] King, D. I., S. Gonzalez, G. M. Galbraith and W. E. Boyson. Performance Model for Grid-Connected Photovoltaic Inverters. Albuquerque, NM, Sandia National Laboratories. – 2007. – 47 с

# Применение энергороутеров в системах электроснабжения с распределенной генерацией

Г.О. Арсентьев<sup>1 a</sup>, Ю.Н. Булатов<sup>2 b</sup>, А.В. Крюков<sup>1,3 c</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО "Иркутский национальный исследовательский технический университет", Иркутск, Россия

<sup>a</sup> E-mail: arsentev\_1986@bk.ru

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО "Братский государственный университет", Братск, Россия

<sup>b</sup> E-mail: bulatovyura@yandex.ru

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения", Иркутск, Россия

<sup>c</sup> E-mail: and\_kryukov@mail.ru

*Аннотация* — Современный этап развития электроэнергетики характеризуется сменой технологической платформы и переходом к технологиям интеллектуальных сетей – smart grid. Для формирования таких сетей требуется внедрение новых технологий управления режимами, а также интерфейсов, обеспечивающих подключение возобновляемых источников энергии. Одним из перспективных направлений развития интеллектуальных сетей является применение в системах электроснабжения энергетических роутеров (ЭР), которые могут эффективно применяться для управления потоками электроэнергии и для подключения установок распределенной генерации (РГ). На основе ЭР может быть решена задача повышения качества электроэнергии в сетях 0,4 кВ, подключенных к районным обмоткам тяговых трансформаторов.

Исследования проводились с помощью пакетов имитационного моделирования Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB. Моделировался отдельный район электроснабжения нетяговых потребителей, включающий установки РГ, работающие с использованием возобновляемых энергоресурсов. В статье приводится описание разработанных имитационных моделей управляемого ЭР и установок РГ.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что применение ЭР позволяет надежно интегрировать установки распределенной генерации в системы электроснабжения нетяговых потребителей и полностью устраняет проблемы с качеством электроэнергии.

*Ключевые слова* — энергетический роутер, системы электроснабжения, установки распределенной генерации, возобновляемые источники энергии, качество электроэнергии

## Application of energy router in power supply systems with distributed generation

G.O. Arsentiev<sup>1 a</sup>, Yu.N. Bulatov<sup>2 b</sup>, A.V. Kryukov<sup>1,3 c</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

<sup>a</sup> E-mail: arsentev\_1986@bk.ru

<sup>2</sup> Bratsk state university, Bratsk, Russia

<sup>b</sup> E-mail: bulatovyura@yandex.ru

<sup>3</sup> Irkutsk state transport university, Irkutsk, Russia

<sup>c</sup> E-mail: and\_kryukov@mail.ru

*Abstract* — The current stage in the development of the electric power industry is characterized by a change in the technological platform and a transition to smart grid technologies. For the formation of such networks requires the implementation of new technologies of control modes and interfaces that connect renewable energy sources. One of the promising areas for the development of intelligent networks is the use of energy routers (ER) in power supply systems that can be effectively used to manage electricity flows and connect distributed generation (RG) plants. On the basis of ER, the problem of improving the quality of electricity in 0.4 kV networks connected to district windings of traction transformers can be solved.

The studies were carried out using simulation packages Simulink and SimPowerSystems of the MATLAB system. A separate region of power supply of non- tractive consumers was modeled, including RG plants operating using renewable energy resources. The article describes the developed simulation models of a controlled ER and RG plants.

The results of computer modeling show that the use of ER allows reliable integration of small distributed generation plants into power supply systems of non- tractive consumers and completely eliminates problems with the quality of electricity.

*Keywords* — power supply systems, distributed generation plants, forecasting excitation and rotor speed controls

## 1. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития электроэнергетики происходит смена технологической платформы с переходом к технологиям интеллектуальных сетей – smart grid [1, 2]. Формирование таких сетей требует внедрения новых технологий управления режимами, а также интерфейсов, обеспечивающих подключение возобновляемых источников энергии. Перспективным направлением развития интеллектуальных сетей является применение в системах электроснабжения (СЭС) энергетических роутеров (ЭР), построенных с использованием высокочастотных твердотельных трансформаторов [3, 4]. Использование ЭР позволяет выполнять следующие функции: управление потоками электроэнергии; осуществление обмена информацией; интеграция установок малой распределенной генерации (РГ) в СЭС, в том числе работающих на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) [5–8]. Кроме этого внедрение ЭР в СЭС позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей и качество электроэнергии с возможностью получения дополнительных доходов от реализации избыточной энергии ВИЭ.

В интеллектуальных сетях низкого напряжения (nano grid, pico grid) ЭР может реализовываться по безтрансформаторной схеме на основе вставки (звена) постоянного тока [8]. В ЭР, подключаемых к интеллектуальным СЭС среднего напряжения (micro grid), как правило, используется схема с твердотельным трансформатором (SST), представленная на рис.1. Твердотельный трансформатор представляет собой однофазный высокочастотный силовой трансформатор в моноблочном исполнении с двумя активными полупроводниковыми мостами. Такое техническое решение позволяет минимизировать размеры силового трансформатора, обеспечивает возможность подключения источников и потребителей на постоянном и переменном токе, а также поддерживает двухстороннюю передачу электроэнергии.

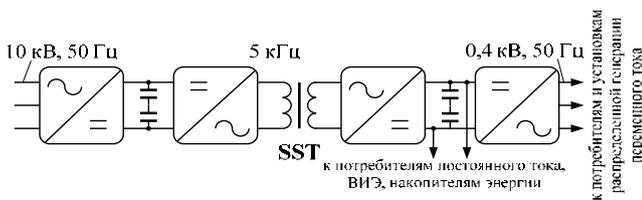


Рис. 1. Схема энергетического роутера

В статье представлены результаты моделирования работы системы электроснабжения нетяговых потребителей, подключенной через ЭР и включающей установки РГ, работающие с использованием возобновляемых энергоресурсов. Исследования проводились с помощью пакетов имитационного моделирования Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB.

## II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

Энергетические роутеры могут эффективно применяться в системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) в качестве элемента, обеспечивающего управление потоками энергии, подключение установок РГ [5–9], в том числе реализованных на базе ВИЭ. Кроме того, на основе ЭР может быть решена задача повышения качества электроэнергии в сетях, подключенных к районным обмоткам тяговых трансформаторов.

В схемах ЭР малой и средней мощности в высокочастотном инверторе могут использоваться полевые Mosfet – транзисторы, которые имеют хорошие динамические характеристики, позволяющие работать в системах с частотой до 100 кГц. Рабочая частота таких ЭР составляет около 20 кГц. Однако эти полупроводниковые элементы имеют ограничения по величине пропускаемого тока – до 100 А. В высокочастотном инверторе предлагаемого ЭР (рис. 1) применяются биполярные IGBT – транзисторы, способные коммутировать токи выше 1 кА. Эффективное применение такого транзистора ограничено частотой переключений, при которой потери находятся в допустимых пределах, обеспечивающих достаточно высокий КПД преобразования (выше 90 %). Эта частота не должна превышать 5 кГц.

Для возможности регулирования напряжения у инвертора, работающего на систему электроснабжения потребителя 0,4 кВ, должна быть предусмотрена система автоматического управления напряжения.

С учетом описанных требований в системе MATLAB с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems была разработана имитационная модель ЭР. Схема модели представлена на рис. 2. На рис. 3 представлена схема модели инвертора с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором напряжения, работающего на систему электроснабжения 0,4 кВ.

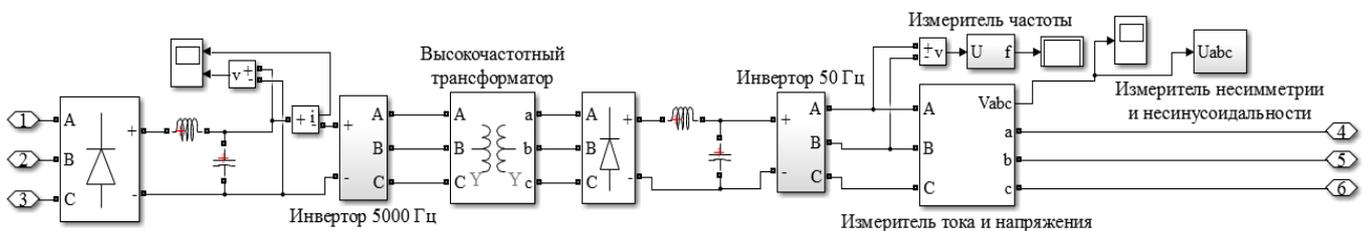
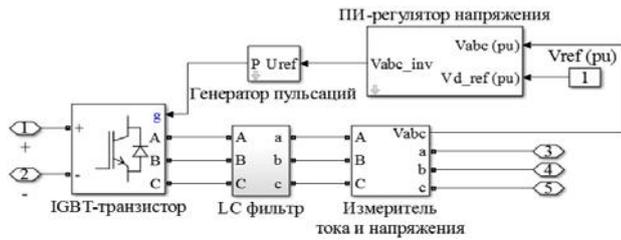


Рис. 2. Схема модели энергетического роутера



3. Схема модели инвертора с ПИ-регулятором напряжения

Разработанную модель ЭР можно интегрировать в любую модель электрической сети, реализованную в системе MATLAB. Модель ЭР также позволяет подключать установки РГ, работающие как на постоянном, так и на переменном токе. Для этого были разработаны модели солнечной электростанции и микро-ГЭС.

Модель солнечной электростанции реализована с использованием блока PV Array системы MATLAB, построенного на основе 100 параллельных и 10 последовательных солнечных фотоэлектрических модулей, соединённых между собой. Принципиальная электрическая схема отдельного модуля солнечной электростанции представлена на рис. 4. Мощность солнечной электростанции, подключенной к шинам постоянного тока ЭР, при моделировании принималась 107,5 кВт.

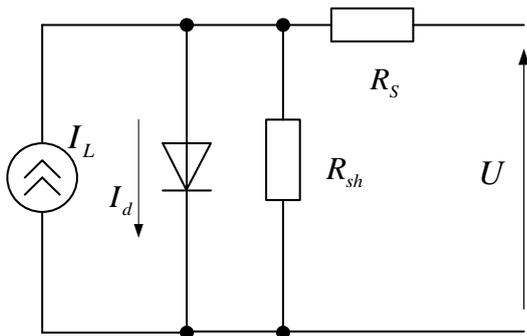


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема фотоэлектрического модуля

Микро-ГЭС моделируется с использованием стандартной модели генератора пакета SimPowerSystems системы MATLAB с мощностью 0,25 МВ·А и напряжением 0,4 кВ. Структурная схема используемой модели гидротурбины представлена на рис. 5а. Модель состоит из главного сервомотора, структурная схема которого показана на рис. 5б. Сервомотор, охваченный изодромной обратной связью, моделируется передаточной функцией  $\frac{1}{T_C s + 1}$ .

$T_C$  принималась равной 0,25 с. Изодромный регулятор моделировался следующей передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{ni \cdot T_i s}{T_i s + 1}, \quad (1)$$

где  $ni$  – коэффициент усиления изодрома (при моделировании принимался равным 10 о.е.);  $T_i$  – постоянная времени изодрома (при моделировании принималась равной 0,1 с).

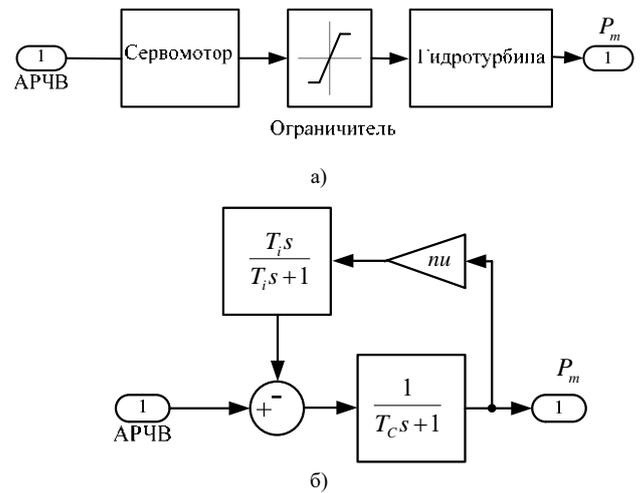


Рис. 5. Структурная схема модели гидротурбины (а) и главного сервомотора (б) в MATLAB

Гидравлическая турбина моделировалась передаточной функцией, учитывающей гидроудар [10]:

$$W_T(s) = \frac{1 - a_{уст} T_B s}{1 + 0,5 a_{уст} T_B s}, \quad (2)$$

где  $T_B$  – постоянная времени гидротурбины (при моделировании принималась равной 0,344 с);  $a_{уст}$  – положение открытия направляющего аппарата (принимает значения в диапазоне 0...1).

Регулирование напряжения и частоты вращения ротора гидрогенератора осуществлялось с использованием прогностических автоматического регулятора возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ), подробное описание моделей которых представлено в работах [11, 12].

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в системе MATLAB. Моделировался отдельный район электроснабжения нетяговых потребителей (рис. 6), подключенный через ЭР с интегрированными установками РГ, работающими на основе ВИЭ. На рис. 7 представлены результаты моделирования напряжения на входе ЭР. Из-за наличия несимметричной и нелинейной тяговой нагрузки имеет место заметная несинусоидальность и несимметрия, которая будет оказывать негативное влияние на работу ответственных потребителей, а также установок РГ, реализованных на основе синхронных и асинхронных генераторов [9, 13, 14].

При включении в систему электроснабжения ЭР потребители получают качественную электроэнергию (рис. 8), в которой отсутствуют негативные характеристики, свойственные для сетей нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Как показывают результаты моделирования, ЭР также позволяет надежно интегрировать в систему электроснабжения установки РГ, работающие с использованием ВИЭ.

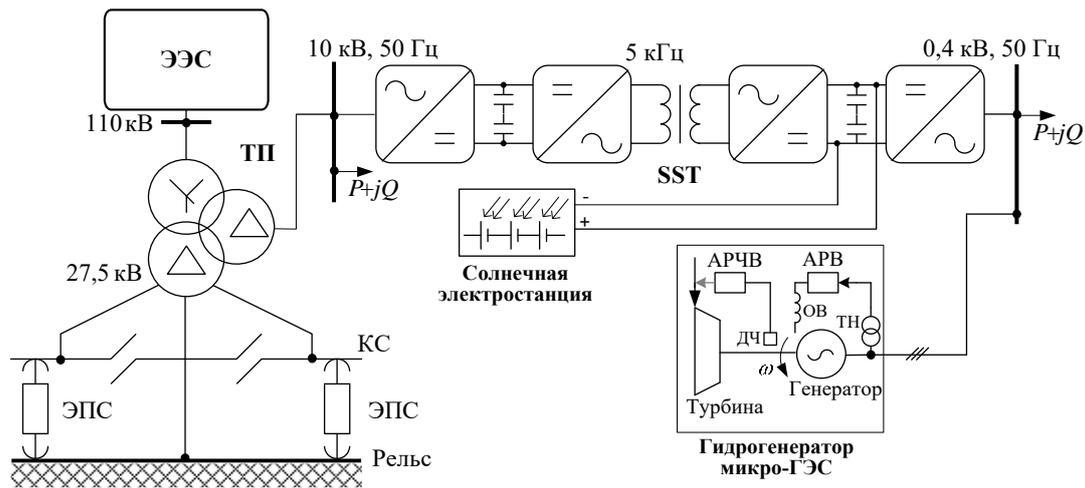


Рис. 6. Фрагмент системы электроснабжения железной дороги:

ЭЭС – электроэнергетическая система; ТП – тяговая подстанция; ЭПС – электроподвижной состав; SST – высокочастотный твердотельный трансформатор; КП – контактный провод; ДЧ – датчик частоты вращения; ОВ – обмотка возбуждения; ТН – трансформатор напряжения

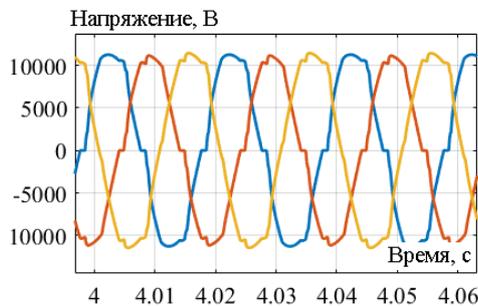


Рис. 7. Осциллограмма напряжения в месте подключения ЭР

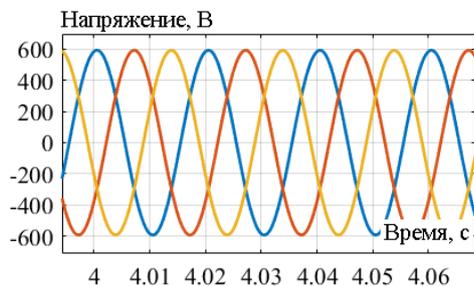


Рис. 8. Осциллограмма напряжения у потребителя при наличии ЭР

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что применение энергорутера для электроснабжения нетяговых потребителей полностью устраняет проблемы с качеством электроэнергии. Кроме того, энергетический роутер обеспечивает надежную интеграцию в систему электроснабжения установок распределенной генерации, в том числе реализованных на базе возобновляемых источников энергии.

#### Список литературы

[1] Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 4. – С. 29–34.

[2] Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // International symposium on smart electric distribution systems and technologies EDST 2015 Proceedings. – 2015. – pp. 260-264.

[3] Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet // 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). – 2011. – pp. 31-36.

[4] Shilpakala G. Bansode, Prasad M. Joshi. Solid state transformers: new approach and new opportunity // Proceedings of 11th IRF International Conference, 15th June-2014, Pune. – India. – pp. 15–21.

[5] Арсентьев М.О., Крюков А.В., Арсентьев О.В. Показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог с установками распределенной генерации // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 12(107). – С. 170-176.

[6] Арсентьев М.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Распределенная генерация в системах электроснабжения железных дорог. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. – 164 с.

[7] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Сетевые кластеры в системах электроснабжения железных дорог. – Иркутск: ИрГУПС, 2015. – 205 с.

[8] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Применение сетевых кластеров (microgrid) в системах электроснабжения железных дорог. – Братск: БрГУ, 2016. – 178 с.

[9] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Арсентьев Г.О. Применение асинхронных генераторов в системах электроснабжения железных дорог // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 8(115). – С. 118-126.

[10] Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. – М.: «Энергия», 1975. – 216 с.

[11] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Прогностические регуляторы для установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 1(29). – С. 63-69.

[12] Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Нгуен Ван Хуан. Применение прогностических регуляторов для управления режимами систем электроснабжения с установками распределенной генерации // Энергетика глазами молодежи-2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19-23 сентября 2016 г., Казань. – В 3 т. Т.3. – С. 157-160.

[13] Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Влияние несимметричной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 3(31). – С. 85-93.

[14] Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Влияние нелинейной нагрузки на работу турбогенераторов установок распределенной генерации // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4(32). – С. 95-100.

# ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В.

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия  
e-mail: gerasimovdo@mail.ru, dr.souslov@yandex.ru, ukolovaekaterina@yandex.ru

*Аннотация* - Состояние вопроса: Использование в системах энергоснабжения устройства, позволяющего накапливать и преобразовывать друг в друга различные виды энергоносителей, наряду с высокоразвитыми информационными системами, делает актуальным развитие такой технологии, как интегрированные системы энергоснабжения. Применение мульти-энергетических систем позволяет улучшить целый комплекс показателей работы энергетической системы, основными из которых являются: оптимизация графиков перетоков электрической энергии и мощности, повышение качества электрической энергии, повышение надежности энергоснабжения.

*Ключевые слова* — интегрированная система энергоснабжения, преобразователи энергии, накопители энергии, оптимизация энергопотребления, мульти-энергетические системы, microgrids, экономическая эффективность использования энергоресурсов.

## IMITATIVE MODELING OF MULTI-ENERGY SYSTEMS

Gerasimov D.O., Suslov K.V., Ukolova E.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia  
E-mail: gerasimovdo@mail.ru, dr.souslov@yandex.ru, ukolovaekaterina@yandex.ru

*Abstract* — **Background:** The use of an element base in power supply systems that allows accumulating and converting different types of energy carriers, along with highly developed information systems, makes the development of such technology as integrated energy supply systems relevant. The use of multi-energy systems makes it possible to improve a whole range of performance indicators of the energy system, the main ones being: optimizing the load schedules of generating stations and network infrastructure, improving the quality of electrical energy, and improving the reliability of energy supply.

*Keywords* — **integrated energy supply system, energy converters, energy storage, optimization of energy consumption, multi-energy systems, microgrids, economic efficiency of energy resources use.**

### I. ВВЕДЕНИЕ

Использование в системах энергоснабжения элементной базы, позволяющей накапливать и преобразовывать друг в друга различные типы энергоносителей, наряду с высокоразвитыми информационными системами, делает актуальным развитие таких технологий, как интегрированные системы энергоснабжения [1]. Применение мульти-энергетических систем позволяет улучшить целый комплекс показателей работы энергетической системы, основными из которых являются: оптимизация графиков нагрузки генерирующих станций и сетевой инфраструктуры, повышение качества электрической энергии, повышение надежности энергоснабжения.

### II. ПОНЯТИЕ МУЛЬТИ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Мульти-энергетические системы, посредством которых электричество, тепло, охлаждение, топливо, транспорт и т.д., оптимально взаимодействуют друг с

другом на разных уровнях (например, в пределах района, города или региона), представляют собой важную техническую, экономическую и экологическую энергетические системы. Сектора этих систем рассматриваются независимо. Это происходит как на оперативном уровне, так и на этапе планирования. Такие системы образуют отдельные системы с распределенной генерацией с множеством векторов энергии (DMG - распределенная мультигенерация). Они могут стать ключевым вариантом декарбонизации энергетического сектора, подходами, необходимыми для моделирования и соответствующие инструменты для их анализа зачастую имеют большую сложность. Аналогичным образом, идентифицировать нелегко системы, которые способны правильно учесть издержки и выгоды, связанные с различными типами МЭС по различным критериям.

### III. ИЗОЛИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

В зависимости от пропускной способности объектов электросетевого хозяйства, и также наличия, либо

отсутствия присоединения сетей к Единой национальной электрической сети, вся территория страны условно разделена на ценовые и неценовые зоны, а также изолированные энергорайоны (Рисунок 2) [2].



Рис.1 Ценовые и неценовые зоны

Первая ценовая зона (Европейская часть России, за исключением республики Коми, Архангельской и Калининградской областей, а также Урал) и Вторая ценовая зона (Сибирь) – территории, на которых возможна конкурентная торговля электрической энергией и мощностью, так как субъекты электроэнергетики не имеют возможности манипулировать ценами вследствие монопольного положения, вызванного ограниченной пропускной способностью сетей. Переголки между ценовыми зонами, а также между ценовыми и неценовыми зонами являются незначительными.

#### IV. РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Применение МЭС с промежуточным накоплением энергии позволяет решать задачи энергообеспечения на различных уровнях возникающих проблем [3, 4]. На государственном (макроэкономическом) уровне - это создание в короткие сроки энергорайонов, удаленных от энергосистем, с незначительными капитальными вложениями в строительство локальных сетей, обеспечение электроэнергией населения в условиях чрезвычайных ситуаций, а также улучшение экологической обстановки. На региональном уровне - это возможность получения дополнительных мощностей без строительства новых электростанций и ввода дополнительных трансформаторных подстанций. Для предпринимателей - это получение новых доходов за счет создания предприятий (с возможностью их электроснабжения) в тех местах, где ранее это было экономически невыгодно. Это возможность работы предприятия при отключении электроэнергии (аварии) на линиях электропередачи, а также снижение расходов на электроэнергию за счет ее накопления в режиме использования ночного тарифа.

Для исследования принципов функционирования данной системы с целью оптимизации ее работы по тем или иным целевым критериям, необходимо получить математическую модель энергетического хаба, как объекта управления.

При разработке функциональной схемы энергетического хаба для анализа работы энергетической системы с разными энергоносителями, учитывая их взаимное влияние, необходимо учитывать следующее:

- Типы энергоносителей (электроэнергия, тепловая энергия, газ и т. п);
- Ограничение накладываемые на энергоносители по мощности, расходу, потери и нелинейности при передаче и преобразовании энергии;
- Приведение различных единиц измерения энергоносителей к единой системе измерения;
- Возможность технической реализации преобразования одного вида энергоносителя в другой;
- Особенности технической реализации накопления различных видов энергоносителей;
- При наличии тепловой части, эксергетическую составляющую энергетического баланса [5, 6];
- Ограничение по времени на запуск энергоносителей.

Алгоритмическая реализация блоков преобразования одного вида энергии в другой или их накопление, основывается на том, что математическое описание выходных характеристик данных устройств с достаточной точностью можно реализовать системой или одним линейным дифференциальным уравнением первого или второго порядка с постоянными коэффициентами. Также необходимо учитывать коэффициент преобразования одного вида энергии в другой.

Техническая реализация концепции мульти-энергетической системы представлена на рисунке 2.

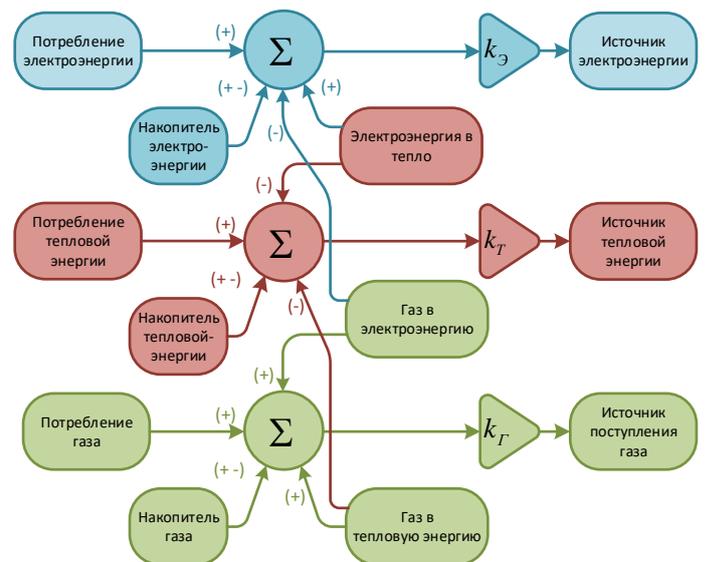


Рис. 2 Функциональная схема для реализации в SimPowerSystem системы MatLab

В схеме видно, что основными объектами системы являются накопители и преобразователи энергии.

Программная реализация имитационной модели интегрированной системы для трех типов энергоносителей состоит из трех подсистем и имитационной модели панели управления. Подсистемы El\_Sys, Heat\_Sys, Gas\_Sys моделирует работу по каналам электро-, тепло- и газоснабжению соответственно.

Элементы панели управления позволяют, в режиме реального времени управлять нагрузкой по всем каналам энергоснабжения, также управлять работами накопителей энергии, как при накоплении энергии, так и при ее отдаче.

Преобразователи электроэнергии в тепло, газа в тепло, и газа в электрическую энергию также имеют соответствующие органы управления.

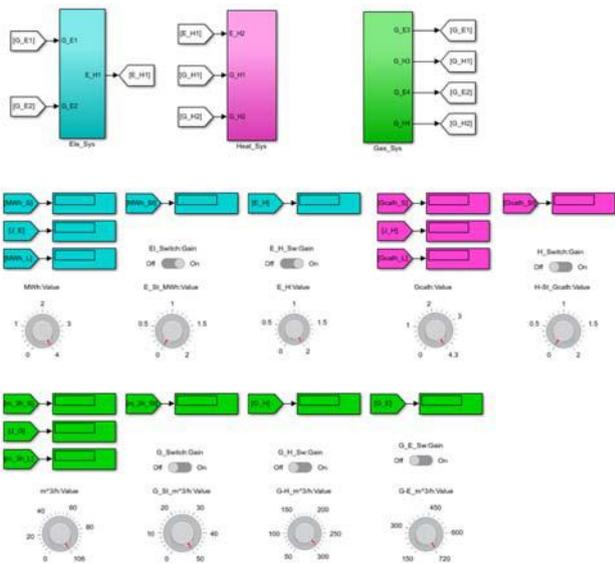


Рис. 3 Программная реализация мульти-энергетической системы SimPowerSystem системы MatLab

Структурные схемы, реализованные в подсистемах El\_Sys, Heat\_Sys, Gas\_Sys представлены на рисунках 4-6. Общими для всех структурных схем является имитационные блоки, реализующие нагрузку потребителя и связанные с ними органы управления. Также каналы накопления соответствующих видов энергии и связанных с ними органов управления. Преобразователи одного вида энергии в другую реализованы следующим образом: электричество в тепло, газ в тепло, газ в электроэнергию. В качестве номинальных данных взяты реальные номинальные данные водогрейного котла электрического, водогрейного котла на газе и газотурбинной установки. Преобразование различных видов энергии проводилось с учетом изменения коэффициента полезного действия преобразователя в зависимости от нагрузки.

Общими для всех структурных схем является имитационные блоки, реализующие нагрузку потребителя и связанные с ними органы управления. Также каналы накопления соответствующих видов энергии и связанных с ними органов управления. Преобразователи одного вида энергии в другую реализованы следующим образом: электричество в тепло, газ в тепло, газ в электроэнергию.

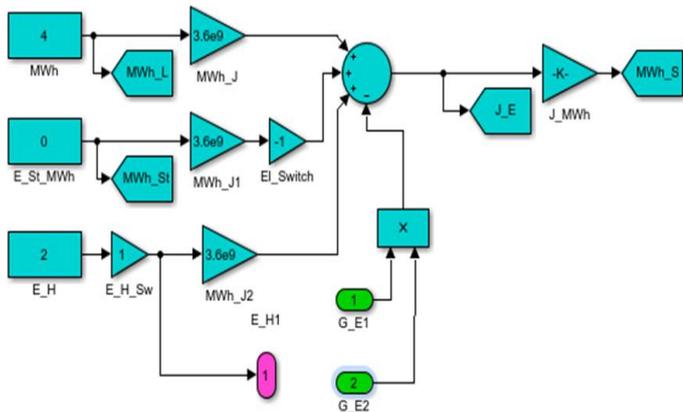


Рисунок 4 – Подсистема реализующая канал электроэнергетики

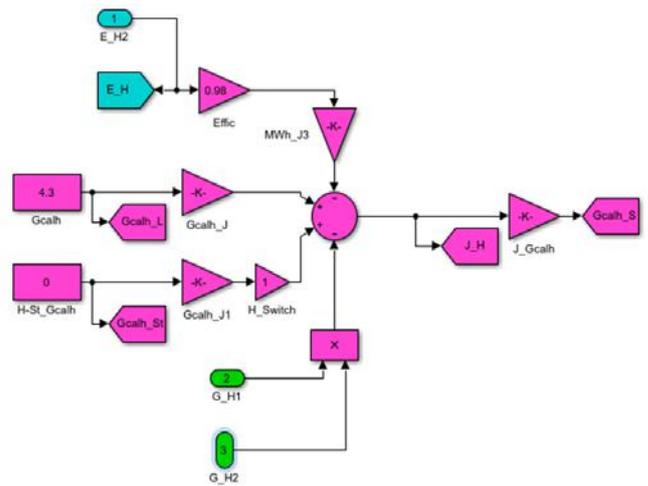


Рис. 5 Подсистема реализующая канал тепловой энергии

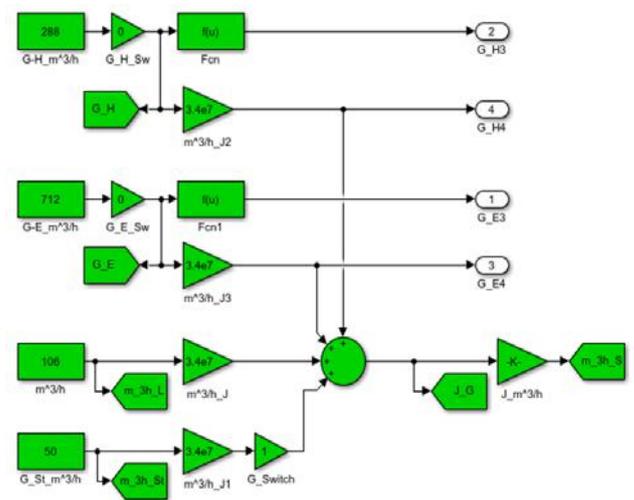


Рис.6 Подсистема реализующая канал газа

В качестве номинальных данных взяты реальные номинальные данные водогрейного котла электрического, водогрейного котла на газе и газотурбинной установки. Преобразование различных видов энергии проводилось с учетом изменения коэффициента полезного действия преобразователя в зависимости от нагрузки. Элементы мульти-энергетической системы моделировались упрощенными алгебраическими уравнениями. Для возможности учета перераспределения потоков энергии все энергетические единицы приводились к одной системе (Дж). Это позволило учитывать перераспределение потоков энергии относительно друг друга без применения сложных математических моделей физических устройств. Данная имитационная модель позволяет исследовать режимы работы мульти-энергетической системы в статическом режиме в зависимости от исследуемых целевых функций.

## V. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИ-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Структура себестоимости характеризуется удельным весом составляющих затрат в суммарной себестоимости. Структура себестоимости для энергетических производств отличается от структуры себестоимости для промышленности и различна для отдельных типов

энергетических установок [7]. Так, в электроэнергетике наибольшие затраты приходятся на топливо, а в машиностроительном и металлургическом комплексах - на сырье и материалы, на ТЭС и котельной - на топливо, на предприятиях тепловых сетей - на амортизационные отчисления. Для каждого типа производства структура зависит от мощности, типа оборудования и масштаба производства.

Для каждого преобразователя был произведен расчет издержек. Для каждого преобразователя был произведен расчет издержек. Для расчета себестоимости были учтены следующие показатели:

1. Стоимость установки, руб.
2. Издержки на амортизацию, руб.
4. Издержки на ремонт, руб.
5. Прочие (1% от стоимости),
6. Срок службы, год
7. Норма амортизации
8. Издержки годовые 1 год, руб.
9. Издержки годовые, последующие года, руб.
10. Удельные капитальные вложения, руб.
11. Объем энергии произведенный с помощью основных фондов
12. Установленная мощность кВт, годовая выработка электроэнергии
13. Капитальные затраты, руб.

Также был произведен расчет затрат при использовании накопителей. После расчета затрат была подсчитана себестоимость электроэнергии с учетом накопителя и без него (Рисунок 7).

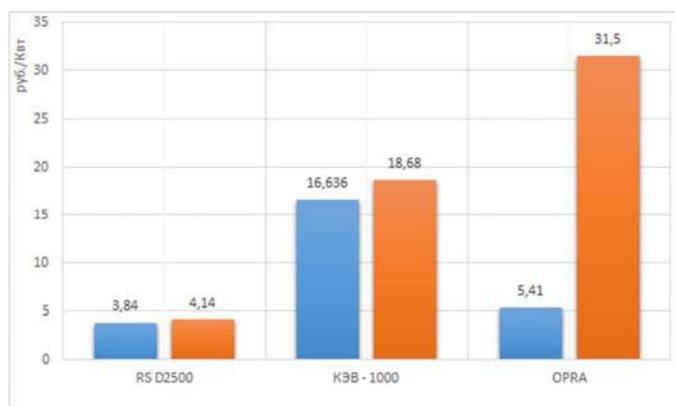


Рис. 7 Себестоимость электроэнергии

Из расчета себестоимости можно сделать вывод, что цена за кВт увеличилась с учетом установки накопителя. При этом система станет более надежной. Появляется возможность бесперебойного снабжения в аварийной ситуации.

## VI. Выводы

Использование в системах энергоснабжения элементной базы, позволяющей накапливать и преобразовывать друг в друга различные типы энергоносителей, наряду с высокоразвитыми

информационными системами, делает актуальным развитие таких технологий, как интегрированные системы энергоснабжения. Применение мульти-энергетических систем позволяет улучшить целый комплекс показателей работы энергетической системы, основными из которых являются: оптимизация графиков нагрузки генерирующих станций и сетевой инфраструктуры, повышение качества электрической энергии, повышение надежности энергоснабжения.

В статье описана техническая возможность реализации МЭС. Представлена функциональная схема мульти-энергетической сети, выполненная в среде MatLab. Рассмотрены накопители и преобразователи энергии.

Применение мульти-энергетических систем позволит решить ряд задач:

1. Энергоснабжение на изолированных территориях;
2. Обеспечение электроэнергией населения в условиях чрезвычайных ситуаций;
3. Улучшение экологической обстановки;
4. При применении нескольких типов энергоносителей можно менять стоимость за счет вариации;
5. Получение дополнительных мощностей без строительства новых электростанций и ввода дополнительных трансформаторных подстанций;
6. Сбор статистических данных.

В работе выполнен расчет себестоимости электроэнергии с учетом установки накопителей. Сделан обзор показателей эффективности.

## Список литературы

- [1] Герасимов Д.О., Алгоритм расчета экономической эффективности строительства распределенной генерации, Герасимов Д.О., Уколова Е.В. // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2016. С. 400-405.
- [2] Сулов К.В. Центральная система управления виртуальными электростанциями, Уколова Е.В., Сулов К.В., //Энергия-2016 Экономические аспекты развития энергетики. 2016. С. 75-76.
- [3] Уколова Е.В. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности. Smart Grid как инструмент повышения энергоэффективности // Молодежный вестник ИрГТУ. 2016. № 1. С. 26.
- [4] Муканина А.А., Герасимов Д.О., Сулов К.В. Concept energy hub is as part of integrated energy systems // Материалы VII Международной молодежной научно-технической конференции «Электротехника глазами молодежи – 2016», том 3, КГЭУ. – с. 262-264
- [5] Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. - 2014, № 1. - С. 64-73.
- [6] Мочалин С. М. Анализ методик оценки результативности деятельности предприятий. / С. М. Мочалин, В. В. Чувилова // Научный журнал «Проблемы экономики»: материалы III Международной научно-практической конференции «Экономические науки в России и за рубежом» - Москва, 2011.
- [7] Мочалин С. М. Система показателей для оценки результативности взаимодействия предпринимательских структур. / С. М. Мочалин, В. В. Чувилова // «Логистика - евразийский мост: материалы VI Междунар. научно-практ. конф.» - в 2 ч. - Красноярск, 2011. Ч1. С. 487-493.

# РЕКУПЕРАЦИОННО-ТЕПЛОВАЯ МАХОВИКОВАЯ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

С.М. Минько<sup>1</sup>, И.А. Рахматуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет  
Томск, Россия  
E-mail: sminko27@gmail.com

*Аннотация* - Ключевой проблемой современной мировой энергетики является проблема аккумулирования электроэнергии. Производство атомной и тепловой электроэнергии наносит большой экологический ущерб населению и окружающей среде, часто случающиеся на АЭС и ТЭС аварии несут большую угрозу жизни и здоровью людей, живущих рядом с этими объектами. А развитие экологически чистой и безопасной солнечной и ветровой энергетики сдерживается несовпадением времени выработки электроэнергии и времени её потребления. Применяемые сейчас в промышленных масштабах гидроаккумулирующие электростанции имеют целый ряд недостатков, которые не позволяют существенно решить описанные выше проблемы. Эти обстоятельства требуют внедрения новых методов и способов аккумулирования электроэнергии. Для этих целей может быть использована рекуперационно-тепловая маховиковая воздушно-аккумулирующая электростанция (ВАЭС). При проведении исследования основным методом является проектировочный расчёт. При выполнении экспериментальной части методом исследования являлось математическое моделирование. В качестве инструментов проектирования и моделирования применялось программное обеспечение MathLAB, AutoCAD, Fusion360. Получены результаты проектирования энергоустановки. Предложены оптимальные параметры конструкции и режима работы рекуперационно-тепловой маховиковой ВАЭС. Проведённые расчёты показали, что проект реализуем в сегодняшних условиях. Необходимы дополнительные, более точные расчёты, а также прототип, планируемый в ближайшее время. Реализация проекта позволит вывести из эксплуатации неэффективные тепловые и атомные электростанции, решить вопрос аккумулирования электроэнергии и обеспечить локально удалённых потребителей дешёвой и экологически чистой электроэнергией.

*Ключевые слова:* аккумулирование электроэнергии, возобновляемые источники энергии, рекуперация тепловой энергии, маховиковый накопитель, тепловой аккумулятор энергии.

## RECUPERATIVELY-THERMAL FLYWHEEL AIR-BATTERY POWER STATION

S.M. Minko<sup>1</sup>, I.A. Rahmatullin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Russian Federation

*Abstract* - The key problem of modern world energy is the problem of accumulating electricity. Also, the socio-political aspect must be attributed to the cost of electricity production - great ecological damage to the population and the environment, the accidents that often occur on them pose a great threat to the life and health of people living next to these objects. And the development of clean and safe solar and wind power is restrained by the mismatch of the time of electricity generation and the time of its consumption. The currently used pumped storage power plants have a number of shortcomings that do not allow to solve the problems described above. These circumstances require the introduction of new methods and techniques of accumulating electricity. For these purposes, a recuperative-heat flywheel air-accumulating power plant can be used. During the research, the main method is the design calculation. When performing the experimental part, the method of investigation was mathematical modeling. MathLAB, AutoCAD, Fusion360 software was used as design and modeling tools. The results of designing the power plant are obtained. Optimum parameters of the design and operating mode of the recuperation-heat flywheel air-accumulating power plant are proposed. The performed calculations showed that the project is being implemented in today's conditions. More precise calculations are needed, as well as a prototype planned in the near future. The implementation of the project will make it possible to decommission inefficient thermal and nuclear power plants, solve the problem of accumulating electricity and provide locally remote consumers with cheap and environmentally friendly electricity.

*Key-words:* energy storage, renewable energy sources, heat energy recovery, flywheel storage, heat energy storage.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Ключевой проблемой современной мировой энергетики является проблема аккумулирования электроэнергии. Над решением проблемы аккумулирования электроэнергии работают много специалистов в разных странах. В качестве основных вариантов решения этой проблемы рассматриваются химические аккумуляторы, маховиковые накопители, сверхпроводниковые накопители, гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), воздушно-аккумулирующие электростанции (ВАЭС).

Единственным масштабным промышленным способом аккумулирования электроэнергии сегодня являются гидроаккумулирующие электростанции. Но речные гидроресурсы ограничены и на сегодняшний день практически исчерпаны.

В отличие от гидроресурсов ресурсы воздуха на земле общедоступны и не ограничены. Однако два реализованных варианта ВАЭС в промышленных масштабах в США и Германии оказались ещё более неэкономичными по сравнению с ГАЭС, так как обратная выработка электроэнергии на них осуществлялась с помощью типовых газотурбинных установок с традиционным КПД в 28-32%. Таким образом в процессе аккумулирования энергии на данных ВАЭС терялось более 70% накапливаемой энергии. Небольшие ВАЭС баллонного типа существуют практически на всех действующих крупных электростанциях. Принцип их действия: за счёт внутренней электроэнергии электростанции компрессор закачивает воздух в баллон сжатого воздуха, увеличивая в нём давление. В последствии этот сжатый воздух используется в процессе пуска турбины в работу после остановки. ВАЭС баллонного типа тоже считаются неэкономичными, так как при работе компрессора и закачке воздуха в баллон теряется много энергии в виде тепла, излучаемого в окружающую среду.

## II. ОПИСАНИЕ ВАЭС

Представляется, что главной ошибкой разработчиков проектов накопителей энергии является то, что они рассматривали каждый из вариантов накопителей в отдельности, и рассматривали создаваемую установку именно как накопитель энергии, а не как самостоятельную электростанцию.

В предлагаемом проекте рекуперационно-тепловой маховиковой воздушно-аккумулирующей электростанции (далее -рекуперационно-тепловая ВАЭС или просто ВАЭС) предусмотрено комплексное объединение воздушно-аккумулирующей электростанции баллонного типа, маховикового накопителя энергии, теплового аккумулятора электроэнергии, рекуперационно-тепловой электростанции в одном агрегате. Именно их комплексное объединение позволяет увеличить плюсы и сократить минусы каждого элемента.

Рекуперационно-тепловая ВАЭС типовой мощностью в 6 МВт должна размещаться непосредственно в местах потребления электроэнергии, то есть при промышленных предприятиях, животноводческих комплексах, трансформаторных подстанциях, больших общественных

зданиях, а также при действующих электростанциях. Энергоустановка ВАЭС размещается в теплоизолирующей трубе высотой 200 м, диаметром основания 14 м, толщиной стен в 1 м (стены трубы – железобетон (стальная арматура, залитая легким бетоном (пенобетон, газобетон) с низкой теплопроводностью)). Сбоку к трубе ВАЭС примыкает нагревательная камера ВАЭС. Нагревательная камера ВАЭС располагается рядом с вентиляционным выходом предприятия-потребителя электроэнергии, либо рядом с иным источником тепла (теплого воздуха). Схематично ВАЭС изображена на Рис.1.

Внутреннее пространство трубы ВАЭС делится на 2 части: на напорную камеру в виде усечённого алюминиевого конуса (диаметр основания 14 м, высота 100 м, диаметр вершины (сопла напорной камеры) – 0,7 м)и вытяжную камеру, располагающуюся от высоты 100 до вершины трубы на высоте 200 м. Внутри напорной камеры размещаются 2 компрессора мощностью 1 МВт каждый и 14 баллонов сжатого воздуха (ресиверов), располагающихся парами, друг над другом в 7 этажей. Каждый ресивер соединяется патрубками с верхним ресивером и с центральной трубой системы ресиверов. Внутри патрубков находятся электронно-регулируемые клапаны давления. Верх трубы системы ресиверов выходит непосредственно к соплу напорной камеры.

Над выходом из сопла напорной камеры размещается энергоустановка ВАЭС, состоящая из алюминиевой турбины специальной формы с общим диаметром 9 м, ротора генератора, состоящего из 48 отдельных полюсов ротора с неодимовыми магнитами (полюса ротора соединяются с турбиной керамическими шпильками), двух статоров генератора[1], соединенных кронштейнами к крепёжным стойкам, прикреплённым к стенкам трубы, двух боковых магнитных подшипников и одного верхнего магнитного ограничителя. В энергоустановке ВАЭС нет вала и механических подшипников. В нерабочем состоянии турбина ВАЭС с прикреплённым к ней ротором лежит на опоре, прикреплённой к соплу напорной камеры и покрытой порошком или мягкой резиной. Турбина ориентирована на приём давления воздуха снизу-вверх.

Рядом с энергоустановкой располагается распределительное устройство (РУ), принимающее электроэнергию от обоих статоров, и распределяющий её

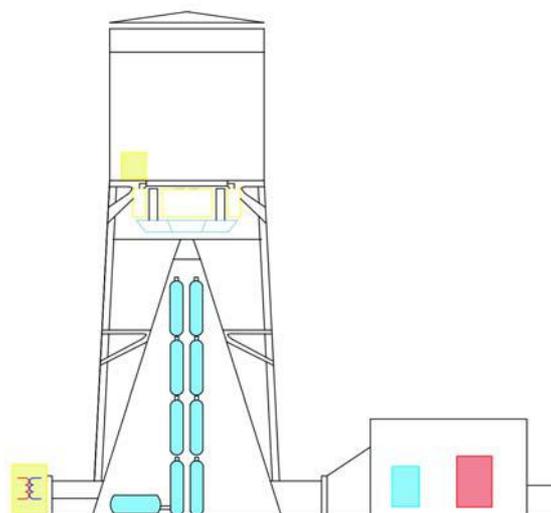


Рисунок 1 – Схема ВАЭС

по двум направлениям – на электронагреватель ВАЭС в нагревательной камере, либо на РУ на трансформаторной подстанции.

В нагревательной камере ВАЭС располагается электрический нагреватель ВАЭС, представляющий собой графитовую спираль, залитую расплавленным базальтом, находящуюся в кубе из огнеупорного материала (оксид магния). Кроме того, в зависимости от типа ВАЭС, в нагревательной камере может располагаться сосуд Дьюара с жидким воздухом и дополнительный неэлектрический нагреватель.

К трубе ВАЭС примыкает трансформаторная подстанция с тремя трансформаторами, один из которых преобразует напряжение генератора ВАЭС (10,5 кВ) в рабочее напряжение потребителя (220 или 380 В), второй преобразует напряжение генератора в напряжение подключенной общественной линии электропередач, третий трансформатор преобразует напряжение общественной линии электропередач в напряжение потребителя. В трансформаторной подстанции располагается РУ, распределяющее электроэнергию по следующим направлениям: на компрессоры ВАЭС, предприятию-потребителю электроэнергии и в общественную электросеть.

### III. ПРИНЦИП РАБОТЫ

За счёт внешней электроэнергии два компрессора закачивают воздух в систему ресиверов ВАЭС. Общая ёмкость системы ресиверов ВАЭС составляет 1120 м<sup>3</sup> под давлением 14 бар. Воздух из двух верхних ресиверов через клапаны давления стравливается в центральную трубу и подаётся в сопло напорной камеры. Под действием давления воздуха алюминиевая турбина ВАЭС поднимается на нормативную высоту (5 см) и раскручивается в режиме ускорения до нормативной скорости в 125 об/мин. Строго вертикальный подъём и не замыкание ротора на статор обеспечивают два боковых магнитных подшипника. Не допускает подъёма турбины выше нормативного уровня верхний магнитный ограничитель. Выход на нормативный режим работы осуществляется за 6-10 секунд. После выхода турбины и ротора ВАЭС на нормативный режим работы уровень давления воздуха снижается до уровня поддерживающего давления в 7,6 бар.

Во время пуска энергоустановки ВАЭС вся вырабатываемая статорами генератора электроэнергия направляется на электрический нагреватель ВАЭС. После выхода турбины и ротора ВАЭС на нормативный режим работы электроэнергия отправляется на трансформаторную подстанцию и далее по следующим направлениям:

- 1/6 мощности (1 МВт) – на компрессор ВАЭС с целью восстановления истраченного на запуск ВАЭС запаса сжатого воздуха;

- 5/6 мощности (5 МВт) – предприятию-потребителю, либо в общественную сеть.

Компрессор ВАЭС мощностью 1 МВт, работая в нормативном режиме (производительность 200 м<sup>3</sup>/мин, давление 10,3 бар) где-то за 5-6 минут полностью восстановит весь истраченный при пуске установки ВАЭС запас сжатого воздуха и, при этом, обеспечит

поддержание нормативного уровня рабочего давления в сопле ВАЭС.

Тепло, выделившееся в процессе работы компрессора, ресиверов, электронагревателя, трансформаторов ВАЭС нагреет окружающий воздух. Под действием силы тяги в трубе этот тёплый воздух поднимется вверх к соплу напорной камеры. За счёт притока этого тёплого воздуха по закону состояния идеального газа в сопле повысится уровень давления воздуха. Но нам нельзя повышать уровень давления воздуха выше нормативной величины в 7,6 бар, поэтому автоматика ВАЭС пропорционально повышению давления воздуха от притока дополнительного тёплого воздуха будет сокращать подачу в сопло напорной камеры сжатого воздуха из ресивера.

Предельная температура работы аппаратов ВАЭС составляет +150°С, так как выше этой температуры резко ухудшаются механические свойства основного материала аппаратов ВАЭС – алюминия. Рекуперация тепла, выделяемого при работе аппаратов ВАЭС по расчётам позволит увеличить температуру в напорной камере ВАЭС где-то на 10°С, при температуре окружающего воздуха от -40°С до +40°С у нас остаётся резерв для повышения температуры воздуха в диапазоне 100-180°С. Это тепло предлагается получить за счёт рекуперации *бесплатного* тепла, выбрасываемого сейчас вентиляцией потребителя в окружающую среду. То есть вентиляционные трубы потребителя направляются в нагревательную камеру ВАЭС, соответственно вентиляционный воздух под действием силы тяги в трубе высотой 200 м, проходя через нагревательную камеру попадает в сопло напорной камеры ВАЭС, увеличивая там давление, тем самым снижая потребность в дорогом давлении из ресивера.

На металлургических, цементных, химических предприятиях температура выбрасываемого в атмосферу воздуха составляет до +500°С. Использовать в ВАЭС воздух с такой температурой нельзя, поэтому предлагается его охлаждать до уровня +150°С посредством испарения жидкого воздуха из сосуда Дьюара, пропорционально повышая давление воздуха в нагревательной камере и далее в сопле напорной камеры. При использовании жидкого воздуха выходную мощность ВАЭС можно довести до 6 МВт, при этом компрессоры и ресиверы ВАЭС будут находиться в резерве.

В ВАЭС создаётся впечатление, что 5 МВт электроэнергии образуются «ниоткуда». То есть генератор ВАЭС вырабатывает 6 МВт мощности, 1 МВт мы тратим на поддержание работы ВАЭС, а 5 МВт электроэнергии мы можем отправлять потребителям. Но никакого нарушения закона сохранения энергии здесь нет – в ВАЭС используется несколько источников энергии, и есть потери энергии на турбине (10%), на компрессоре (12%), от столкновений воздуха со стенками аппаратов и сооружений, есть потеря энергии вращения турбины на лобовое сопротивление воздуха и на преодоление торможения электромагнитного момента работы генератора. Но есть 7 непривычных для современных энергетиков источников энергии (энергия сжатого воздуха из ресиверов, энергия неодимовых магнитов, энергия инерции вращения турбины и ротора (маховик), энергия естественной силы тяги воздуха в трубе 200 м, тепло, выделяемое агрегатами ВАЭС, внешнее тепло вентиляции

потребителя, энергия жидкого воздуха), которые полностью компенсируют эти потери и позволяют обеспечить работу генератора в плановом режиме.

Основным источником энергии в ВАЭС является кинетическая энергия маховика ВАЭС. Маховиком ВАЭС является турбина ВАЭС, ротор ВАЭС, внутренние части боковых магнитных подшипников и ограничителей. Общая масса маховика ВАЭС составляет 7 т. Радиус центра массы маховика – 2,3 м. Угловая скорость вращения – 13,08 рад/сек. Исходя из этих данных рассчитаны уровни подъёмной силы (68200 Н), центробежной силы инерции (2754963 Н), силы электромагнитного торможения работы генератора (249278 Н), и силы сопротивления воздуха (15631 Н). Рассчитан необходимый уровень пускового давления в 89 бар. при запуске за 1 сек и 20 бар при запуске за 7 сек, уровень рабочего поддерживающего давления в 7,6 бар, достаточный для преодоления сопротивления сил электромагнитного торможения и силы сопротивления воздуха. Функцию маховика турбина и ротор ВАЭС хорошо выполняют благодаря своей конструкции: турбина и ротор расположены вертикально, диаметр турбины и ротора увеличен до максимально возможно уровня, центр массы перенесён как можно дальше от центра к краям маховика, боковая толщина турбины и ротора максимально снижены для снижения сопротивления воздуха, механические подшипники заменены магнитными подшипниками, а снизу турбина опирается на сам поток воздуха.

Сегодняшние электростанции практически не используют силу инерции вращения турбины и ротора для производства электроэнергии потому что постоянно меняющаяся электрическая нагрузка потребителей требует постоянного изменения скорости вращения турбины, а в этом процессе сила инерции турбины мешает. Именно поэтому турбины и роторы ТЭС, АЭС, ГТУ размещают горизонтально и делают относительно маленького диаметра. При такой конструкции скоростью их вращения можно управлять, но их нельзя использовать в качестве маховика. Только в больших ГЭС конструктивно используется сила инерции турбины и ротора благодаря правильной конструкции – вертикальное расположение, большой диаметр центра массы.

В ВАЭС проблема постоянного изменения электрической нагрузки со стороны потребителей решена посредством использования электронагревателя в нагревательной камере. То есть лишняя электроэнергия, которая не находит в данный момент полезного спроса у потребителей, направляется на электронагреватель, который греет воздух в нагревательной камере. В ВАЭС этот тёплый воздух не выбрасывается в атмосферу, а под действием силы тяги через 10-12 сек (расстояние 100-120 м, скорость 10 м/сек) опять попадает на турбину и обеспечивает выработку электроэнергии. Таким образом, система генератор – электронагреватель – воздух – турбина в ВАЭС становится *тепловым аккумулятором* электроэнергии с потерями на уровне 30% на каждом цикле. Предлагаемый проект ВАЭС является объединением трёх накопителей энергии: 1.Воздушно-

аккумулирующая электростанция баллонного типа; 2.Маховиковый накопитель; 3.Тепловой аккумулятор. Одновременно данный проект ВАЭС является рекуперационно-тепловой электростанцией, вырабатывающей дополнительную электроэнергию за счёт рекуперации бесплатного тепла, выбрасываемого сегодня потребителями в окружающую среду.

КПД турбины ВАЭС предлагаемой конструкции составляет около 90%, за основу данной конструкции турбины взята конструкция действующей турбины-детандера с КПД 93%. Принципиальное отличие турбины-детандера, от газовой или паровой турбины заключается в полностью закрытой задней стенке рабочего колеса турбины, здесь молекулам воздуха некуда деваться – все они совершают работу по вращению турбины

#### IV. Вывод

За счёт объединения в одной электростанции четырёх электростанций, использования максимально эффективных конструктивных решений, достигается высокий экономический эффект. Себестоимость производства либо хранения электроэнергии в данной ВАЭС составляет 0,4 рубля за 1 кВт·час. Капитальные затраты на строительство одной ВАЭС составляет около 250 миллионов рублей, или около 850\$ на 1 кВт мощности. Срок окупаемости для среднего предприятия составляет 2 года.

ВАЭС работает в автоматическом режиме, контроль за её работой может осуществляться дистанционно, ремонт и замены вышедших из строя приборов и аппаратов осуществляется без отключения работы электростанции (все аппараты, которые могут выйти из строя (компрессор, клапаны в ресиверах и др.), продублированы, если один вышел из строя – автоматически включается в работу запасной). В ВАЭС нет топлива, нет отходов, нет угрозы катастрофической аварии (давление воздуха в 14 бар и температура в +150°C безопасны для окружающих).

Массовое строительство рекуперационно-тепловых ВАЭС позволяет эффективно решить существующие проблемы обеспечения жителей Земли дешёвой и чистой электроэнергией, в том числе в качестве автономных источников электроснабжения в населённых пунктах, отделённых от единой энергосистемы страны. Система ВАЭС обеспечит условие для максимально быстрого развития ветровой и солнечной энергетики, но, скорее не в виде существующих электростанций, а в виде ветровых и солнечных ВАЭС, у которых не будет проблем с хаотическим непредсказуемым характером выдаваемой электрической мощности.

#### Список литературы

- [1] R. Suhairi, R.N. Firdaus. Performance Characteristics of Non-Arc Double Stator Permanent Magnet Generator| Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 53, 201–214, 2017
- [2] Минько С.М., Ташлыков А.А..Воздушно-аккумулирующая электростанция» | Современная техника и технологии – Том 1, 98-102, 2017

# Расчет тарифов на передачу электрической энергии в сетях энергосистем на основе технико-экономической модели

В.С. Зубарев<sup>1</sup>, А.В. Паздерин<sup>2</sup>, Д.А. Фирсова<sup>2</sup>, И.В. Шевелев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Урала,

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина»

<sup>3</sup> Филиал ОАО «МРСК Урала» - «Свердловэнерго»

Екатеринбург, Россия

E-mail: [vitek.z@mail.ru](mailto:vitek.z@mail.ru), [a.v.pazderin@urfu.ru](mailto:a.v.pazderin@urfu.ru), [darina-firsova@mail.ru](mailto:darina-firsova@mail.ru)

**Аннотация** — На данный момент тарифы на услуги по передаче электроэнергии определяются на основе котлового принципа тарифообразования, подразумевающего равные значения тарифов для потребителей одного уровня тарифного напряжения. В статье описаны общие принципы технико-экономической модели, связывающие величины потоков электрической энергии, передаваемых по элементам электрической сети, со стоимостью их передачи. Данная модель позволяет представить процесс передачи электроэнергии в виде двух направленных процессов – передача потоков электроэнергии по схеме сети и передача потоков стоимости в аналогичных направлениях. Потоки стоимости определяются на основе стоимости содержания всех элементов сети и стоимости потерь на каждом элементе. Основу модели образуют условия балансов для всех ветвей и всех узлов расчетной схемы, записываемые для потоков электроэнергии и потоков стоимости. Используя данную модель, могут быть рассчитаны индивидуальные тарифы на передачу электрической энергии для каждой точки сети, которые непосредственно связаны с себестоимостью передачи электроэнергии до конкретных потребителей. Подобные расчеты были выполнены для реального района электрической сети «Свердловэнерго» и показали существенное различие в индивидуальных тарифах на передачу.

**Ключевые слова** — система условных единиц, метод адресности, индивидуальный тариф на передачу электроэнергии.

## Calculation of transmission and distribution tariffs for power systems based on the technical and economic model

V.S. Zubarev<sup>1</sup>, A.V. Pazderin<sup>2</sup>, D.A. Firsova<sup>2</sup>, I.V. Shevelev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> «System Operator of the United Power System», Joint-stock Company, ODU Ural Branch

<sup>2</sup>Ural Federal University named B.N. Yeltsin

<sup>3</sup> IDGC of Urals, "Sverdlovenego" JSC Branch

Ekaterinburg, Russia

E-mail: [vitek.z@mail.ru](mailto:vitek.z@mail.ru), [a.v.pazderin@urfu.ru](mailto:a.v.pazderin@urfu.ru), [darina-firsova@mail.ru](mailto:darina-firsova@mail.ru)

**Abstract** — Currently, transmission and distribution tariffs are calculated on the basis of the “pull” approach used for tariffs design. This approach implies equivalent tariffs for consumers connected to networks of the same voltage level. The article describes the general principles of the technical and economic model linking the amounts of electric energy flows transmitted by the elements of the electric grid to the cost of their transmission. This model allows us to present the process of electricity transmission in the form of two directional processes - the transmission of electricity flows through the network scheme and the transfer of flows of value in similar directions. Value streams are determined based on the cost of the content of all elements of the network and the cost of losses on each element. The basis of the model is the conditions of balances for all branches and all nodes of the design scheme, written for electricity flows and cost flows. Using this model, individual tariffs for the transmission of electricity for each point of the network can be calculated, which are directly related to the cost of electricity transmission to specific consumers. Similar calculations were performed for the real area of the «Sverdlovenego» power grid and showed a significant difference in individual transmission tariffs

**Keywords** — standard units system, addressness method, individual distribution tariff.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Либерализация электроэнергетики привела к выделению транспорта и распределения электроэнергии (ЭЭ) в самостоятельный вид деятельности, выполняемый электросетевыми организациями (ЭСО). ЭСО

осуществляют передачу ЭЭ до потребителей при отсутствии конкуренции, поэтому государство через свои регулирующие органы определяет тарифы на услуги по передаче электроэнергии (ТПЭ). В конечной цене ЭЭ для потребителей сетевая составляющая может находиться в диапазоне 25-70 % и она тем больше, чем на более низком

уровне напряжения находится потребитель, так как ТПЭ дифференцированы по уровням напряжения [1]. Одноставочный ТПЭ предполагает оплату услуг на передачу только по полученной потребителем ЭЭ за месяц. В двухставочном ТПЭ плата за ЭЭ меньше, но дополнительно существует ставка за мощность, которая взимается на основе усредненной мощности потребителя в часы наибольшей загрузки [1,2].

Обзор зарубежной литературы показывает, что в мире не найдено единой и оптимальной системы оплаты услуг на передачу ЭЭ. В разных странах существует большое разнообразие в принципах и схемах оплаты услуг за передачу, зависящих от правил функционирования оптового и розничного рынков ЭЭ [3-4]. Наиболее общие черты связаны с дифференциацией тарифов на передачу по уровням напряжения, с отдельной оплатой за энергию и за мощность, с оплатой потерь ЭЭ. Отечественная система формирования ТПЭ соответствует общемировым тенденциям, она относительно проста и не использует ряд параметров, применяемых в зарубежных странах: характеристики надежности электроснабжения; суточную и сезонную дифференциацию тарифов; географическую удаленность потребителей; оплату реактивной энергии; оплату обслуживания средств учета ЭЭ. Для обеспечения равенства ТПЭ для потребителей используется котловой принцип их формирования, предусматривающий расчет стоимости услуг на передачу для всех ЭСО субъекта РФ и определение единых ТПЭ для различных категорий потребителей [2]. Система формирования котловых ТПЭ должна быть достаточно простой, что затрудняет создание стимулов повышения эффективности передачи ЭЭ для ЭСО и для потребителей [5].

## II. МЕТОДОЛОГИЯ

### A. Описание технико-экономической модели

Технико-экономическая модель позволяет связать технические и экономические параметры процесса передачи ЭЭ единой системой уравнений. Она позволяет представить процесс передачи ЭЭ в виде двух направленных на графе электрической сети потоков – потоков ЭЭ и потоков стоимости. Технологическая часть модели определяется распределением в схеме сети потоков ЭЭ и позволяет учесть потери ЭЭ в продольных и поперечных элементах схемы замещения. Экономическая часть модели представляется в виде направленных стоимостных потоков на графе электрической сети [6]. Стоимостные потоки определяются затратами ЭСО на обеспечение процесса передачи ЭЭ и включают затраты на содержание электрической сети и затраты на покупку потерь ЭЭ. Направления стоимостных потоков в схеме сети совпадают с направлениями потоков ЭЭ, а распределение стоимостных потоков определяется распределением потоков ЭЭ, так как модель учитывает пути протекания потоков ЭЭ в сети от источников до потребителей и загрузку всего электросетевого оборудования [6]. В результате полную стоимость услуг на передачу ЭСО, которую рассчитывает регулирующий орган, можно распределить между всеми узлами отпуска ЭЭ из сети. Помимо потребителей отпуск ЭЭ из сети осуществляется через точки соприкосновения смежных

ЭСО, которые также оплачивают услуги на передачу ЭЭ по индивидуальным тарифам. Такое распределение полной стоимости услуг на передачу между различными потребителями этой услуги наиболее точно учитывает механизм формирования себестоимости ЭСО на различных участках сети, так как учитывает технологию процесса транспорта ЭЭ и формирование затрат на содержание и компенсацию потерь ЭЭ.

Технико-экономическая модель позволяет произвести распределение на графе (схеме) сети потоков ЭЭ и потоков стоимости, поэтому она была названа модель «энерго-стоимостного распределения» (ЭСР) [6].

Модель ЭСР можно представить в виде двух параллельных процессов. Технологический процесс — это передача ЭЭ по элементам электрической сети от источников до потребителей, а экономический процесс — это передача стоимости в аналогичных направлениях.

### B. Техническая модель передачи

Технологическая модель передачи ЭЭ по электрическим сетям привязана к временным интервалам, на которых осуществляется сбор измерений от систем учета ЭЭ. Тарифы и цены на рынках ЭЭ изменяются с часовой дискретностью, и этот временной интервал в перспективе должен сократиться. Измерительная информация о потоках ЭЭ в сетях энергосистем может приводиться к часовым, суточным, месячным и даже годовым интервалам времени. Так часовые и месячные измерения ЭЭ используются непосредственно для финансовых взаиморасчетов. Измерения ЭЭ на суточных и годовых интервалах могут использоваться для решения внутренних технико-экономических задач ЭСО, в частности, для составления балансов ЭЭ. Годовые измерения интересны для задач перспективного развития и планирования, а также для обоснования ТПЭ.

Для получения общей алгебраической системы уравнений модели ЭСР предварительно представим уравнения, описывающие технический процесс, то есть модель энергораспределения [7]. Основу математической модели процесса энергораспределения образуют уравнения балансов ЭЭ, которые можно записать для всех узлов и всех ветвей схемы замещения электрической сети. Уравнения технического процесса будут записываться в дальнейшем только относительно потоков активной ЭЭ.

Каждое уравнение узлового баланса ЭЭ определяет, что нулю равна сумма потоков ЭЭ  $W_{ij}$  по всем смежным узлу  $i$  ветвям из множества  $\omega_i$ , узлового потока ЭЭ  $W_i$  и технических потерь ЭЭ  $\Delta W_i$  узла  $i$

$$\sum_{j \in \omega_i} W_{ij} + W_i + \Delta W_i = 0, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Вторая группа уравнений относится к балансам ЭЭ в ветвях схемы. Для каждой из  $M$  ветвей сумма потоков ЭЭ в начале ветви  $W_{ij}$ , в конце ветви  $W_{ji}$  и технических потерь ЭЭ  $\Delta W_{ij}$  данной ветви равна нулю

$$W_{ij} + W_{ji} + \Delta W_{ij} = 0, ij = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

### С. Экономическая модель передачи

Экономическая модель передачи ЭЭ по электрическим сетям первоначально предполагает распределение полной стоимости услуг на передачу ЭСО между отдельными элементами схемы. Как и в технологической модели элементами схемы являются узлы, ассоциируемые с электрическими станциями/подстанциями, и ветви, ассоциируемые с линиями электропередачи и трансформаторами. Полная стоимость услуг на передачу включает стоимость услуг на содержание ЭСО  $C_{\Sigma}^c$  и стоимость потерь  $C_{\Sigma}^A$ .

Полная стоимость услуг на содержание ЭСО  $C_{\Sigma}^c$  рассчитывается регулирующим органом на основе нормативных документов и открыто публикуется на каждый календарный год. Полную стоимость содержания целесообразно разделить между всеми  $N$  узлами (подстанциями) и между всеми  $M$  ветвями (линиями электропередачи или трансформаторами) пропорционально количеству условных единиц электрооборудования  $K_i^{ye}$ , относящихся к  $i$ -му элементу сети:

$$C_i^c = (K_i^{ye} / \sum_{i=1}^{N+M} K_i^{ye}) \cdot C_{\Sigma}^c \quad (3)$$

Система условных единиц электрооборудования разработана и повсеместно применяется в электроэнергетике для определения трудоемкости работ по техническому обслуживанию разнородного электрооборудования ЭСО (трансформаторы, линии электропередачи, коммутационное оборудование и т.д.). Условные единицы электротехнического оборудования учитывают затраты труда на выполнение планового технического обслуживания и текущих ремонтов, оперативного обслуживания. Суммарное количество условных единиц в ЭСО (структурном подразделении) является численной характеристикой размеров сетевой организации, позволяющей сравнивать между собой ЭСО. В настоящее время разработана и находится в стадии опытного внедрения новая, усовершенствованная система объемобразующих единиц.

Стоимость потерь ЭЭ определяется величиной фактических потерь ЭСО, умноженной на тариф для компенсации потерь  $T^A$ . Распределение затрат на компенсацию потерь между узлами и ветвями целесообразно произвести пропорционально годовым техническим потерям  $\Delta W_i^{\text{тех}}$  каждого элемента:

$$C_i^A = \Delta W_i^{\text{тех}} \cdot T^A \quad (4)$$

Таким образом, для каждого из  $N$  узлов и для каждой из  $M$  ветвей схемы сети ЭСО можно получить годовую стоимость услуг на передачу, которая связана с данным элементом схемы и которая в дальнейшем будет называться «элементная стоимость услуг на передачу электроэнергии»  $\varepsilon C_i$ .

$$\sum_{i=1}^{N+M} \varepsilon C_i^{\text{год}} = \sum_{i=1}^{N+M} (C_i^c + C_i^A) = C_{\Sigma}^c + C_{\Sigma}^A = C_{\Sigma} \quad (5)$$

Сумма всех элементных стоимостей  $\varepsilon C_i$  определяет полную стоимость услуг на передачу  $C_{\Sigma}$  и она должна совпадать с необходимой валовой выручкой ЭСО,

которую рассчитывает регулирующий орган на год. Если расчетный отрезок времени  $T^{\text{рас}}$  задачи ЭСР не равен продолжительности года  $T^{\text{год}}$ , то элементные стоимости должны приводиться к  $T^{\text{рас}}$

$$\varepsilon C_i = \varepsilon C_i^{\text{год}} \cdot (T^{\text{рас}} / T^{\text{год}}) \quad (6)$$

На следующем этапе задачи ЭСР осуществляется последовательный перенос элементных стоимостей  $\varepsilon C_i$  с предшествующих элементов схемы на последующие в соответствии с физическими направлениями потоков ЭЭ. В результате этого на всех элементах сети формируются новые значения стоимости передачи ЭЭ, названные «потокосые стоимости» узлов  $\vec{C}_i$  и ветвей  $\vec{C}_{ij}$ . Потокосые стоимости каждого элемента схемы включают элементные стоимости всех предшествующих участков сети, использованных для передачи ЭЭ в направлении от источника ЭЭ к месту ее потребления.

Распределение потоков стоимости на схеме электрической сети можно получить при помощи программного пакета Balance4, что и используется в данной работе.

На заключительном этапе ЭСР можно получить оценки тарифов на передачу ЭЭ  $T_{\varepsilon}$  в любой точке схемы сети путем деления потокосой стоимости  $\vec{C}_{\varepsilon}$  на поток ЭЭ в соответствующей точке  $\varepsilon$

$$T_{\varepsilon} = \vec{C}_{\varepsilon} / W_{\varepsilon} \quad (7)$$

Данной величине целесообразно поставить в соответствие термин «точечный тариф на передачу ЭЭ», так как во всех точках сети значения точечных тарифов на передачу ЭЭ будут различаться. Кроме того, значения точечных ТПЭ будут различны в начале и в конце каждого узла и каждой ветви. Точечные ТПЭ в узлах отдачи ЭЭ из сети являются оценкой себестоимости передачи ЭЭ до данных узлов.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа разработанной технико-экономической модели передачи электрической энергии в сетях энергосистем был проведен расчёт тарифов на передачу электроэнергии на примере Сысертского РЭС «Свердловэнерго». Расчёт был проведён на базе программы Balance4 по данным 2015 года. На предварительном этапе была определена стоимость содержания всех элементов схемы электрической сети (линий электропередачи и подстанций), а также стоимость потерь электроэнергии. В результате расчетов по технико-экономической модели для каждой ветви и для каждого узла схемы произведен расчет потоков ЭЭ и потоков стоимости и на основе (7) рассчитаны точечные тарифы на передачу ЭЭ.

В результате расчёта можно видеть, что для значительной части потребителей тариф на передачу ниже, чем котловой тариф для соответствующих узлов присоединения. Также следует отметить, что при высоком потреблении электроэнергии в узле наблюдается значительное снижение тарифа. Так для класса

напряжения ВН (110 кВ) были рассчитаны точечные тарифы на передачу, представленные в таблице I.

Таблица I. Точечные ТПЭ для напряжения ВН

Наименование узла схемы	W, кВт*ч	ТПЭ, руб/кВт*ч	Котловой тариф руб/кВт*ч
Родионовская 2С	11 376 845	0,377	0,354
Походилово 2С	2 629 412	0,559	0,354
Родионовская 1С	2 681 699	0,937	0,354
Колоткино	112 654 153	0,294	0,354
Малахит	54 591 277	0,295	0,354
отп Шпагатная	36 557 777	0,150	0,354

Согласно расчетам, точечные ТПЭ на 110 кВ имеют различия более чем в шесть раз на разных участках схемы. Высокие значения точечных ТПЭ связаны, в первую очередь, с низкой загрузкой близлежащих элементов схемы. Для класса напряжения 35 кВ (СН1) результаты представлены в таблице II.

Таблица II. Точечные ТПЭ для напряжения СН1

Наименование узла схемы	W, кВт*ч	Тариф, руб/кВт*ч	Котловой тариф руб/кВт*ч
Шпагатная Т2 СН	182 381	4,448	0,896
Свобода Т1 СН	3 174	41,799	0,896
Шпагатная Т1 СН	11 628 495	0,261	0,896
Ключи Т2 СН	16 059 328	0,437	0,896

На классе напряжения СН1 (35 кВ) точечных ТПЭ на разных участках сети различаются более чем в 160 раз. При малой нагрузке ПС Свобода ТПЭ поднимается до 41 руб./кВт\*ч. А при потреблении около 10 млн. кВт\*ч за полугодие на присоединениях наблюдается значительное снижение тарифа на передачу электрической энергии.

Таблица III. Точечные ТПЭ для напряжения СН2

Название подстанции	W, кВт*ч	Тариф, руб/кВт*ч	Котловой тариф руб/кВт*ч
Терсутская Т1 НН	1 954 427	2,022	1,383
Седельниково Т1 НН	2 976 491	1,568	1,383
В.Сысерть Т1 НН	4 436 373	1,105	1,383
В.Сысерть Т2 НН	8 304 863	0,910	1,383
Патруши Т2 НН	12 994 428	0,479	1,383
Гидромаш Т1 НН	14 252 038	1,001	1,383
Ключи Т1 НН	15 294 627	0,878	1,383
Кадниковская Т1 НН	15 338 096	0,548	1,383
Кадниковская Т2 НН	18 348 653	0,522	1,383
Свобода Т1 НН	19 363 407	0,662	1,383
Шпагатная Т2 НН	24 490 972	0,462	1,383
Ключи Т2 НН	24 537 731	0,649	1,383
Сысерть Т1 НН	24 587 430	0,960	1,383
Шпагатная Т1 НН	26 013 020	0,402	1,383

По результатам, отображенным в таблице III для класса напряжения 6-10 кВ (СН2), можно судить о том, что тенденция снижения ТПЭ при относительно большом потреблении сохраняется. На большинстве подстанций точечный ТПЭ меньше котлового. Различие здесь лишь в

том, что для некоторых присоединений, ТПЭ становится выше, по причине большого количества присоединений.

#### IV. ВЫВОДЫ

Разработана и апробирована технико-экономическая модель передачи электрической энергии, позволяющая распределить полную стоимость услуг на передачу между узлами отпуска электрической энергии с учетом потерь и степени использования всех элементов сети, что дает оценки индивидуальных тарифов на передачу, пропорциональных затратам сетевой организации. Произведенные расчеты потоков электроэнергии и потоков стоимости на реальном фрагменте электрической сети показали, что точечные (индивидуальные) тарифы на передачу электроэнергии в различных точках потребления могут различаться более чем на порядок. Наиболее высокие тарифы на передачу наблюдаются на участках сети с низкой загрузкой. Модель интересна, прежде всего, электросетевым организациям для получения точечных тарифов на передачу электроэнергии и оценки экономической эффективности электросетевого бизнеса на различных участках сети и в различных режимах работы, а также для обоснования стоимости транзитных перетоков.

#### Список литературы

- [1] Суянов М., Репетюк С., Файн Б., Темная О., Мозговая О., Агафонов Д. Межрегиональная дифференциация тарифов на электрическую энергию в российской федерации // Экономическая политика, 2014, № 1, С. 90-104.
- [2] Бабушкин Г.А., Ильин Р.А. Анализ котлового принципа построения тарифов на современном рынке электроэнергии // Путь науки, 2016, № 1(23), С. 8-10.
- [3] Родин А.В. Зарубежный опыт государственного регулирования тарифной политики на рынках электроэнергии // Проблемы современной экономики (Новосибирск), 2010, № 2-3, С. 313-318.
- [4] ENTSO-E Overview of Transmission Tariffs in Europe: Synthesis 2016 - официальный сайт Европейского сообщества операторов магистральных сетей в области электроэнергетики (ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity) [www.entsoe.eu/Pages/default.aspx](http://www.entsoe.eu/Pages/default.aspx)
- [5] Паздерин А.А., Паздерин А.В. Совершенствование системы тарификации услуг на передачу электрической энергии // Научное обозрение, 2016, № 20, С. 207-213
- [6] Паздерин А.А., Паздерин А.В. Представление процесса передачи электроэнергии направленными потоками электроэнергии и стоимости в схеме сети // Электротехнические системы и комплексы, 2017, №1(34). С. 31-36.
- [7] Pazderin A.V., Kokin S.E., Egorov A.O., Kochneva E.S. Solution of energy flow problem using state estimation technique В сборнике: IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009. Sep. "Proceedings - IECON 2009, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society" sponsors: The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IEEE Industrial Electronics Society (IES), Society of Instrument and Control Engineers (SICE-Japan), University of Porto, Universidade Nova de Lisboa. Porto, 2009. С. 1736-1741
- [8] Бартоломей П.И., Егоров А.О., Машалов Е.В., Паздерин А.В. Решение комплексной задачи распределения электроэнергии в энергосистеме // Электричество. 2007. № 2. С. 8-13.
- [9] Паздерин А.В., Егоров А.О., Кочнева Е.С., Самойленко В.О. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях // Электричество. 2014. № 10. С. 12-21.

# Особенности проектирования синхронных генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок

А.С. Ануфриев, Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Самара, Россия  
E-mail: makarichev2801@mail.ru, yura\_ivannik@mail.ru

*Аннотация* — ветроэнергетика – одна из наиболее перспективных отраслей нетрадиционной энергетики. Автономные ветроэнергетические установки малой мощности находят свое применение в труднодоступных районах. При этом сдерживающим фактором широкого распространения ветроэнергетических установок малой мощности является небольшая выходная мощность при низких скоростях ветра, которая может быть увеличена за счет совершенствования электрогенератора и ветротурбины.

*Ключевые слова* — синхронный генератор ветроэнергетической установки, высококоэрцитивные магниты, магнитная цепь генератора, возобновляемые источники энергии.

## The specialty of low power synchronous generators design for wind-mill

A.S. Anufriev, Yu. A. Makarichev, Yu.N. Ivannikov  
Samara State Technical University  
Samara, Russian Federation  
E-mail: makarichev2801@mail.ru, yura\_ivannik@mail.ru

*Abstract* — the wind power is one of sunrise industry in alternative energy. Stand-alone low power wind-mill is used in remote places. Thereat constraint of ever-growing use low power wind-mill is output capability whilst low wind speed. Output capability can be increase in via updating of generator and wind turbine.

*Keywords* — wind-mill synchronous generator, high-coercivity permanent magnet, magnetic circuit, renewable energy sources.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Автономные ветроэнергетические установки малой мощности совмещают в себе мобильность и экологическую чистоту при выработке электроэнергии, что позволяет им конкурировать с автономными дизельными электростанциями, особенно в труднодоступных районах. Однако основным недостатком ветроэнергетических установок является малая выходная мощность при снижении ветровой нагрузки и полное прекращение генерации электроэнергии во время штиля. Поэтому в большинстве случаев требуется аккумуляция излишков произведенной энергии, а для стабильности выработки электричества также и применения солнечных батарей. Таким образом, для качественной работы ветроэнергетической установки недостаточно только лишь одного ветрогенератора, необходимо, как минимум, аккумуляторные батареи и полупроводниковый преобразователь AC-DC-AC, управляемый контроллером,

которые значительно увеличивают стоимость всей установки. В последние годы активно развиваются технологии производства аккумуляторных батарей, позволяющих значительно повысить емкость, однако их стоимость пока еще остается сравнительно высокой. Кроме того, перспективным направлением совершенствования ветроэнергетической установки является увеличение энергоотдачи за счет оптимизации турбины и генератора.

### II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Зачастую в качестве электромеханического преобразователя в автономных ветроэнергетических установках малой мощности используют синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Использование постоянных магнитов для возбуждения основного магнитного потока позволяет повысить КПД и надежность машины. Расположение постоянных магнитов на роторе существенно влияет на величину и форму

индукции в зазоре и, как следствие, на характеристики машины. В качестве альтернативных вариантов ротора были рассмотрены три конструкции (см. рис. 1): неявнополюсная с магнитами, утопленными в тело магнитопровода (а), явнополюсная конструкция с магнитами, расположенными на поверхности ротора (б) и явнополюсная конструкция с полюсными наконечниками (в). При этом поперечное сечение (объем) постоянных магнитов оставался постоянным.

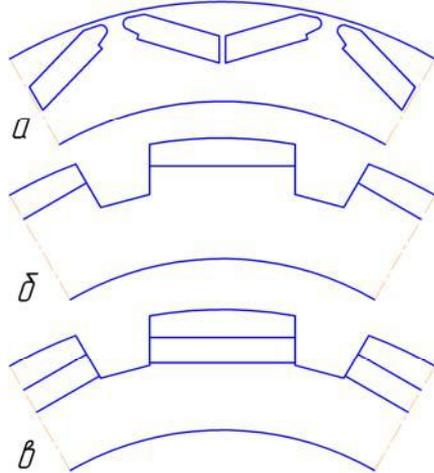


Рис. 1. Конструкции роторов с постоянными магнитами: (а) – неявнополюсная, (б) – явнополюсная с магнитами на поверхности, (в) – явнополюсная с полюсными наконечниками

Моделирование электромагнитной задачи проводилось численными методами в программной среде *Ansys Maxwell*. Для решения задачи в расчетных блоках математической модели, были заданы реальные физические свойства соответствующих материалов, так в качестве магнитопроводов статора и ротора была выбрана электротехническая сталь 2412 и сплав Ne-Fe-B марки N38H – для расчетных блоков постоянных магнитов. Отметим, что магнитная проницаемость постоянных магнитов мала ( $\mu_m = (5 \div 25) \mu_0$ , где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха) [1], следовательно, они обладают большим магнитным сопротивлением.

Из анализа магнитного поля (конструкции (а) и (в) на рис. 1) следует, что соотношение между индуктивными сопротивлениями реакции якоря по продольной ( $x_{ad}$ ) и поперечной ( $x_{aq}$ ) осям имеет характер, противоположный явнополюсному СГ с электромагнитным возбуждением:

$$x_{aq} < x_{ad}. \quad (1)$$

Данное обстоятельство объясняется характером расположения ПМ относительно зазора и их армированием магнитомягкой сталью. Электромагнитная мощность синхронного генератора определяется выражением [1, 2]:

$$P_{эм} = m \frac{E \cdot U}{x_{ad}} \sin \Theta + m \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_{aq}} - \frac{1}{x_{ad}} \right) \cdot \sin 2\Theta. \quad (2)$$

Где  $E$ ,  $U$  – ЭДС и напряжение синхронного генератора,  $\Theta$  – угол сдвига между векторами  $E$  и  $U$ ,  $m$  – число фаз.

Таким образом, анализируя выражения (1) и (2) можно заключить, что электромагнитная мощность синхронного генератора с закладными магнитами и полюсными

наконечниками (рис. 1 а, в) будет несколько ниже при прочих равных условиях.

Конструкция ротора с закладными магнитами (рис. 1 а) характеризуется большим коэффициентом рассеяния по сравнению с явнополюсной конструкцией из-за наличия путей замыкания магнитного потока по стали в обход воздушного зазора. Поэтому магнитная индукция воздушного зазора в такой конструкции ниже  $B = 0,64$  Тл, против  $B = 0,88$  Тл в явнополюсной конструкции.

Пакет программ *Ansys Maxwell* позволяет моделировать электромагнитные процессы электрической машины с подключением внешней цепи, состоящей из электронных примитивов: резисторов, емкостей, диодов и т.д. При моделировании нагрузки ветроэнергетической установки в редакторе внешних цепей была создана электрическая схема, представленная на рис. 2. Индуктивность и электрическое сопротивление обмоток статора синхронного генератора заданы элементами  $L_1$  и  $R_1$  соответственно. Внешняя цепь задавалась сопротивлением  $R_2$  и емкостью  $C_1$ , которые изменялись в широких пределах, кроме того в цепь включены измерительные приборы: амперметр и вольтметр.

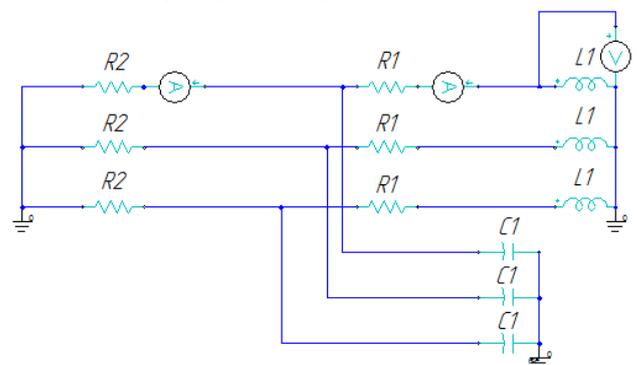


Рис. 2. Внешняя цепь генератора

### III. ВЫВОДЫ

В результате моделирования электромагнитных процессов синхронного генератора ветроэнергетической установки установлено, что с точки зрения отдаваемой мощности наиболее выгодно использование явнополюсной конструкции ротора за счет большего магнитного потока зазора. Конструкция с закладными магнитами отличается более высокой технологичностью и надежностью. Кроме того, изменение емкости конденсаторных батарей во внешней цепи позволяет регулировать выходное напряжение при изменении электромагнитной или ветровой нагрузки за счет намагничивающего действия емкостного тока.

### Список литературы

- [1] Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины: Учеб. Пособие для вузов по спец «Электромеханика»/Под ред. И.П. Копылова. – М.: Высш. Шк., 1990. – 304 с.: ил.
- [2] Пиотровский Л.М. Электрические машины // М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 504 с. – ил.

# Применение накопителей для снижения потерь электроэнергии в линиях электропередачи и в трансформаторном оборудовании распределительных электрических сетей

Ю.П. Гусев, П.В. Субботин  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Москва, Россия  
E-mail: SoobbotinPV@mpei.ru

*Аннотация* — в настоящее время стал актуальным вопрос о применении систем накопления электроэнергии (СНЭ) в качестве дополнительного «активного» элемента распределительных электрических сетей. Установка СНЭ, например, на удаленных трансформаторных подстанциях (ТП), при полном или частичном переносе функций суточного маневрирования на накопитель электроэнергии, позволит выровнять годовой график электрических нагрузок на шинах ТП 10/0,4 кВ и снизить потери электроэнергии в линиях электропередачи и в трансформаторном оборудовании. Дополнительно рассмотрены вопросы по оценке эффективности применения систем накопления электроэнергии на увеличение пропускной способности кабельных линий.

*Ключевые слова* — система накопления электроэнергии; распределительная сеть; линия электропередачи; трансформаторная подстанция; потери электроэнергии

## Application battery energy storage systems for reduce energy losses in electric power transmission lines and transformer equipment of electric power distribution networks

Y.P. Gusev, P.V. Subbotin  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: SoobbotinPV@mpei.ru

*Abstract* — at the present time the question of the battery energy storage systems (BESS) applicability as the additional “active” element of the electric power distribution networks is becoming ever more urgent. For example, the BESS installation at the remote transformer substations (TSS) accompanied by total or partial transfer of the diurnal maneuvering functions to the electrical power storage device shall allow to align the electrical loads annual schedule on the TP 10/0.4 kV tires and to reduce power losses in the power transmission lines and in the transformer equipment. Further discussed the issues to the evaluation of the battery power storage systems application efficiency for increasing the throughout efficiency of cable lines.

*Keywords* — battery energy storage system; electric power distribution network; power transmission line; transformer substation; energy losses

### I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений развития энергосистем является использование систем распределенной генерации (СРГ), в том числе, с использованием возобновляемых источников энергии. И следует отметить, что главной частью этих систем, позволяющей решить большое количество технических проблем совместной работы оборудования в составе СРГ становятся системы накопления электроэнергии (СНЭ) [1, 2].

Кроме того, использование СНЭ, состоящей из обратимого инвертора и аккумуляторной батареи (АБ), может увеличить эффективность использования распределительной сети за счет различных собственных функциональных возможностей: ограничение (или сдвиг

во времени) максимума нагрузки, улучшение показателей качества электроэнергии, регулирование напряжения, частоты и компенсация реактивной мощности в узлах сети [1].

Наиболее интересной и значимой задачей представляется применение СНЭ для снижения потерь электроэнергии в линиях электропередачи (ЛЭП) и в трансформаторном оборудовании распределительных электрических сетей, за счет выравнивания суточного графика электрических нагрузок на шинах ТП.

### II. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНЭ ПО ВЫРАВНИВАНИЮ СУТОЧНОГО ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Выполнив статистический анализ параметров оборудования одного филиала электросетевой компании

города Москвы, имеющего на балансе около 750 ТП 10/0,4 кВ, было выявлено, что наибольшее количество ТП имеют трансформаторы мощностью 630 кВА. Кабельные линии (КЛ) связи центров питания (ЦП) с ТП имеют интервал длин от 50 м до 2,5 км. Сечение существующих проводников от 50 мм<sup>2</sup> до 240 мм<sup>2</sup>.

Таким образом, для рассмотрения усредненных исходных данных, эффективность применения СНЭ для выравнивания графика нагрузок оценивалась для ТП с трансформатором мощностью 630 кВА, связанной с ЦП кабелем марки АСБ-3х120-10 длиной 1,2 км.

Суточный график потребления активной мощности, используемый для моделирования нагрузки на шинах ТП 10/0,4 кВ, заданный в относительных единицах, приведен на рис. 1. Этот график имеет сильно выраженный неравномерный характер.

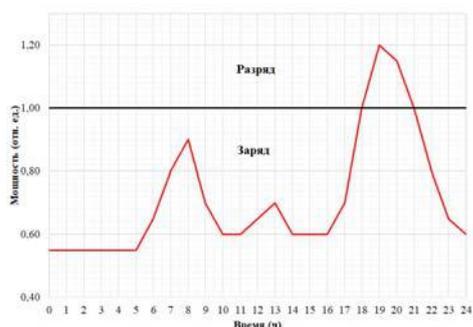


Рис. 1. Суточный график нагрузки на шинах 0,4 кВ ТП в относительных единицах

Исследование выполнялось в среде математического моделирования SimInTech – российской системе модельно-ориентированного проектирования логико-динамических систем.

Номинальные параметры СНЭ выбирались из условия равенства мощности СНЭ разнице между пиковой мощностью графика нагрузки и номинальной нагрузкой на шинах ТП (в относительных единицах – 1). Время работы от АБ, в соответствии с продолжительностью суточного максимума графика нагрузки, принято равным 3 ч. Остальное время в течении суток АБ находится в состоянии заряда методом двухступенчатого заряда при постоянном напряжении.

Результаты расчетов значений электроэнергии, потребляемой из энергосистемы, и энергии, потребляемой нагрузкой ТП, без СНЭ и с учетом установки СНЭ, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние СНЭ на потребление электроэнергии

Параметр	Без СНЭ	Мощность СНЭ 100% пиковой мощности
Суточная энергия, потребляемая из энергосистемы, кВт·ч	10 975,9	11 928,3
Суточная энергия, потребляемая нагрузкой ТП, кВт·ч	10 842,8	
Сумма суточных потерь энергии и энергии заряда СНЭ, кВт·ч	133,1	1 085,5
Суточная энергия от СНЭ, кВт·ч	-	660,6

Изменение суточного графика нагрузки, для описанных выше условий, приведено на рис. 2.

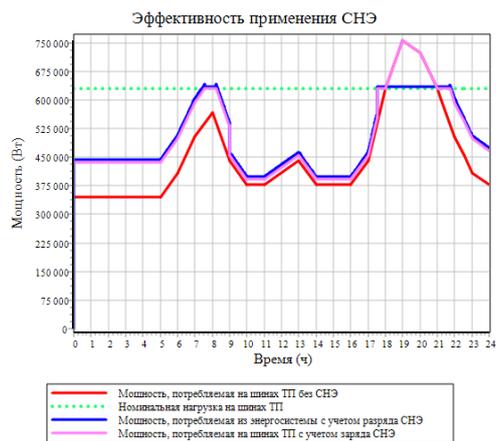


Рис. 2. Характеристика нагрузки на шинах ТП с учетом СНЭ

Как видно из табл. 1, в режиме без СНЭ суммарные суточные потери энергии в ЛЭП и в трансформаторном оборудовании составляют 133,1 кВт·ч. В режиме с учетом установки СНЭ, суточное потребление электроэнергии из энергосистемы увеличивается, к потерям в ЛЭП и трансформаторе добавляются потери энергии в АБ и полупроводниковом преобразователе.

Из рис. 2 видно, что энергии, накапливаемой в СНЭ, равной 660,6 кВт·ч, достаточно для выравнивания пика графика нагрузки.

### III. Выводы

Для усредненного графика нагрузки, применение СНЭ, сумма мощности которого с мощностью трансформатора обеспечивает покрытие пиковый мощности нагрузки, позволяет получить дополнительно 660,6 кВт·ч энергии в течении суток, что почти в пять раз превышает суточные потери энергии в ЛЭП и в трансформаторном оборудовании.

Тем не менее, учитывая полученную энергетическую эффективность аккумуляторной батареи [3], предложенное техническое решение не рентабельно с точки зрения снижения потерь электроэнергии в ЛЭП и в трансформаторном оборудовании.

Однако, СНЭ могут способствовать увеличению пропускной способности существующих кабельных линий и трансформаторов. Установка СНЭ на ТП способна увеличить уровень потребляемой мощности на шинах 0,4 кВ без реконструкции существующей питающей сети 10 кВ.

### Список литературы

- [1] Luciano Cocchi, Marco Di Clerico, Fabio Cazzato, Christian D'Adamo, «Decentralised storage systems for applications on electrical distribution,» в CIGRE, Italy, 2014.
- [2] Hussein Ibrahim, Mariya Dimitrova, Yvan Dutil, Daniel Rousse, Adrian Ilinca, «Wind-Diesel hybrid system: energy storage system selection method,» Innostock, № The 12th International Conference on Energy Storage, 2012.
- [3] ГОСТ Р МЭК 60050-482—2011.

# Гибридный метод краткосрочного прогнозирования электропотребления в условиях оптового рынка электроэнергии

А.С. Грицай<sup>1</sup>, Д.А. Тюньков<sup>1</sup>, Р.Н. Хамитов<sup>1</sup>, Д.Д. Дугин<sup>2</sup>, Г.Э. Синицин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Омский государственный технический университет", Омск, Россия

<sup>2</sup>АО "Омский научно-исследовательский институт приборостроения", Омск, Россия

<sup>3</sup>ООО "Омская энергосбытовая компания", Омск, Россия

e-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

**Аннотация** - в настоящее время в Российской Федерации действует Оптовый рынок электроэнергии и мощности, субъекты рынка – энергосбытовые компании подают заявки Администратору торговой системы на приобретение необходимых объемов электроэнергии на рынке «на сутки вперед». Все фактические отклонения от поданных заявок обеспечиваются балансирующим рынком, где стоимость электроэнергии значительно отличается от рынка «на сутки вперед». Такая специфика работы подталкивает энергосбытовые компании к разработке методов краткосрочного прогнозирования электропотребления. В противном случае энергосбытовая компания может понести значительные финансовые потери. Предложенный гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии основанный на аппроксимации процесса электропотребления, коэффициенты аппроксимации находятся с использованием искусственной нейронной сети.

**Ключевые слова** — прогнозирование электропотребления, гибридный метод, спектральный анализ, синусоидальная функция, нейронные сети, аппроксимация, FRiS – функция.

## Forecast electricity load via hybrid method on the Russia electricity market

A.S. Gritsay<sup>1</sup>, D.A. Tunkov<sup>1</sup>, R.N. Khamitov<sup>1</sup>, D.D. Dugin<sup>2</sup>, G.E. Sinitcin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University", Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Omsk Scientific Research Institute of Instrument Making", OJSC, Omsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Omsk State Electricity Sale Company", LLC, Omsk, Russian Federation

e-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com

**Abstract** - currently, the Russian Federation operates the Electricity Market, market entities - energy sales companies, and submit applications to the Administrator of the trading system to purchase the required volumes of electricity on the day-ahead market. All actual deviations from the filed applications are provided by the balancing market, where the cost of electricity differs significantly from the "one day ahead" market. This specific nature of the work pushes the energy sales companies to develop methods for short-term forecasting of power consumption. Otherwise, the power sales company may suffer significant financial losses. The proposed hybrid method of short-term forecasting of electric energy consumption based on the approximation of the process of power consumption, the approximation coefficients are found using an artificial neural network.

**Keywords** – forecast electricity load, hybrid method of forecast electricity, sine function, neural network, approximation, FRiS-function.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известно большое количество методов краткосрочного прогнозирования электропотребления. Все они могут быть классифицированы по типу в виде графа [1]. Статистические методы использовались энергосбытовыми компаниями на начальном этапе работы Оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ). К основному преимуществу этих методов относится их простота применения [2], а к недостаткам то, что они, на сегодняшний день, не способны обеспечить требуемую точность прогноза. Группа «структурные модели» объединяет в себе различные методы со «сложной информационной структурой», в том числе интеллектуальные методы, основанные на аппарате искусственных нейронных сетей [3]. Такие методы на сегодняшний день еще способны обеспечить требуемую рынок ОРЭМ точность. Однако, основной недостаток таких методов заключается в том, что они не учитывают физические особенности процесса потребления

электрической энергии. Наиболее развивающейся группой методов краткосрочного прогнозирования электропотребления являются гибридные методы, которые за счет синергетического эффекта при объединении различных «по структуре» методов способны обеспечить наивысшую точность прогноза электропотребления [4].

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как правило, энергосбытовые компании, при построении краткосрочного прогноза электропотребления, оперирует данными по точкам поставки, полученных с помощью сертифицированных систем телемеханики оперативно-измерительного комплекса АО «СО-ЕЭС». Основной актуальной проблемой энергосбытовых предприятий является то, что при правильной структуре организации хранения данных в биллинговой системе [5] данные точек поставки не связаны с конкретными фидерами, от которых

запитываются те или иные клиенты, что усложняет осуществления процесса прогнозирования «по типу потребителей».

В связи с чем остается вариант прогнозирования, связанный с построением прогноза по имеющимся суммарным данным объемов потребления электроэнергии. Для поиска возможных зависимостей был проведен спектральный анализ процесса потребления электрической энергии с использованием апостериорных рядов по электропотреблению с 2011 по 2015 годы ООО «Омская энергосбытовая компания», и получены периодограммы [6], представленные в Таблице 1.

Таблица 1. Данные периодограммы

Частота, Гц	Период, час	Периодограмма
0,000122	8192,000	3,481567E+14
0,000107	9362,286	3,216944E+14
0,041672	23,997	7,054145E+14
0,041656	24,006	1,420106E+13
0,083328	12,001	4,042969E+13
0,083344	11,999	2,252386E+13

На рисунке 1 представлены данные периодограмм в графическом виде. Из представленных данных в таблице 1 следует, что имеются значимые циклические компоненты – годовая, 24-часовая и 12 часовая, а это значит, что они должны быть учтены при разработке метода краткосрочного прогнозирования электропотребления.

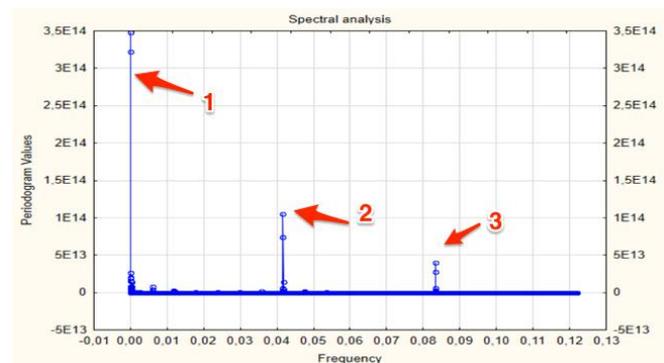


Рисунок 1. Полученные периодограммы (1 – годовая, 2 – 24-часовая, 3 – 12-часовая циклические компоненты)

Для программной реализации метода краткосрочного прогнозирования электропотребления были разработаны требования [7], с учетом специфики деятельности энергосбытовых предприятий на ОРЭМ.

### III. ТЕОРИЯ

Рассматривая суточный график электропотребления ООО «Омская энеросбытовая компания», представленный на рисунке 2, была выдвинута гипотеза о том, что он может быть аппроксимирован с использованием синусоидальной функции, а точнее – двух функций (отдельно для дневного и ночного циклов электропотребления).

Уравнение синусоидальной функции может быть представлено как

$$y = A \cdot \sin(kx + b) + D \quad (1)$$

где  $y$  – расчетное значение электропотребления, МВт·ч.;  $x$  – час суток;  $k$  – частота;  $b$  – фаза;

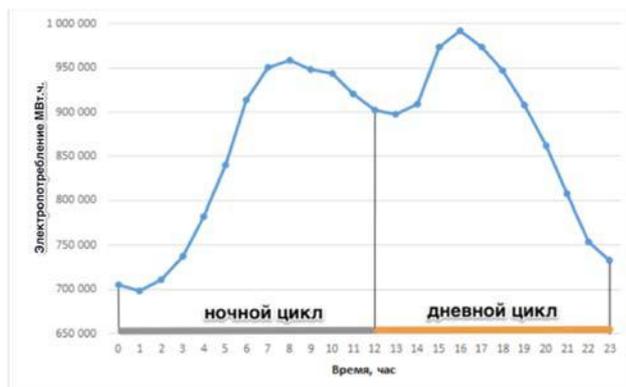


Рисунок 2. Суточный график электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания».

Для осуществления аппроксимации коэффициенты  $A$  и  $D$  были найдены следующим образом:

$$A = \frac{\max(\text{ЭП}) - \min(\text{ЭП})}{2}; D = \frac{\max(\text{ЭП}) + \min(\text{ЭП})}{2} \quad (2)$$

Коэффициенты  $k$  и  $b$  были найдены методом наименьших квадратов. Они приняли значения, представленные в Таблице №2.

Таблица 2. Рассчитанные значения параметров  $k$  и  $b$

Коэффициент	Ночной цикл	Дневной цикл
$k$	0.4	0.44
$b$	4.4	0.8

На рисунке 3 представлен полученный результат аппроксимации. Из графика, представленного на рисунке 3 следует, что при наложении синусоид дневного и ночного циклов потребления электрической энергии имеется значительное расхождение аппроксимированных и фактических значений. В связи с чем было проведено исследование различных методов аппроксимации точек соединения синусоидальных функций [8] и выбран метод, на основе полинома третьей степени. Полученный результат представлен на рисунке 4.

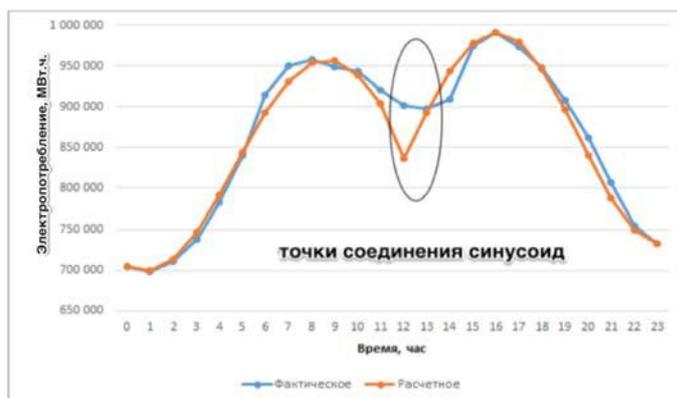


Рисунок 3. Суточный график электропотребления ООО «ОЭК» аппроксимированный синусоидальной функцией.

Представленный способ аппроксимации обеспечил среднюю ошибку на годовом интервале в размере 4,16 % на примере апостериорных рядов ООО «Омская энергосбытовая компания». Он может быть представлен следующей системой уравнений:

$$y = A \cdot \sin(0.4x + 0.44) + 723, x \in [0; 10];$$

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d, x \in [11; 12](3)$$

$$y = A \cdot \sin(4.4x + 0.8) + 1025, x \in [13; 23], \text{ где}$$

$x$  – часовой интервал времени (от 0 до 23). При нахождении коэффициентов полинома третьей степени использовался метод наименьших квадратов. Гипотеза была доказана. Для осуществления краткосрочного прогноза электропотребления необходимо продлить ретроспективный ряд данных электропотребления на интервал 24 часа вперед.

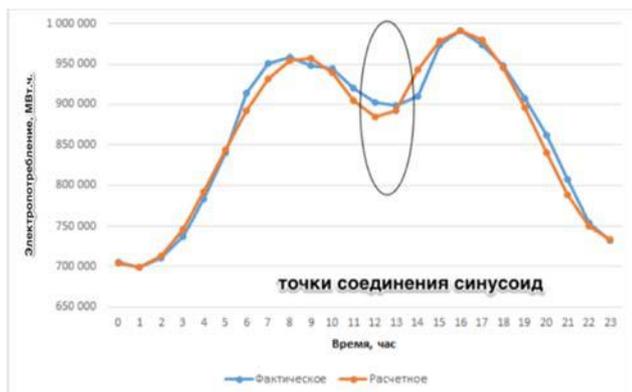


Рисунок 4. График электропотребления, точки соединения синусоид аппроксимированы полиномом 3-ей степени

Для этого, необходимо найти коэффициенты аппроксимирующих функций  $A$  и  $D$  отдельно для дневного и ночного циклов, поскольку коэффициенты  $k$  и  $v$  приняли постоянные значения. Была выдвинута вторая гипотеза о том, что на значения коэффициентов аппроксимирующей функции  $A$  и  $D$  влияют параметры, непосредственно влияющие на процесс электропотребления. Тогда зависимость коэффициента  $A(t)$  во времени может быть представлена функцией от следующих переменных:

$$A(t) = \{A, C, V_{avg}, t, T_{avg}, h\}, \text{ где (4)}$$

$C$  – цикл электропотребления (0 – ночной, 1 – дневной);  $T_{avg}$  – среднесуточная температура окружающего воздуха, °C;  $h$  – признак, указывающий на тип дня (при  $h=0$  – рабочий день, при  $h=1$  – выходной день),  $t$  – часовой интервал времени (от 0 до 23 часов).

Для нахождения значения коэффициентов  $A$  на ночном и дневном интервале было решено использовать искусственную нейронную сеть. Была сформирована обучающая выборка  $S$ :

$$S = 30M_{t1} * 24 + 30M_{t2} * 24, \text{ где (5)}$$

$M_{t1}$  – выборка из 30 дней до прогнозного дня в текущем году,  $M_{t2}$  – выборка из 30 после прогнозного дня, включая прогнозные дни, но за прошлый год. Суточный шаг дискретизации = 24 часа.

К полученной обучающей выборке была применена FRiS – функция, разработанная в Институте математики Сибирского отделения наук РАН профессором Загоруйко Н.Г. [9]. Она позволяет строить эффективные решающие правила по определению принадлежности неидентифицированных объектов к классам. С ее использованием были удалены возможные аномальные значения и «выбросы».

Было выполнено преобразование температуры окружающего воздуха с учетом ветро-холодового индекса [10] по формуле

$$WCT = 33 + (0,78 + 0,237 * \sqrt{v}) * (T - 33), \text{ где (6)}$$

$v$  – скорость ветра, м/с;  $T$  – температура окружающего воздуха, °C.

При проверке достоверности представленной модели, было определено, что ветро-холодовой индекс целесообразно применять при температуре окружающего воздуха  $< -21$  °C, а скорости ветра более или равна 2 м/с. Для осуществления прогноза использовалась искусственная нейронная сеть. Количество входных нейронов соответствовало количеству признаков в сформированной выборке, внутренний слой сети имел меньшее на одну единицу количество нейронов. Выходной слой состоял из одного нейрона. Нейроны были соединены полносвязно, использовалась функция активации нейронов – сигмоид. Критерии и описание искусственной нейронной сети представлено в патенте на устройство прогнозирования на основе многослойной нейронной сети [11]. Полученный результат прогноза представлен на Рисунке 5.

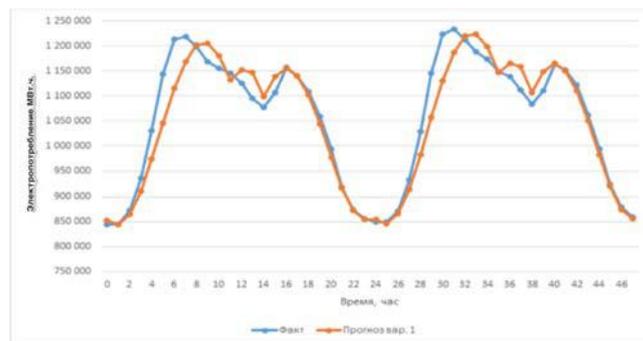


Рисунок 5. Прогнозный (синий) и фактический (красный) графики, 48 ч.

По данным графика из рисунка 5 следует, что имеются некоторые остаточные значения между прогнозными и фактическими значениями. Остаточные значения были найдены следующим образом:

$$d_t = V_{fact} - V_{forecast}, \text{ где (7)}$$

$d_t$  – разность между фактическими  $V_{fact}$  и прогнозными  $V_{forecast}$  – прогнозными объемами электропотребления, МВт·ч. Над остатками был реализован прогноз аналогичным образом с использованием аппарата искусственной нейронной сети [12].

Остаточное значение  $d_{result}(t)$  может быть представлено функцией от следующих переменных:

$$d_{result}(t) = \{C, t, d_t, T_{avg}, h\}, \text{ где (8)}$$

Процедура формирования обучающей выборки для искусственной нейронной сети повторяется аналогичным образом. Осуществляется прогноз остаточных значений, итоговые результаты с учетом остаточных значений, представлены на рисунке 6.

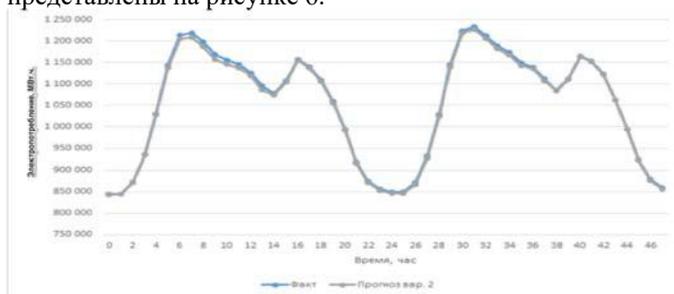


Рисунок 6. Итоговый прогноз, 48 ч.

Из рисунка 6 следует, что прогнозный график повторяет форму фактического графика.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В таблице 3 представлены результаты сравнения, разработанного гибридного метода и метода, основанного на аппарате искусственной нейронной сети, который выступал в роли прототипа разработанного гибридного метода.

Таблица 3. Точность методов на интервале с 01.01.2016 по 31.12.2016

№	Тип метода	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	Нейронная сеть	2.80%	2.45%	2.37%	2.32%
2	Гибридный метод	2.36%	1.82%	1.69%	<b>1.49%</b>

Для сравнения были исследованы различные варианты использования метода прогнозирования электропотребления с набором различных входных параметров. Вариант 1 – день недели, час суток, тип дня. Вариант 2 – день недели, час суток, тип дня, температура окружающего воздуха. Вариант 3 – день недели, час суток, тип дня, температура окружающего воздуха, ветро-холодовой индекс. Вариант 4 – день недели, час суток, тип дня, температура окружающего воздуха, ветро-холодовой индекс, FRiS – Stolp.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было разработано программное обеспечение [13-17] реализующее гибридный метод краткосрочного прогнозирования электропотребления с использованием аналитической системы Rapidminer [18].

Разработанный гибридный метод [19] краткосрочного прогноза обеспечил неопределенность, характеризующую среднюю ошибку прогноза, на примере ООО «Омская энергосбытовая компания» в размере 1,49% на годовом интервале.

#### Список литературы

[1] Грицай А.С., Тюньков Д.А. Классификация методов краткосрочного прогнозирования электропотребления для субъектов ОРЭМ. // Актуальные вопросы энергетики: материала Всерос. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. – Омск: ОмГТУ, 2016. – С. 41–45.

[2] Манусов В.З., Бирюков Е.В. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 309. – № 6. – С. 153 – 158.

[3] Потапов В.И., Грицай А.С., Тюньков Д. А Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 8. – С. 44 – 51.

[4] Грицай А.С., Тюньков Д. А. Классификация методов краткосрочного прогнозирования электропотребления для субъектов ОРЭМ // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всерос. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. – Омск, 2016. – С. 41–45.

[5] Грицай А.С. Особенности построения биллинговой системы для энергосбытовой компании с целью обеспечения максимальной точности прогнозирования // Динамика систем, механизмов, машин: тез. докл. VII Междунар. научн.-техн. конф. – Омск, 2009. – С. 250–254.

[6] Спектральный анализ ретроспективных данных об электропотреблении / Грицай А.С. Потапов В.И., Тюньков Д.А. // Омский научный вестник – 2016. – №6.(149) – С.74 – 76.

[7] Хамитов Р.Н., Грицай А.С., Тюньков Д.А. О критериях оценки качества программной реализации моделей краткосрочного прогнозирования электропотребления // Вестник сибирского отделения академии военных наук Российской Федерации. – 2016. – №41. – С. 95–98

[8] Хамитов Р.Н., Червенчук И.В., Грицай А.С., Синицин Г.Э. Исследование методов аппроксимации для решения задачи краткосрочного прогнозирования суточного электропотребления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – №4(52). – С.91–98.

[9] Загоруйко, Н.Г. Когнитивный анализ данных / Н. Г. Загоруйко. – Новосибирск : Академическое издательство ГЕО, 2013. – 186 с.

[10] Пичугина, Н.Ю., Воронина Л. В. Оценка биоклиматических условий Новосибирской области // ГЕО-Сибирь-2010 : сб. материалов VI Междунар. науч. конф., 19-29 апр. – Новосибирск, 2010. –Т. 4. Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология. – С. 124–128.

[11] Устройство прогнозирования электропотребления на основе многослойной нейронной сети. Пат. RU №169425, МПК G06Q 10/06(2012.01); Заявитель ОмГТУ; №2016145339. Заявл. 18.11.2016; Опубл. 16.03.2017, Бюл. № 8. – 1 с.:ил.

[12] Хамитов Р.Н., Грицай А.С., Тюньков В.А., Синицин Г.Э. Краткосрочное прогнозирование электропотребления на сутки вперед для энергосбытовой компании методом аппроксимации // Промышленная энергетика. – 2017. – №3. – С. 2–8.

[13] Программа краткосрочного прогнозирования электропотребления для субъекта оптового рынка электроэнергии и мощности энергосбытовой компании с использованием аппарата искусственной нейронной сети : свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22122 от 1 сентября 2016 г. / А. С. Грицай, Р. Н. Хамитов, Д. А. Тюньков. – М. : ОФЭРНиО, 2016

[14] Программа нахождения оптимального алгоритма аппроксимации точки соединения синусоид, описывающих дневной и ночной циклы электропотребления : свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22229 от 25 октября 2016 г. / А. С. Грицай, Р. Н. Хамитов, Д. Д. Дугин. – М. : ОФЭРНиО, 2016.

[15] Программа прогнозирования электропотребления в режиме на сутки вперед с использованием нейронной сети с учетом ветро-холодового индекса / Грицай А.С., Потапов В.И., Дугин Д.Д. // М.: ГАНУ ЦИТИС, 2016. – Государственная регистрация № 50201650266 от 24 июня 2016г.

[16] Программа формирования обучающей выборки с использованием функции FRiS- Stolp : свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22514 от 18 апреля 2017 г. / А. С. Грицай, Р. Н. Хамитов, Д.Д. Дугин – М. : ОФЭРНиО, 2017.

[17] Программа аппроксимации графика электропотребления функцией синуса и нахождения коэффициентов функции аппроксимации : свидетельство о регистрации электронного ресурса № 22123 от 1 сентября 2016 г. / А. С. Грицай, Р. Н. Хамитов, Д. А. Тюньков. – М. : ОФЭРНиО, 2016. – 50201650401.

[18] Грицай А.С., Костин Н.С.Расширение аналитической платформы Rapidminer для построения прогнозных моделей ОРЭМ (тезисы доклада научной конференции) // Информатика, вычислительные машины, комплексы, системы и сети: тез. докл. Межвуз. научн.-техн. конф.- Омск, 2014.– С. 125–129

[19] Грицай А.С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для энергосбытового предприятия с учетом метеофакторов: дис. Канд. Техн. наук: 05.09.03 // Грицай Александр Сергеевич. – Омск., 2017. – 136 с.

[20] Грицай А.С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для энергосбытового предприятия с учетом метеофакторов: автореф. Диссертации канд. техн. наук. Омск. гос. техн. университет, Омск, 2017.– 19 с.

# Локальные системы автоматического управления распределенной генерацией

В.И. Пантелеев, С.С. Труфакин  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»  
Красноярск, Россия  
E-mail: trufakin.sergey@mail.ru

*Аннотация* — В настоящее время наблюдается повышенный интерес к развитию энергетических систем с распределенной генерацией (РГ). Остро встает вопрос о повышении эффективности таких энергетических систем. В этих условиях актуальными направлениями стали: особые схемно-режимные мероприятия при подключении объектов РГ к распределительным сетям и развитие систем автоматического управления. Рассматривая развитие систем автоматического управления выделим развитие локальных систем автоматического управления распределенной генерацией и координационные системы автоматического управления энергорайонами с распределенной генерацией. При этом необходимыми во многих странах при подключении распределенной генерацией в сеть системами автоматического управления являются локальные системы.

*Ключевые слова* — *распределенная генерация, системы управления*

## Local systems for automatic control of distributed generation

V.I. Panteleev, S.S. Trufakin  
Siberian Federal University  
Krasnoyarsk, Russia  
E-mail: trufakin.sergey@mail.ru

*Abstract*— At present, there is an increased interest in the development of energy systems with distributed generation (RG). There is an urgent need to improve the efficiency of such energy systems. In these conditions, the most important areas were: special circuit-mode measures when connecting the objects of the WG to distribution networks and the development of automatic control systems. Considering the development of automatic control systems, we will highlight the development of local systems for automatic control of distributed generation and coordination systems for automatic control of power districts with distributed generation. In this case, local systems are necessary in many countries when distributed distribution is distributed to the network by automatic control systems.

*Key words: distributed generation, control systems*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Мировые тенденции развития электроэнергетики многих развитых стран характеризуются интенсивным ростом объемов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и, в целом, объектов «распределенной генерации» (РГ). Объекты все более и более масштабно начинают работать в составе энергосистем.

Анализ нормативно-технической документации (НТД) показывает, что к РГ принято относить энергоустановки, подключенные к распределительной сети на среднем или низком напряжении. По типу их можно разделить на объекты на базе ВИЭ (ветроэнергетические установки, фотоэлектрические установки, малые ГЭС, геотермальные станции и др.). Все чаще находят применение установки комбинированного производства тепла и иногда холода.

Мировой опыт развития распределенной энергетики показывает необходимость в реорганизации нормативно технической базы распределительных сетей и техническом перевооружении оборудования подстанций распределительных сетей при подключении к ним источников энергии. В свою очередь техническое перевооружение может идти как за счет средств сетевых компаний, так и за счет средств подключаемой РГ. В разных странах этот процесс индивидуален: где-то РГ при подключении проводит необходимую реконструкцию или модернизацию оборудования в месте подключения, а где-то и оборудования других подстанций, режим которого изменился в связи с подключением РГ. В одном технические требования сетевых компаний и национальные регламенты разных стран схожи: в требованиях по наличию локальных автоматических устройств при подключении распределенной генерации.

В статье рассмотрим основные локальные системы автоматического управления режимами распределенной генерации и требования к ним, наличие которых требуется при подключении в энергосистемах Дании и США.

## II. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Системы регулирования напряжения и реактивной мощности должны иметь несколько режимов работы:

- поддержание определенного уровня напряжения в точке подключения;

- поддержание определенного  $\cos\phi$  или определенного уровня генерации реактивной мощности.

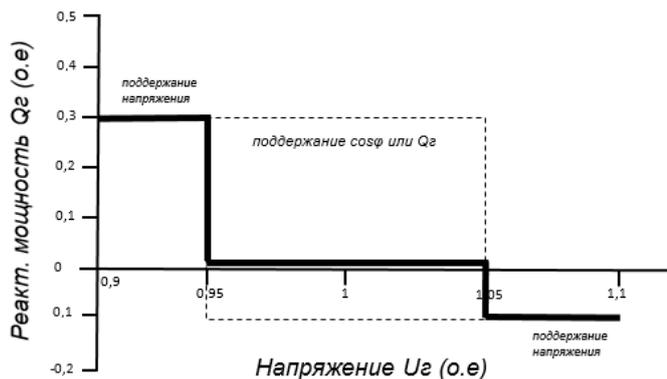


Рис. 1. Пример настройки регулятора напряжения (комбинированный режим)

Кроме того система регулирования должна быть настроена так, чтобы РГ выдерживали снижения напряжения (типовой график изображен на рис. 2), и обеспечивали выдачу реактивной мощности (типовой график изображен на рис. 3), без отключения от сети. (Технические требования Дании)

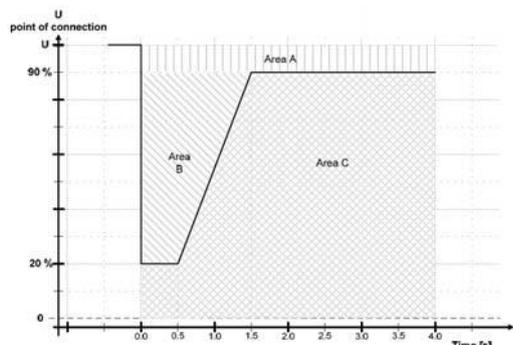


Рис. 2. Зоны допустимых снижений напряжения

Зона А: РГ должны оставаться подключенными к сети и поддерживать нормальную выработку;

Зона В: РГ должны оставаться подключенными к сети. ВЭС должны обеспечить выдачу реактивной мощности в соответствии с рис. 3;

Зона С: РГ должны обеспечить выдачу реактивной мощности в соответствии с рис. 3. Допускается отключение от сети.

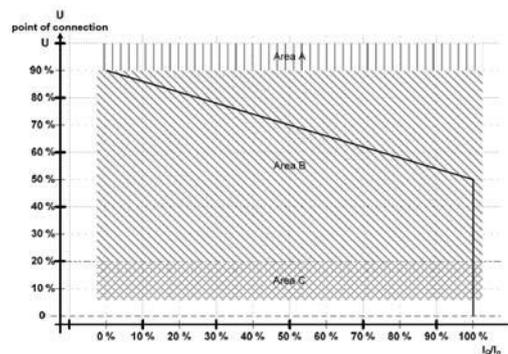


Рис. 3. Требования к генерации реактивной мощности

При этом если напряжение вернулось в зону А, то следующие снижения напряжения рассматриваются как новые.

В зонах В и С допускается снижение выдачи активной мощности при увеличении выдачи реактивной.

## III. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И ГЕНЕРАЦИИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрим требования к генерации активной мощности при возникновении различных условий по частоте в сети. Для примера используем технические требования Дании.

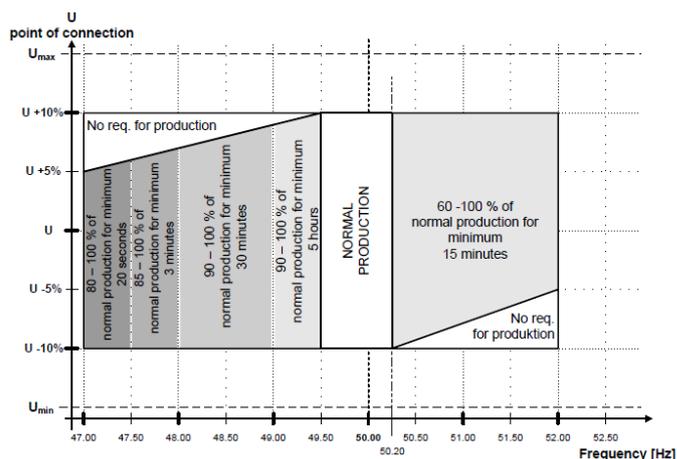


Рис. 4. Требования по выдаче активной мощности для РГ 25 – 1500 кВт.

- Если частота 50,2 – 52 Гц и напряжение не ниже  $-5\% U_n$ , то РГ должны вырабатывать мощность в диапазоне 60-100 % в течении 15 минут минимум;

- Если частота 49 – 49,5 Гц, то РГ должны вырабатывать мощность в диапазоне 90-100 % в течении 5 часов минимум;

- Если частота 48 – 49 Гц, то РГ должны вырабатывать мощность в диапазоне 90-100 % в течении 30 минут минимум;

- Если частота 47,5 – 48 Гц, то РГ должны вырабатывать мощность в диапазоне 85-100 % в течении 3 минут минимум;

- Если частота 47 – 47,5 Гц, то РГ должны вырабатывать мощность в диапазоне 80-100 % в течении 20 секунд минимум;

*Регулирование частоты.*

Настройка регуляторов должна производиться по типовому графику, изображенному на рис. 5.

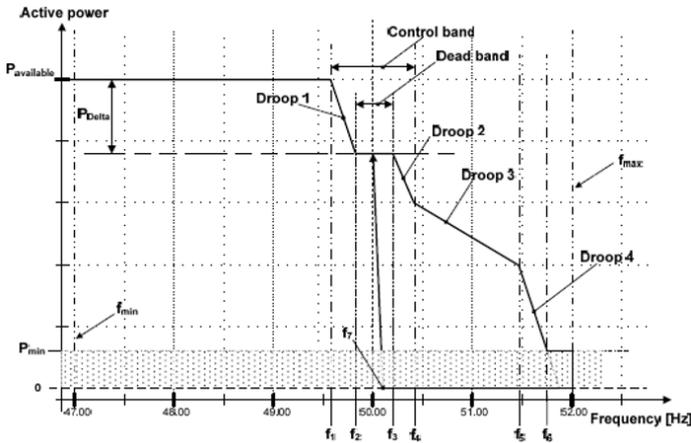


Рис. 5. Типовой график настройки регуляторов частоты

Точки  $f_2$  и  $f_3$  формируют зону нечувствительности (Dead band);

Точки  $f_1$  и  $f_6$  являются предельными с точки зрения управления выработкой активной мощности, при достижении этих точек выработка изменяется до максимальной или минимальной соответственно.

Остальные точки являются промежуточными между которыми у регулятора есть различный статизм.

Кроме того, при выделении на изолированную работу источник РГ должен переходить к астатической характеристике регулирования и поддерживать номинальную частоту с учетом зоны нечувствительности ( $f_2$  и  $f_3$  на рис. 5).

Также сетевая компания может дополнительно ограничить максимально возможную генерацию активной мощности:

Абсолютное ограничение выработки (Absolute production constraint) - дополнительная функция ограничения выработки активной мощности для предотвращения перегруза сетевого оборудования с учетом переконфигурации сети до предопределенного значения.

Относительное ограничение выработки (Delta production constraint) - дополнительная функция ограничения выработки активной мощности создания резерва мощности в целях его использования для регулирования частоты.

Ограничение скорости изменения мощности (Power gradient constraint) - дополнительная функция ограничения скорости изменения мощности для предотвращения резких колебаний перетоков в распределительных сетях (актуально для электростанций с непредсказуемым источником энергии РГ)

#### IV. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОЛИРОВАННОЙ РАБОТЫ

Обобщая требования к системам идентификации изолированной работы (islanding detection), отметим требование к наличию такой автоматической системы и требование к эффективности ее работы: все возможные

расчетные случаи выделения на изолированную работу должны быть идентифицированы.

В зависимости от структуры сети, характера потребления и места подключения РГ должны применяться различные технологии идентификации. Рассматривая только локальные технологии идентификации, выделим пассивные и активные технологии:

Пассивные технологии – идентифицируют изолированный режим только путем измерения электрических параметров в месте подключения.

Активные технологии – создают некоторые возмущения в месте подключения и идентифицируют изолированный режим, наблюдая за протеканием изменений электрических параметров.

Кратко опишем основные применяемые технологии идентификации изолированного режима

##### Пассивные технологии

*Идентификация по выходу напряжению и частоты за определенные пределы*

Технология основана на предварительном определении возможных режимных условий в месте подключения РГ. Рассмотрим схему подключения РГ, изображенную на рис. 6.

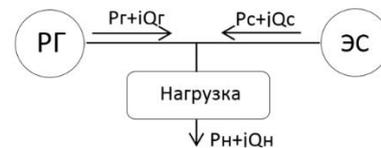


Рис. 6. Схема подключения распределенной генерации

При  $P_r = P_n$  и  $Q_r = Q_n$  перетока мощности из сети не будет, но в обратных случаях переток будет и отключение от сети произойдет с изменением параметров напряжения и частоты.

При  $P_n > P_r$  и  $Q_n > Q_r$  переток из сети будет положительным и отключение от сети произойдет с резким снижением напряжения и снижением частоты. В обратном соотношении мощностей отключение произойдет с резким повышением напряжения и повышением частоты. При разнонаправленных перетоках активной и реактивной мощности ситуация усложняется, но в заключении после определенных расчетов серии режимов можно определить предельные значения напряжений и частоты и скорости их изменения, при которых происходит выделение на изолированную работу. Представить это можно с помощью диаграммы изменения активной и реактивной мощностей.

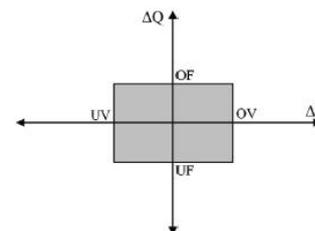


Рис. 7. Диаграмма характеристики изменений параметров для определения режима изолированной работы.

Темная зона нечувствительности (NDZ) соответствует режиму параллельной работы, остальная зона режиму изолированной работы. Основным недостатком является то, что такая технология не способна определить выделение при относительно малых перетоках из сети.

#### *Идентификация по изменению угла между напряжением и током (Phase jump detection)*

Для инверторного подключения в сеть разность фаз отсутствует, так как инвертор постоянно синхронизирует фазы. На рис. 8 изображен «скачок напряжения» при выделении на изолированную работу и дальнейшая ошибка фаз между напряжением и током.

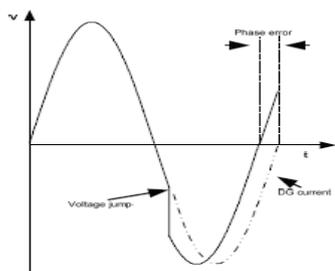


Рис. 8. График изменения напряжения при выделении на изолированную работу

#### *Идентификация по гармоникам тока и напряжения*

Этот метод используется в основном при инверторном подключении. Необходимо определить коэффициент гармонических искажений (КГИ, THD<sub>V</sub>). В нормальном режиме, когда инвертор подключен к сети из-за малого сопротивления сети этот коэффициент будет минимальным или близки к нулю. При выделении на изолированную работу коэффициент будет увеличиваться, так как сопротивление нагрузки гораздо меньше сопротивления сети и гармоники генерируемые инвертором станут большими.

Достоинством является независимость от количества работающих инверторов в сети, но при нелинейной нагрузке или слабых связях с сетью могут быть большие пороговые коэффициенты КГИ.

#### *Активные технологии*

В связи с многообразием активных технологий, рассмотрим только некоторые из них.

#### *Идентификация по изменению сопротивления*

Если рассматривать инверторное подключение, то принцип заключается в генерации добавочного импульса тока к основному и наблюдение за изменением напряжения. При этом рассчитывая значение  $dv/di$ , получим изменение внешнего сопротивления. При относительно высоких значениях которого, можно идентифицировать выделение на изолированную работу. Если рассматривать подключение генератора через трансформатор, то необходим дополнительный генератор импульсов. Мощность генератора импульсов зависит от конкретных условий.

#### *Измерение сопротивления при генерации определенной гармоники*

Метод основан на генерации определенной гармоники тока и отслеживание этой же гармоники в напряжении. Если генератор работает параллельно с сетью, то гармоника тока не отразится на напряжении в месте подключения, а «уйдет» в сеть, и наоборот, если генератор выделится на изолированную работу появится генерируемая гармоника в напряжении и ее можно идентифицировать.

Если рассматривать подключение генератора через трансформатор, то необходим дополнительный генератор импульсов.

#### *Скольльзящий режим сдвига частоты (SMS)*

Метод основан на генерации тока близкой к номинальной частоте с постоянным ее изменением и наблюдение за изменением частоты или фазы напряжения в точке подключения.

Если генератор работает параллельно с сетью, то частота и фаза будет стабильной, и наоборот, если произошло выделение на изолированную работу, то частота будет повторять частоту генератора, а фаза будет изменяться как функция от частоты

#### *Идентификация при изменении активной и реактивной мощности*

Основан на изменении активной и реактивной мощностей генератора в небольшом коридоре и отслеживании изменений напряжения в точке подключения.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные типы локальных систем управления распределенными источниками энергии: система регулирования напряжения и реактивной мощности, система регулирования частоты и генерации активной мощности и система идентификации изолированного режима работы. Также обобщены технические требования к этим системам на основе анализа нормативно-технической документации энергосистем США и Дании.

Представленный анализ ставит задачу более детальной разработки локальных систем управления распределенной генерацией с учетом накопленного зарубежного опыта и особенностей отечественных распределительных электрических сетей.

## Список литературы

- [1] Technical regulation 3.2.5 for wind power plants with a power output greater than 11 kW. Energinet.DK
- [2] D.N.Gaonkar. Distributed Generation. In-Tech 2010
- [3] IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE Standards Coordinating Committee 21
- [4] Кучеров Ю.Н., Березовский П.К., Веселов Ф.В., Илюшин П.В. Анализ общих требований к распределенным источникам энергии при их интеграции в энергосистему, Электрические станции 2016 №3, с.2-10

# Отбор мощности от фазного провода воздушной линии электропередачи

Д.С. Левин, С.В. Прокопченко  
Филиал АО «СО ЕЭС» «Ленинградское РДУ»,  
Санкт-Петербург, Россия.  
E-mail: levinsgtu@mail.ru

**Аннотация** — В данной статье рассматривается возможность осуществления питания постов систем контроля гололедообразования, расположенных на воздушных линиях электропередачи, путем отбора части мощности от фазного провода линии. Специализированный трансформатор тока совместно с преобразовательным блоком устанавливается на провод линии и выполняет преобразование и накопление части электроэнергии передаваемой по проводу линии с осуществлением питания поста контроля гололеда. Рассмотрены способы стабилизации полученного выходного напряжения с последующим анализом эффективности и целесообразности их применения. Определены возможные пути расширения функциональных возможностей постов телеметрии за счет расположения непосредственно на фазном проводе контролируемой линии, что позволяет локально контролировать температуру провода.

**Ключевые слова:** Устройство отбора мощности, система мониторинга гололедно-изморозевых отложений, трансформатор тока, воздушная линия электропередачи.

## Power supply from phase conductor of overhead power line

D. Levin., S Prokopchenko  
Filial «SO UPS» «LenRDU»,  
Saint Petersburg, Russian Federation  
E-mail: [levinsgtu@mail.ru](mailto:levinsgtu@mail.ru)

**Abstract** — This article discusses the possibility of power posts, control systems glaze-clear ice generation, located on overhead transmission lines, by selection of the power from the phase conductor line. Specialized current transformer in conjunction with the Converter unit is installed on the wire line and performs the conversion and accumulation of electric power transmitted over the line wire power-post monitoring of the ice. The methods of stabilization of the output voltage obtained with the subsequent analysis of the effectiveness and appropriateness of their use. Identified possible ways to extend the functionality of telemetry positions due to the location directly on the phase wire of the monitored line, which allows to locally control the temperature of the wire.

**Keywords** — Device by power distraction, monitoring system of glaze-ice deposition, current transformer, overhead transmission lines

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Недоотпуск электроэнергии из-за гололедно-ветровых аварий на локальных территориях страны достигает 70-80% общего годового недоотпуска из-за отказов по всей стране [1]. Для анализа и контроля гололедно-ветровых воздействий на провода воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), а именно своевременного обнаружения возникновения, оценивания массы и толщины гололедно-изморозевых отложений, определения имеющегося времени требуемого для принятия комплекса технических мероприятий и организации работ по ликвидации угрозы повреждения ВЛЭП, а также прогнозирования и определения момента окончания плавки гололедных отложений применяются системы мониторинга гололедной обстановки ВЛЭП.

В настоящее время цепи управления периферийных постов телеметрии систем мониторинга гололедно-ветровых нагрузок питаются, как правило, от солнечных батарей. Вследствие ряда факторов таких, как снижение солнечной активности в зимнее время, подверженность загрязнению

и обледенению солнечных панелей, деградация фотоэлементов, оказывающих влияние на снижение эффективности эксплуатации солнечных батарей, предлагается для питания цепей управления периферийных постов телеметрии использовать специальный трансформатор отбора мощности.

Для питания цепей управления периферийного поста телеметрии предлагается использовать специальный одновитковый трансформатор тока отбора мощности (ТТОМ) специальной конструкции, состоящий из разъемного кольцевого сердечника, на котором располагается вторичная многовитковая обмотка  $w_2$ . ТТОМ смыкается вокруг фазного провода ВЛ, являющегося одновременно первичной обмоткой  $w_1$ , и стягивается болтами для обеспечения плотного контакта. В местах стыков будет сосредотачиваться поток рассеяния  $\Phi_\sigma$ , значение которого пренебрежимо мало вследствие плотного контакта и не оказывает существенного влияния на потери в магнитопроводе.

Использование трансформатора тока для отбора мощности позволит расширить функциональные возможности

систем мониторинга за счет возможности локального измерения температуры провода.

Таким образом, целью работы является исследование и разработка модели трансформатора отбора мощности, позволяющего использовать в качестве питания периферийных постов телеметрии систем мониторинга рабочий ток контролируемой ВЛЭП путем отбора мощности от рабочей фазы линии.

В настоящее время в процессе плавки значение тока плавки не регулируется и не контролируется температура провода. Для перестраховки длительность плавки зачастую существенно превышает необходимый интервал времени. В результате возникают случаи перегрева проводов, сопровождающиеся их провисанием сверх допустимой стрелы провеса, сближением друг с другом и с другими элементами ВЛ, вследствие чего возникают короткие замыкания с пережогами, либо растяжения проводов достигают необратимого уровня. Если на линии имеются контактные соединения, они первые подвергаются негативному влиянию высоких температур и, как правило, выходят из строя, приводя к аварийным отключениям.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принцип действия ТТОМР сводится к следующему. Первичный ток  $I_1$  в фазном проводе создает в магнитопроводе ТТОМР магнитный поток  $\Phi$ , который сцепляясь со вторичной обмоткой  $w_2$  наводит в ней ЭДС  $E_2$ , обуславливая появление тока  $I_2$  во вторичной цепи.

Для определения требуемых параметров ТТ в зависимости от получаемой от него мощности, необходимо математически описать взаимосвязь между током провода линии и создаваемым им магнитным полем во вторичной цепи ТТ.

ЭДС замкнутого контура  $l$ , обусловленная изменением пронизывающего данный контур магнитного потока  $\Phi$  определяется согласно формуле

$$E_1 = 2\pi f w_1 \Phi \quad (1)$$

где  $f$  - частота переменного тока;  $w_1$  - число витков первичной обмотки ТТ

Величина магнитного потока  $\Phi$  в магнитопроводе

$$\Phi = \mu \mu_0 \frac{S}{l} I_1 w_1 \quad (2)$$

где  $\mu \neq const$  - относительная магнитная проницаемость материала сердечника;  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная;  $S$  - площадь поперечного сечения магнитопровода.

Тогда учитывая (1) и (2) ЭДС первичного контура можно определить следующим образом

$$E_1 = 2\pi f \mu \mu_0 \frac{S}{l} I_1 w_1^2 \quad (3)$$

Первичное напряжение в соответствии со вторым законом Кирхгофа определяется, как

$$U_1 = -E_1 + I_1(r_1 + jX_1) \quad (4)$$

где  $r_1$  и  $X_1$  - активное и реактивное сопротивления первичной обмотки

Индуктивное сопротивление первичной обмотки определяется следующим образом:

$$X_1 = \frac{\Phi}{I} = \mu \mu_0 \frac{S}{l} w_1^2 \quad (5)$$

В соответствии с явлением взаимной индукции наводящаяся ЭДС во вторичной цепи, обусловленная первичным током  $I_1$ , определяется как

$$E_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} \quad (6)$$

где  $w_2$  - число витков вторичной обмотки ТТ

Напряжение на вторичной обмотке в соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$U_2 = -E_2 - I_2(r_2 + jX_2) \quad (7)$$

где  $r_2$  и  $X_2$  - активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки

Вторичный ток согласно закону Ома определяется по формуле

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2 + Z_H} - I_0 \quad (8)$$

где  $I_0$  - ток намагничивания

Для повышения выходной мощности ТТ возможна установка вспомогательного ТТ выполняющего дополнительное подмагничивание. Таким образом, два трансформатора объединены в одну общую конструкцию.

С помощью дополнительной вторичной обмотки создается вспомогательный магнитный поток  $\Phi_{nm}$  позволяющий ТТ работать с наибольшей мощностью. Так как первичная обмотка состоит из одного витка, то обусловленная первичным током МДС  $F_1$  мала и создаваемая ей во вторичной обмотке ЭДС  $E_2$  также мала. Подмагничивание создает дополнительную магнитодвижущую силу  $F_{nm}$ , перемещающую рабочую точку характеристики намагничивания трансформатора тока в область наибольшей крутизны, обуславливая тем самым появление дополнительной ЭДС подмагничивания  $E_{nm}$ , значительно увеличивающую выходное значение ЭДС вторичной обмотки  $w_2$  и соответственно увеличивая вторичный ток  $I_2$  при том же первичном токе  $I_1$ .

Для исключения трансформаторной связи между обмоткой подмагничивания  $w_{nm}$  и вторичной обмоткой  $w_2$  магнитопровод ТТ следует секционировать на два одинаковых сердечника, обмотка подмагничивания  $w_{nm}$  и вторичная обмотка  $w_2$  соединяются между собой параллельно. При этом во вторичной цепи возникает дополнительная токовая слагающая  $I_{nm}$  от подмагничивания.

## III. ВЫВОД

Значение выходной мощности в первую очередь определяется величиной и характером нагрузки. Условием получения максимальной величины выходной мощности является равенство сопротивления нагрузки сопротивлению вторичной обмотки трансформатора отбора мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедева, Ю.А. Выбор концепций развития воздушных линий электропередачи 110-220 кВ, подверженных экстремальным метеорологическим воздействиям [Текст]: дис. канд. техн. наук / Ю.А. Лебедева – Саратов, 2011 - 147с.

# ДЕЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А.Г. Фишов<sup>1</sup>, Н.А. Карджаубаев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,  
Новосибирск, Россия  
E-mail: kardnurik9090@mail.ru

*Аннотация* - развитие распределенной малой генерации, включаемой в сети низкого и среднего напряжения, ставит задачу эффективного регулирования напряжения вне контура оперативного управления с помощью децентрализованного автоматического управления. Средствами решения такой задачи является мультиагентное регулирование (МАР). При этом, каждый интеллектуальный регулятор, входящий в МА систему, может быть носителем интересов (агентом) субъектов общего процесса энергоснабжения (сетевой компании, малой генерации, потребителя), а режим напряжения определяться как компромисс их интересов. Методология системного анализа, аналитические методы, теория электрических цепей, теория электрических систем, экспертные системы, базовые правила, экспериментальное моделирование. В работе представлена постановка задачи МА компромиссного регулирования напряжения в активных, в общем случае, многосвязных электрических сетях. Рассматривается одноуровневая система МАР с интеллектуальными агентами, обладающими, как собственной зоной (прилегающим районом электрической сети) принятия решений, так и образующими расширенную зону согласованных действий. Для контроля режима прилегающего района агент использует исключительно локальные режимные параметры. Обмен данными между агентами производится по каналам прямых электрических связей между узлами сети. МАР осуществляет как режимное, так и противоаварийное управление. Агенты используют единую базу правил. Обосновываются базовые правила принятия решений и осуществления действий агентами с учетом режима контролируемого района и согласования действий с соседними агентами. Предлагается и обсуждается структура мультиагентного регулятора напряжения. Приводятся результаты моделирования работы МАР напряжения на гидроэлектростанции.

*Ключевые слова:* электрические сети, регулирование напряжения, мультиагентная система, компромисс интересов, координация, эффективность.

## DECENTRALIZATION CONTROL OF VOLTAGE IN ELECTRICAL NETWORKS

A.G. Fishov<sup>1</sup>, N.A. Karjaubayev<sup>2</sup>.

<sup>1,2</sup> Novosibirsk State Technical University,  
Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: kardnurik9090@mail.ru

*Abstract* - the development of small distributed generation to be included in the network of low and average voltage, sets the task of effective voltage of control contour of is operative control with of the decentralized automation. The means of solving this problem is a multiagent of control (MAC). At the same time, every an intellectual regulator included in MA system can be a carrier of interest (agent) the subjects of the overall process energy supply (network company, small generation, the consumer) and voltage mode is defined as a compromise their interests. Methodology of the system analysis, analytical methods, theory of electric chains, theory of electric systems, synthesis, expert systems, basic rules, experimental modeling. The paper presents a formulation of the problem MA compromise control of the voltage in the active, in general, multiconnected electrical networks. We consider a one-tier system of MAC with intellectual agents having as its own area (adjoining area of the electrical network) decision-making, as well as an expanded area of concerted action. For the control adjacent area regime the agent uses exclusively local regime parameters. Communication between agents is made through the channels of direct electrical connections between network nodes. MAC carries both regime and antifault control. Agents use a single rule base. Substantiates the basic rules of decision-making and implementation of action agents based on regime-controlled area and harmonizing actions with neighboring agents. Is proposed and discussed multiagent the structure of the voltage regulator. The results of the simulation work on the MAR voltage hydroelectric.

*Key-words:* electrical networks, voltage of control, multiagent system, compromise of interests, coordination, effective

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время самостоятельное (активное) поведение потребителей и распределенной генерации, способствующее эффективности системы в целом, непосредственно связано с созданием максимально

возможного числа районов локального регулирования режима с распределенным управлением. Основой их формирования является локальность балансов реактивной мощности. Причина - невозможность ее передачи на большие расстояния вследствие возникающих чрезмерных потерь напряжений и активной мощности.

Такие районы одновременно становятся и локальными рынками услуг по снижению потерь в сети, обеспечению качества электроэнергии (регулирования напряжения, снижения его колебаний, несимметрии и несинусоидальности) [1]. В отличие от обычного локального управления, осуществляемого по местным параметрам, «умное» локальное регулирование предполагает контроль режима прилегающего района сети и использование искусственного интеллекта при принятии решений, что при достаточном количестве управляемых узлов способно обеспечить эффективное децентрализованное управление режимом напряжения сети в целом [2].

Появление в сети распределенных средств регулирования режима напряжения, принадлежащих разным субъектам, имеющих собственные цели регулирования, определяет необходимость качественно нового решения задачи регулирования напряжения в электрических сетях. Требуется разработка новых методов для управления режимом систем электроснабжения, включающих распределенную генерацию [3].

Перспективным направлением решения данной задачи является мультиагентное (распределенное) регулирование напряжения с помощью интеллектуальных регуляторов. Под мультиагентным регулированием понимается вся совокупность мер, принимаемых каждым из агентов (регуляторов напряжения) субъектов процесса (сетевой компанией, потребителем электроэнергии, генерацией), для достижения собственных целей в рамках единых принципов и правил, обеспечивающих компромиссный режим напряжения электрической сети [4].

## II. КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИАГЕНТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

С развитием распределенной малой генерации, включаемой в сети низкого и среднего напряжения, в сети могут возникать пересечения или наложения районов регулирования разных источников реактивной мощности, и сеть становится многосвязным (Рис. 1).

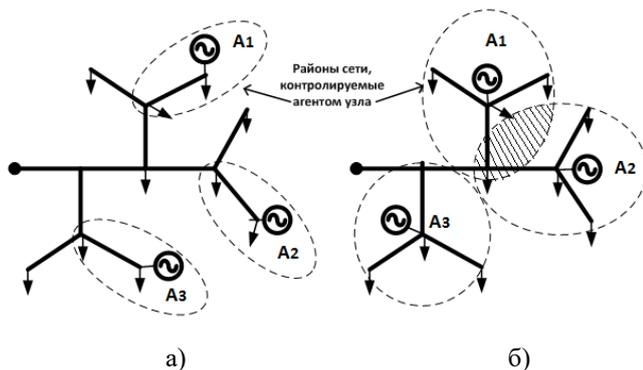


Рис. 1. Принципиальные схемы активных сетей с мало и многосвязным взаимным влиянием локальных регуляторов реактивной мощности (агентов)

При пересечении контролируемого района каждого агента, возникнут конфликты в режиме регулирования напряжения, так как агенты не могут увидеть процессы других районов (соседних агентов). Агенту, которому необходимо изменить режим по напряжению в своем контролируемом районе (базовый агент), не зная

параметров режима и процессов по регулированию напряжения соседних агентов, не может действовать в одиночку. Потому что, базовый агент, изменяя режим в своем районе, будет воздействовать режиму другим районам. Не получая разрешения от соседних агентов, базовый агент не имеет право предпринимать какие либо действия. Для того чтобы получить разрешения от соседних агентов, агенты должны между собой обмениваться информацией, которыми они владеют. Поэтому, в многосвязных структурах сети необходимы способы координации, для компромиссного регулирования напряжения агентов. Обмен данными между агентами производится по каналам прямых электрических связей между узлами сети, и используют единую базу правил. Обосновываются базовые правила принятия решений и осуществления действий агентами с учетом режима контролируемого района и согласования действий с соседними агентами.

## III. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МАС И ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ С УЧАСТИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

### Терминология децентрализованной мультиагентной системы

*Агент* – интеллектуальная сущность, представляющая интерес субъекта (активного узла сети) и действующая по единым правилам МАС [5].

*Базовый агент* – агент, инициирующий начало работы МАС, в контролируемом районе которого произошло пороговое повышение/снижение напряжения.

*Соседний агент* – агент, с узлом которого имеется прямая электрическая связь.

*Контролируемый район* – зона прилегающего к агенту района сети с контролируемым режимом напряжения.

*Участник* – агент, участвующий в запущенном процессе регулирования напряжения.

*Запрос* – сообщение, направляемое агентом, содержащее информацию о планируемых или реализованных действиях.

*Разрешение* – сообщение, направляемое агентом в ответ на запрос, содержащее информацию о подтверждении готовности к изменениям.

*Принципами построения ДМАС являются:*

- минимальность обмена информацией между агентами;
- локальность обмена информацией (агенты обмениваются сообщениями только с соседними агентами);
- локальность контроля режима (агент располагает параметрами режима только в контролируемом районе);

*Базовыми принципами поведения агентов являются:*

Право агента субъекта преследовать собственные цели субъекта в *нормальных режимах* сети, не создавая невозможности достижения целей другим субъектам. Для этого каждый агент эффективно использует собственные средства регулирования напряжения, доступную локальную информацию о режиме сети, согласовывает свои действия со смежными агентами и, при необходимости, оказывает и получает взаимопомощь.

Подчиненность целей всех агентов предотвращению развития и ликвидации возникших нарушений нормального режима.

#### IV. ПРАВИЛА МУЛЬТИАГЕНТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ СЕТИ

##### **Правила согласования (взаимодействия со смежными агентами)**

###### *Общие правила:*

Агенты единообразно идентифицируют класс состояния (режима напряжений) в своем районе и используют их совместно с целями для согласования действий с соседними агентами. При этом используются следующие классы состояний:

1. Режим нормальный оптимальный;
2. Режим нормальный;
3. Режим допустимо повышенный;
4. Режим допустимо пониженный;
5. Режим аварийно повышенный;
6. Режим аварийно пониженный;
7. Режим двухсторонних нарушений (ограничений).

*Сообщения смежным агентам о своих действиях/запретах или о запросах помощи:*

1. Если режим нормальный, то «Бездействую, готов помочь».

2. Если режим допустимо повышенный, то «Снижаю напряжение, запрещаю повышение напряжения смежными агентами». Если нет возможности снизить напряжение, то запрос смежным агентам о помощи «Прошу снизить напряжение».

3. Если режим допустимо пониженный, то «Повышаю напряжение, запрещаю снижение напряжения смежным агентам». Если запас регулирования исчерпан, то запрос смежным агентам о помощи «Прошу повысить напряжение».

4. Если режим аварийно повышенный, то «Снижаю аварийное напряжение, запрещаю повышение напряжения смежными агентами». Если нет возможности снизить напряжение, то запрос смежным агентам об аварийной помощи «Прошу экстренно снизить напряжение».

5. Если режим аварийно пониженный, то «Повышаю напряжение, запрещаю снижать напряжение смежными агентами». Если исчерпан запас регулирования, то запрос смежным агентам об аварийной помощи «Прошу экстренно повысить напряжение».

##### **Этапы мультиагентного регулирования напряжения**

1. Идентификация общей ситуации каждого агента по параметрам в контролируемом районе.

2. При необходимости изменения режима базового агента в контролируемом районе, выбор его действия из набора доступных себе регулирующих средств.

3. - Если базовый агент имеет доступные регулирующие средства, то направление соседним агентам запросов на разрешение выполнения намечаемых действий в контролируемом районе.

- Если базовый агент не имеет доступных регулирующих средств, то направление соседним агентам запросов о помощи для регулирования напряжения.

4. - В случае, если базовый агент запрашивает разрешение выполнения намечаемых действий, то

проверка соседними агентами их допустимости в контролируемом районе.

- В случае, если базовый агент запрашивает помощи для регулирования напряжения, то поиск соседними агентами набора доступных средств регулирования.

5. - В случае, если базовый агент запрашивает разрешения на выполнение намечаемых действий, то передача сообщения соседними агентами базовому агенту о разрешении изменения или об отказе на запрос.

- В случае, если базовый агент запрашивает о помощи в регулировании напряжения, то передача сообщения соседними агентами базовому агенту о готовности помочь или об отказе в помощи.

6. - При разрешении всеми соседними агентами базовому агенту выполнения действия базовый агент начинает регулировать напряжения в контролируемом районе.

- При подтверждении соседним агентом готовности помочь базовый агент разрешает ее оказание.

7. Реализация мультиагентного регулирования напряжения в контролируемом районе и проверка базовым агентом достаточности выполненного действия. В случае недостаточности возврат к п. 2.

#### V. ПРИМЕР РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ АГЕНТОМ НА ГИДРОСТАНЦИИ

Ниже представлены результаты анализа эффективности способа децентрализованного регулирования напряжения на Новосибирской ГЭС с установленной мощностью 465 МВт (Рис.2). С некоторого времени системным оператором разрешено станции самостоятельно определять уставку по напряжению в ограниченном диапазоне. Естественно, что в таких условиях целью регулирования станции по реактивной мощности становится минимизация потерь в схеме выдачи мощности в реальном времени и вне контура диспетчерского управления.

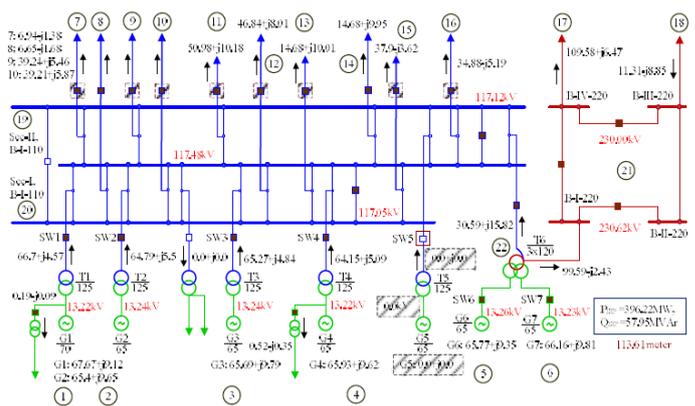


Рис. 2. Схема выдачи мощности Новосибирской ГЭС с нанесением параметров базового потокораспределения

Сформулированная задача может успешно решаться интеллектуальным регулятором (агентом НГЭС), корректирующим уставку регуляторов возбуждения в направлении снижения потерь в схеме

выдачи мощности с контролем допустимости ее изменения при проверке допустимости режима напряжения в прилегающем районе сети.

На рис. 3 представлена расстановка измерений системы контроля режима выдачи мощности ГЭС интеллектуальным регулятором. Точками обозначены места измерения токов и мощностей (прямые измерения), прямоугольниками – напряжения удаленных концов отходящих ВЛ (определяются косвенно).

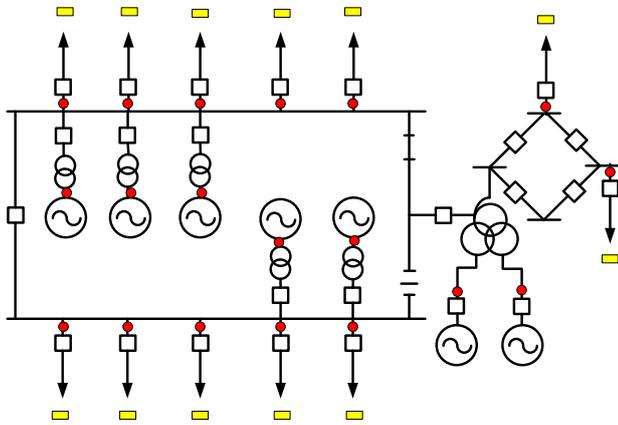


Рис. 3. Регулирование напряжения с контролем режима и оптимизацией потерь в прилегающей сети

Потери мощности во внутренней схеме ГЭС (потери в трансформаторах, шинах) определяются как разность вырабатываемой всеми генераторами мощности и суммы всех выдаваемых мощностей (по отходящим ВЛ, ТСН).

Для определения потерь во всей схеме выдачи мощности к потерям во внутренней схеме необходимо добавить нагрузочные потери в отходящих линиях, легко определяемых по измерениям токов.

На рис.4 для примера, представлена полученная расчетным путем зависимость потерь во внутренней схеме ГЭС в диапазоне допустимых изменений напряжения во всех узлах контролируемого района сети от различных уставок АРВ для получасового интервала времени суток (03:00-03:30).

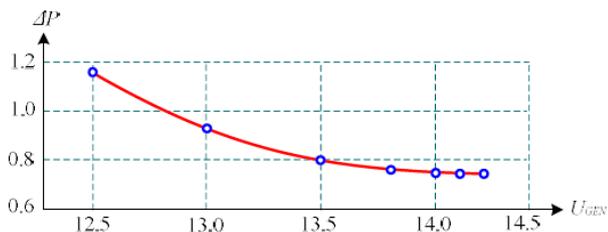


Рис. 4. Зависимость потерь во внутренней схеме ГЭС от уставок АРВ для получасового интервала времени

Следует отметить, что потери мощности, соответствующие ранее принимаемой постоянной уставке (13,2 кВ) на НГЭС, больше оптимальных потерь (при 14 кВ) при соблюдении условия допустимости напряжений в сети, как в первом, так и во втором случаях. Снижение внутренних потерь составляет в среднем около 100 кВт (12%).

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Централизованное регулирование напряжения, осуществляемое в настоящее время сетевыми компаниями, не отвечает интересам собственников распределенной генерации, потребителей, обладающих средствами регулирования напряжения.

Выполненные расчеты подтверждают его способность обеспечить компромиссное регулирование напряжения в интересах всех субъектов, участвующих в процессе: сетевой компании, потребителей, распределенной генерации, а также создать технологическую основу локальных рынков услуг по регулированию напряжения в сети.

В основу мультиагентного регулирования напряжения в электрических сетях могут быть положены контроль режима прилегающего района сети и общие (единые) базы правил, обеспечивающие как принятие решений каждым из регуляторов, так и их координацию.

## Список литературы

- [1] С. Т. Исмоилов, С. С. Труфакин, А. Г. Фишов. Мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией и активными потребителями. // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: 4-ая междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 3–7 июня 2013 г.: аннот. докладов. – Екатеринбург, 2013. – С. 99-100.
- [2] Фишов А.Г. Интеллектуальная электрическая сеть - революция в отношениях субъектов и управлении режимами электроэнергетических систем//Сборник докладов 3-ей международной научно-технической конференции. Екатеринбург 22-26 октября 2012. Том 1. С.91-97.
- [3] Исмоилов С. Т. Моделирование и анализ эффективности регулирования напряжения в электрической сети с распределенной генерацией / Исмоилов С. Т., Фишов А. Г. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока - 2014, - № 1-2, с. 302-305.
- [4] Пат. 2561915, МПК Н02 3/12. Способ регулирования напряжения узла электрической сети и узлов, прилегающих к нему / С. Т. Исмоилов, А. Г. Фишов; НГТУ - 2014118182; заяв. 05.05.14; опуб. 10.09.15. - 7 с. Приоритет от 05.05.14, выдавшая страна: РФ, сведения об издании: Бюл.№ 25.
- [5] Фишов А. Г. Мультиагентное регулирования напряжения в электрических сетях / А. Г. Фишов, Н. А. Карджаубаев, Э. Эрдэнэбад // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: 6-я междунар. науч.-тех. конф., Санкт-Петербург 25-28 апреля 2017 г.

# Анализ процедуры изменения эксплуатационного состояния генерирующего оборудования в условиях правил оптового рынка

Д.С. Левин  
Филиал АО «СО ЕЭС» «Ленинградское РДУ»,  
Санкт-Петербург, Россия.  
E-mail: levinsgtu@mail.ru

*Аннотация* — в настоящей статье производится оценка процедуры подачи уведомлений о составе и параметрах каждой единицы генерирующего оборудования (ЕГО) участника оптового рынка в группе точек поставки генерации (ГТП) в отношении парогазовой установки, необходимые для расчета выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО), актуализации расчетной модели и определения готовности к несению нагрузки, а также производится анализ организации действий и взаимодействия диспетчерского персонала системного оператора с персоналом объектов генерации в процессе управления режимами операционной зоны диспетчерского центра в условиях действующих правил оптового рынка. В основу был положен сравнительно-правовой метод оценки нормативной базы, определяющей деятельность системного оператора и объектов генерации при изменении эксплуатационного состояния генерирующего оборудования. Произведена оценка основных стандартов СО «ЕЭС» и нормативных документов определяющих порядок изменения технологического режима и эксплуатационного состояния ЕГО в ГТП, позволяющий оптимизировать деятельность диспетчерского персонала системного оператора и руководящего оперативного персонала объектов генерации. Осуществленный анализ может быть учтен при совершенствовании регламентов, определяющих деятельность системного оператора и объектов генерации при изменении эксплуатационного состояния генерирующего оборудования.

*Ключевые слова* - единица генерирующего оборудования, группа точек поставки, выбор состава включенного генерирующего оборудования.

## Analysis procedures changes operational status of the generating equipment in terms of the rules of the wholesale market

D. Levin.  
Filial «SO UPS» «LenRDU»,  
Saint Petersburg, Russian Federation  
E-mail: [levinsgtu@mail.ru](mailto:levinsgtu@mail.ru)

*Abstract* — in this article the evaluation procedure for the filing of notices of composition and parameters of each unit of generating equipment participant of the wholesale market in the group of supply points of generation required for calculation of selection of the included generating equipment, updating the analysis model and indicate that it is ready to bear the load, as well as the analysis of the organization of action and interaction of Supervisory personnel of the system operator with a staff of power generation facilities in the process control modes the operating area control center in terms of existing rules of the wholesale market. The basis was based on the comparative legal method assessment of the regulatory framework that defines the activities of the system operator and generation facilities when changing the operational status of the generating equipment. The assessment of core standards SO UPS company and regulatory documents determining the procedure of submission of dispatching requests to change operational state in the group of supply points, allowing to optimize the activity of dispatching personnel of the system operator and senior operational staff of power generation facilities. The analysis can be taken into account when improving regulations governing the work of the system operator and generation facilities when changing the operational status of the generating equipment.

*Keywords* - unit of generating equipment, the group of supply points, the selection of the included generating equipment

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Диспетчерский персонал АО «СО ЕЭС» (СО) осуществляет диспетчерское управление электроэнергетическим режимом в операционной зоне путем выдачи диспетчерских команд, распоряжений, разрешений субъектам электроэнергетики в отношении оборудования объектов электроэнергетики, являющегося объектами диспетчеризации диспетчерского центра (ДЦ) и,

определенных соответствующим перечнем объектов диспетчеризации, формируемого на основании [1]. Возможность управления технологическим режимом работы из изменения эксплуатационного состояния блока парогазовой установки (ПГУ), как группового объекта управления (ГОУ), в том числе в отношении входящих в ГОУ агрегатов (газовых и паровых турбин) - единиц генерирующего оборудования (ЕГО), диспетчерским персоналом

лом ДЦ путем отдачи диспетчерских команд или разрешений обозначено в [2, раздел 2].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимость изменения режима и состояния оборудования объектов электроэнергетики при ведении режима работы энергосистемы определяется включением оборудования в перечень объектов диспетчеризации, что в частности регламентировано в [3, п.12, п.13, п.16], который определяет:

- состав оборудования, изменение эксплуатационного состояния или технологического режима работы которого влияет или может влиять на электроэнергетический режим энергосистемы в операционной зоне данного ДЦ;
- распределение объектов диспетчеризации по способу оперативно-диспетчерского и оперативно-технологического управления.

В [1, п.3.4.1.] указано, что в диспетчерское ведение РДУ должны быть отнесены ПГУ, при этом не регламентировано отнесение агрегатов в составе ПГУ к объектам диспетчеризации. Как показывает практика, в ДЦ при составлении перечня объектов диспетчеризации относят целиком блок ПГУ к объекту диспетчеризации без отнесения отдельных агрегатов в составе ПГУ к объектам диспетчеризации.

Участники оптового рынка ОРЭМ, являющиеся собственниками или иным законными владельцами генерирующих объектов, ведут деятельность в первую очередь на основании Договора о присоединении к торговой системе оптового рынка и приложений к договору. Порядок планируемых или фактических изменений состава и технических параметров генерирующего оборудования определяется Приложениями к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка, в частности [4, п.2.1.1], путем подачи соответствующих уведомлений следующих типов:

- выбора состава включенного генерирующего оборудования и генерирующего оборудования, находящегося в резерве (ВСВГО);
- рынок на сутки вперед (РСВ);
- оперативное.

Процедура ВСВГО для целей планирования РСВ с последующим формированием прогнозного диспетчерского графика (ПДГ), осуществляется в отношении каждого агрегата ПГУ, т.е. в отношении каждой ЕГО в составе ПГУ, что определено в [5, п.5.9]. На основании [6, раздел 6.6.1] изменение состава включенного генерирующего оборудования участников оптового рынка по инициативе СО осуществляется с применением ранжированного перечня ЕГО на включение (отключение), а на изменение генерации по внешней инициативе применением ранжированных таблиц. В ранжированных перечнях и таблицах определены ценовые показатели индивидуально по агрегатам ПГУ. Соответственно включения или отключения агрегатов ПГУ в сеть, путем отдачи разрешений или команд, производятся в отношении конкретного агрегата блока ПГУ.

Участники оптового рынка согласно [7, п.54; 5, п.6.6] должны обеспечивать соответствие времени включения в сеть генерирующего оборудования, при этом конец фактического часа включения определен в ПДГ. Для блока ПГУ регистрация соответствия нормативного времени

включения в сеть осуществляется в отношении каждой ЕГО в составе ПГУ [8, п.5.9], ко времени определенному в ПДГ.

Таким образом, диспетчерский персонал, в отношении блока ПГУ должен контролировать работу не только всего блока ПГУ целиком, представляющего собой ГОУ, но и в отношении входящих в состав ПГУ газовых и паровых турбин, являющимися отдельными ЕГО и объединённых общими технологическими факторами. Соответственно включение агрегатов ПГУ в перечень объектов диспетчеризации может приводить к возможной интерпретации того, что непосредственно газовая и паровая турбины не входят в зону диспетчерской ответственности, а следовательно не являются контролируемым оборудованием в отношении которого требуется организация диспетчерского управления.

## III. ВЫВОД

Исходя из проведенного анализа нормативной документации, учитывая тот факт, что агрегаты ПГУ, как правило, не включаются в перечень объектов диспетчеризации, а включается блок ПГУ в целом, при том, что диспетчерский персонал, исполняя должностные обязанности при ведении режима энергосистемы, выдает команды и разрешения на изменение эксплуатационного состояния и технологического режима работы в отношении газовых и паровых турбин в составе блока ПГУ, контролируя в том числе время включения и состав находящихся в работе агрегатов, то возникает вопрос легитимности такого управления и соответственно возможности рассмотрения включения газовых и паровых турбин в составе ПГУ в перечень объектов диспетчеризации.

### Список литературы

1. Положение о порядке формирования диспетчерскими центрами ОАО «СО ЕЭС» перечней объектов диспетчеризации с их распределением по способу управления;
2. Порядок отдачи и регистрации стандартных документируемых диспетчерских команд, распоряжений, разрешений и сообщений, используемых диспетчерским персоналом АО «СО ЕЭС» и его филиалов при управлении режимами работы объектов генерации участников оптового рынка и внешними потоками;
3. Правила оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике, утвержденные Постановлением Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 N 854;
4. «Регламент подачи уведомлений участниками оптового рынка» Приложение № 4 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка;
5. Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка;
6. «Регламент оперативно-диспетчерского управления электроэнергетическим режимом объектов управления ЕЭС России» Приложение № 9 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка;
7. Правила оптового рынка электрической энергии и мощности, утвержденные Постановлением Правительства Российской Федерации №1172 от 27 декабря 2010 года;
8. Порядок установления соответствия генерирующего оборудования участников оптового рынка техническим требованиям.

# Исследование возможности применения ветроэлектростанций для электроснабжения потребителей на Ямале

И.И. Дорофеев

Акционерное Общество «Новокуйбышевский Нефтеперерабатывающий Завод»

г. Новокуйбышевск, Россия

Kotofeifromyamal@gmail.com

*В данной работе рассмотрена проблема глобального изменения климата, позволяющее использовать альтернативные источники электроэнергии на территории, ранее подконтрольной холодным северным циклонам. Цель работы: рассмотреть возможности применения альтернативных источников энергии (на примере ветроэлектростанций) для электроснабжения потребителей на полуострове Ямал, сокращения вредных выбросов в атмосферу и наносимого вреда экосистеме полуострова.*

*Альтернативная энергетика; атмосфера; ветроагрегат; ветропарк; ветроэлектростанция; ветроэнергетика; гибридные ветроэнергетические установки; экология; экосистема; Ямал.*

## Research of a possibility of application of wind farms for power supply of consumers on Yamal

I.I. Dorofeev

JSC Novokuibyshev Refinery

Novokuybyshevsk, Russia

Kotofeifromyamal@gmail.com

*In this work the problem of global climate change, allowing using alternative sources of the electric power in the territory; early under control to cold northern cyclones is considered. Work purpose: to consider the possibilities of application of alternative energy sources (on the example of wind farms) for power supply of consumers on their Yamal, reductions of harmful emissions in the atmosphere and the done harm to an ecosystem of the peninsula.*

*Alternative energy, atmosphere, wind unit, wind farm, wind electrical power station, wind power, combine wind system, ecology, ecosystem. Yamal.*

### I. ВВЕДЕНИЕ

В России существует значительный нереализованный задел в области ветроэнергетики. Около 30% экономического потенциала ветроэнергетики сосредоточено на Дальнем Востоке, 14% в Северной экономической зоне, около 16% в Западной и Восточной Сибири. В данном докладе рассматривается вопрос о реализации экономического потенциала ветроэнергетики в Западной Сибири (на полуострове Ямал).

Ветер – это возобновляемый источник энергии. Люди с древних времен используют энергию ветра: парусный флот, мельницы.

В настоящее время ветроэнергетика является наиболее привлекательным направлением развития нетрадиционных источников энергии. Использование механической энергии ветра позволяет получать абсолютно чистую электроэнергию. Таким образом, решается проблема электрофикации удаленных от линий электропередач населенных пунктов (избавление от влияния энергетических мегаполисов).

Передовые страны, такие как США, Германия, Франция, Китай, Индия, Испания, Дания, Ирландия, Никарагуа, Португалия, давно обратили свое внимание на ветроэнергетику. Правительства этих стран активно стимулирует развитие данной отрасли путём

предоставления различных льгот и повышенных тарифов на сбыт зеленой электроэнергии. Успешно действует практика выдачи кредитов на выходных условиях для установки автономных систем электроснабжения на основе ветрогенераторов.

К началу 2015 года общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 369 гигаватт. А к началу 2017 года общая установленная мощность достигла 600 гигаватт (Дания вырабатывает 50% электроэнергии из энергии ветра, Португалия – 27%, Никарагуа – 21%, Испания – 20%, Ирландия – 19%, Германия – 8%).

В России, самые крупные ветроэлектростанции находятся в Крыму: Донузлавская ВЭС (18,7 МВт), Останинская ВЭС (26 МВт), Тарханкутская ВЭС (15,9 МВт) и Восточно-Крымская ВЭС (2,7 МВт).

Ранее, из-за климатических условий Западной Сибири, применение ветроэнергетики не представлялось возможным (низкая температура воздуха). Но в связи с глобальным изменением климата (повышение температуры планеты на несколько градусов), изменился климат Западной Сибири. Появилась возможность использования современных ветроэлектростанций.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГИОНА

Ямало-Ненецкий автономный округ – знаменит запасами углеводородов. Здесь сосредоточено около 78% общих запасов российской нефти и газа. ЯНАО – крупнейшая мировая ресурсная база углеводородов. На полуострове ежегодно добывается около 8% от общей добычи «черного» и около 80% «голубого золота». Так же ведется добыча хрома, молибдена, олова, железа, свинца, фосфоритов, баритов и других полезных ископаемых.

Ветра на Ямале столько же, сколько и газа. Ранее, идея вырабатывать из него электричество – не приживалась. Но с изменением климата и технологий – все меняется.

Использование ветроэнергетики на полуострове – является экономически обоснованным проектом. На примере сведений от Росгидромет, можно сделать вывод, что ветер устойчивый, дует большую часть времени года (подходящая роза ветров).

Альтернативная энергетика на Ямале придется весьма кстати. Электроснабжение отдаленных поселков округа, как и на всем Крайнем Севере, осуществляется с помощью дизельных электростанций. Топливо, для данных типов электростанций приходится везти за тысячи километров. От этого электроэнергия становится поистине «золотой». Властям Ямала ежегодно приходится тратить колоссальные деньги, чтобы за счет дотаций из бюджета снизить стоимость электричества для местных жителей.

Основной идеей для реализации ветроэнергетики на Ямале, является строительство гибридных ветроэнергетических установок (combine wind system – системы, состоящие из ветроэнергетической установки и какого-либо другого источника энергии (бензинового, дизельного, газотурбинного двигателя) используемых в качестве резервного или дополнительного источника электроснабжения потребителей).

Идея гибридных ветроэнергетических установок очень проста и понятна – «Есть ветер – работает ветроагрегат (wind unit – система, состоящая из ветродвигателя, системы передачи мощности и приводимой им в движение машины – электромеханического генератора). Нет ветра – электроэнергия вырабатывается дизельными электростанциями.

## III. ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТА НА ЯМАЛЕ

Климат Ямало-Ненецкого автономного округа определяется наличием многолетней мерзлоты, близостью холодного Карского моря, обилием заливов, рек, болот и озер. В целом для округа характерна длительная зима (до 8-9 месяцев в год), короткое лето, сильные ветра, небольшая величина снежного покрова. Среднегодовая температура воздуха отрицательная (около  $-10^{\circ}\text{C}$ ). Минимальная температура зимой опускается до  $-59^{\circ}\text{C}$ , а летом, могут повышаться до  $+30^{\circ}\text{C}$ .

В холодное время года, с ноября по март, суровость погоды определяется скоростью ветра. Зимой преобладают ветры южных румбов, со скоростью ветра до 30 м/сек и более. Летом чаще дуют северные и северо-восточные ветры со скоростью 15-20 м/сек.

Объектом данного доклада, для изучения изменения скорости и направления ветра, стал город Губкинский. На протяжении последнего года, ежедневно записывались показания скорости (м/сек) и направления ветра. Была построена роза ветров и определено оптимальное место для размещения гибридных ветроэнергетических установок.

## IV. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ

Все ветрогенераторы работают по единому принципу: ветер вращает лопасти, лопасть передает вращение ротору, ротор вырабатывает ток, который после преобразований в контроллере и инверторе, приобретает нужные потребителю характеристики. Накапливается энергия в аккумуляторах.

Для производства электричества в промышленных масштабах используют ветрогенераторы большой мощности. Обычно – это гигантские трехлопастные ветряки с параллельной осью вращения, но турбинные ветровые установки также получили распространение.

Ветрогенераторы целесообразно устанавливать в местности, где средняя скорость ветра более 8 м/сек. Лопасти больших генераторов начинают вращательное движение при ветре 4 м/сек; максимальное КПД достигается при 12 м/сек.

Раньше, ветрогенераторы имели существенные ограничения: по температуре до  $-50^{\circ}\text{C}$  и силой ветра до 25 м/сек.

Современные ветрогенераторы в арктическом исполнении пригодны для использования в суровых климатических условиях, с температурой воздуха ниже  $-50^{\circ}\text{C}$  и силой ветра свыше 30 м/сек.

## Список литературы

- [1] Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки – Москва, 2006. – 276 с.
- [2] Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки – Москва, 1948. – 546 с.
- [3] Андрианов В.Н. – Ветроэлектрические станции – Ленинград, 1960 – 362 с.
- [4] Шефтер Я.И. – Использование энергии ветра – Москва, 1983. – 204 с.
- [5] В.С. Кривцов – Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектростанции – Харьков, 2003. – 406 с.
- [6] В.С. Кривцов – Неисчерпаемая энергия. Книга 2. Ветроэнергетика – Харьков, 2004. – 406 с.

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

К. Ф. Шарафеддин<sup>1</sup>, С.А. Цырук<sup>2</sup>, Х.С. Сангов<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Ливанский Университет, Бейрут, Ливан.

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия.

E-mail: koukou4432@mail.ru, TsyrukSA@mpei.ru, khushdil.sangov@mail.ru.

**Аннотация** — В статье рассматривается задача стабилизации частоты и величины выходного напряжения ветрогенераторной установки с асинхронным генератором с самовозбуждением посредством добавочного активного сопротивления в цепь ротора и оптимального подбора величины входного сопротивления на выводах генератора. Дано описание математической модели асинхронной машины для исследования нагрузочных характеристик в интервале от режима холостого хода до номинальной нагрузки, с целью обеспечения устойчивой работы.

**Ключевые слова** — энергия ветра; асинхронный генератор; микроконтроллер; регулятор напряжения.

## DEVELOPMENT OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION SYSTEM OF ASYNCHRONOUS GENERATOR FOR WIND ENERGY

KF Charafeddin<sup>1</sup>, S.A. Tsyruk<sup>2</sup>, K.S. Sangov<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Lebanon University, Beirut, Lebanon.

<sup>2</sup>FGBOU VO "National Research University" MPEI ", Moscow, Russia.

E-mail: koukou4432@mail.ru, TsyrukSA@mpei.ru, khushdil.sangov@mail.ru.

**Abstract** — this article considers the problem of stabilizing the frequency and the output voltage of a wind turbine with self-excited induction generator, by inserting an additional active resistance into the rotor circuit and by optimal selection of the proper capacitor to be connected to the generator terminals. To ensure a stable operation of induction machine a mathematical model for the load characteristics from no-load to full-load was investigated.

**Keywords** — wind energy; asynchronous generator; microcontroller; voltage regulator.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ветрогенераторы играют важную роль в научных исследованиях, поскольку они работают от возобновляемых источниках энергии и не имеют загрязнения во время эксплуатации. В течение двух десятилетий отмечается рост единичных мощностей ветроэнергетических установок (ВЭУ) от 100 до 10000 кВт. При этом в [1] указано экономические аспекты ветровой энергии, оценка себестоимости получения энергии с помощью ВЭУ в различных условиях, оценка общей экономической эффективности их использования. Многие работы и публикации описывают эту проблему, когда они отвечают на многие вопросы и решают различные проблемы. В работе [2] указано, что асинхронные генераторы (АГ) отличаются простотой эксплуатации и обслуживания, легко включаются на параллельную работу, кривая форма выходного напряжения у них ближе к синусоидальной, чем у синхронных генераторов (СГ) при работе под нагрузкой. Как указывается в [3] АГ может работать в автономных

условиях, без включения в общую сеть. В этом случае для получения реактивной мощности необходимой для намагничивания генератора, используется конденсаторные батареи. Особенно условием такой работы АГ является наличие остаточного намагничивания стали ротора, что необходимо для процесса самовозбуждения генератора. В работе [4] разработана система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии. Доказано что при минимальном количестве емкостей система управления ВЭУ регулирование выходного напряжения генератора возможно в пределах от 180 до 250В и изменении частоты от 45 до 55 Гц. Авторы [6] представляют подробный анализ работы установившегося режима самовозбуждающегося асинхронного генератора. Они используют свою эквивалентную схему и фильтр активной мощности для расчета минимальной ёмкости возбуждения и контроля качества электроэнергии. Теперь автоматическое управление напряжением асинхронного генератора может иметь решения с современными

силовыми электронными устройствами и силовыми преобразователям [7].

## II. АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ МАШИНЫ

Испытательная система состоит из асинхронной машины, приводимой в движение двигателем постоянного тока с трехфазным блоком конденсаторов для обеспечения самовозбуждения и нагрузки. Поскольку нагрузка изменяется случайным образом, конденсатор должен быть изменен, чтобы получить желаемое регулирование напряжения. Для анализа может использоваться операционная однофазная эквивалентная схема на рис. 1.

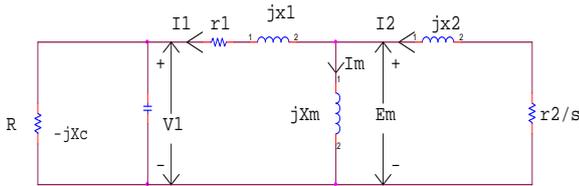


Рис.1. Операционная однофазная эквивалентная схема.

Для заданной скорости, емкостного сопротивления и сопротивления нагрузки известны все параметры, кроме реактивности ветви намагничивания  $X_m$  и частоты. Для определения этих двух параметров используется эквивалентная схема, приведенная на рис.2

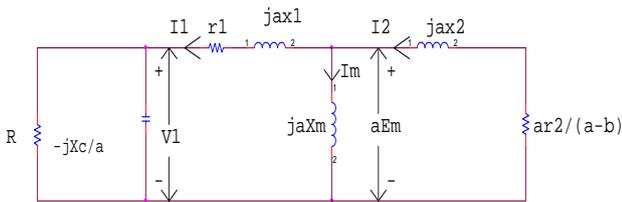


Рис.2. Эквивалентная схема замещения.

Для этой схемы введём следующие параметры:

$$a = \frac{f}{f_B}, \quad b = \frac{\omega}{\omega_B}, \quad (1)$$

где  $f$  - фактическая частота;  $f_B$  - номинальная частота;

$\omega$  - фактическая частота вращения;  $\omega_B$  - номинальная частота вращения.

Уравнение контура схемы (рис.2) можно записать по закону Кирхгофа в виде:

$$\left( \frac{r_2}{a-b} + x_2 \right) (X_m) + x_1 + \frac{r_1}{a} + \frac{RX_C}{a(aR + X_C)} = 0 \quad (2)$$

Расчёт уравнения (2) в функции относительной частоты  $a$ , переписывается в следующем виде:

$$k_3 a^3 + k_2 a^2 + k_1 a + k_0 = 0 \quad (3)$$

где  $k_3, k_2, k_1$  и  $k_0$  - являются коэффициентами, зависящими от параметров машины, емкости, скорости и сопротивления нагрузки.

Решая уравнение (3), получаем три сложных корня, а именно:

$$a_1 = m_1 + jn_1, \quad a_2 = m_2 + jn_2, \quad a_3 = m_3 + jn_3 \quad (4)$$

Стабильность машины зависит от значений этих корней. Анализ показывает, что если  $m$  всегда отрицательно, то корень отвергается и обычно два из них отрицательны. Оставшийся корень имеет  $m$  с одним из трех состояний, отрицательным, нулевым или положительным. Если  $m$  равно нулю, машина стабильна.

## III. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

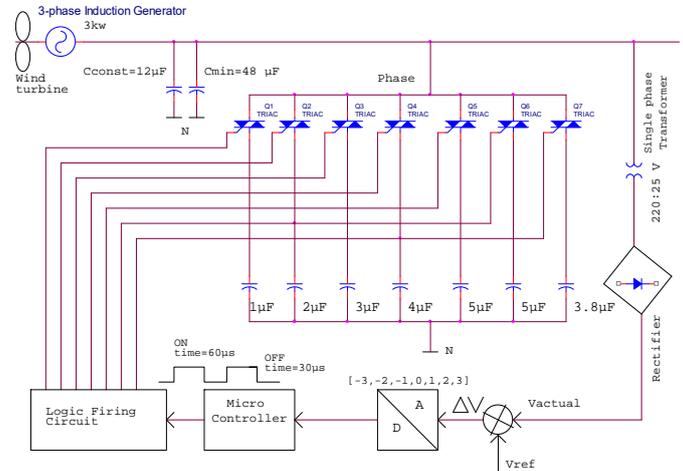


Рис.3. Однолинейная схема автоматического регулирования напряжения.

Автоматический регулятор напряжения (АРН) является основным контроллером, который должен использоваться с самовозбуждающимся АГ. Чтобы достичь работы асинхронной машины в области генератора, мы должны подключить соответствующий трехфазный конденсаторный батареи к выводам машины, приводимые в действие внешним механическим источником, таким образом, как правило, генерируется ЭДС. Это явление известно как самовозбуждение АГ. Поскольку изменение частоты с нагрузкой незначительно при постоянной скорости первичного двигателя, напряжение на выводах можно поддерживать постоянной при различных нагрузках, регулируя ёмкость. Мы предлагаем новый метод, основанный на схеме коммутируемых конденсаторов, в котором сигнал обратной связи берется из выпрямленного вторичного напряжения понижающего трансформатора, подключенного к выходу генератора. Постоянная логическая схема с постоянным напряжением генерирует последовательность импульсов к входам симисторов. Время включения этих импульсов выбирается равным 60 мкс для покрытия нулевого напряжения фазного напряжения переменного тока, а время отключения составляет 30 мкс для покрытия нулевого тока конденсатора.

## IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы сравнить теорию с практикой на кафедре ЭШПЭ, НИУ. «МЭИ» нами разработан испытательный стенд (рис.4) для двигательного и генераторного режима асинхронной машины, был проведен ряд экспериментов с использованием:

1. Отдельно-возбужденный двигатель постоянного тока ДПТ;  $P_n = 3,2$  кВт;  $U_n = 230$ В;  $I_n = 13,9$ А;  $n = 1450$  об/мин; КПД – 88%;  $U_v = 115$  В; Вес -88кг.

- Стандартный асинхронный двигатель типа АОЛ2 -32-4;  $P_n=3,2$  кВт; 3хф  $\sim 50$ Гц; статор 220/ 380В;  $I_n=11,4/6,6$ А; КПД - 83%;  $n=1450$  об/мин; Вес- 31кг.
- Выпрямительное устройство:  $U_n = 220$  В;  $I_n = 25$ А; резистивный нагрузочный блок: 3 кВт, 220 В; измеритель скорости вращения - ДТ – 2234А.

Асинхронный двигатель установлен с машиной постоянного тока на одном фундаменте. Питание машина постоянного тока выполнено через трёхфазный автотрансформатор ЛАТР и выпрямительный мост, собранный по схеме Ларионова.

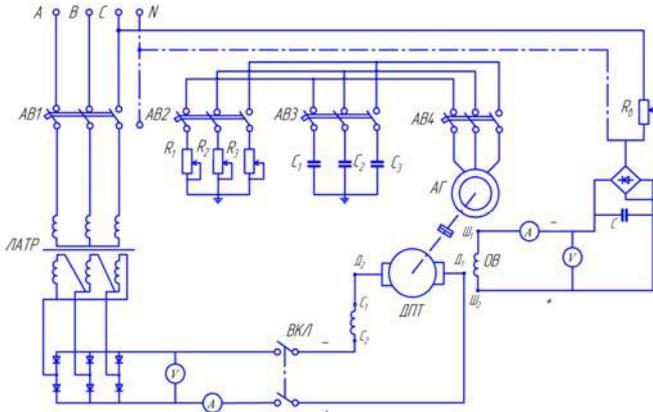


Рис.4. Схема экспериментальной установки для испытания асинхронной машины.

Для определения параметров асинхронной машины мы используем известные методы. Опыт на постоянное напряжение определяет сопротивления обмотки статора  $r_1$ , в то время как опыт на короткое замыкание обеспечивает следующие параметры:  $x_1$ ,  $x_2$  и  $r_2$ . Опыт холостого хода для определения намагничивающее реактивное сопротивление  $X_M$  и  $E_M$  - ЭДС, индуцируемой в фазах обмотки статора и приведенное к обмотке ротора. Полученные численные значения были,  $r_1 = 1,03 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 3,08 \text{ Ом}$ ,  $x_1 = x_2 = 3,71 \text{ Ом}$ . Полученные результаты из этих опытов приведены в табл. 1 и 2.

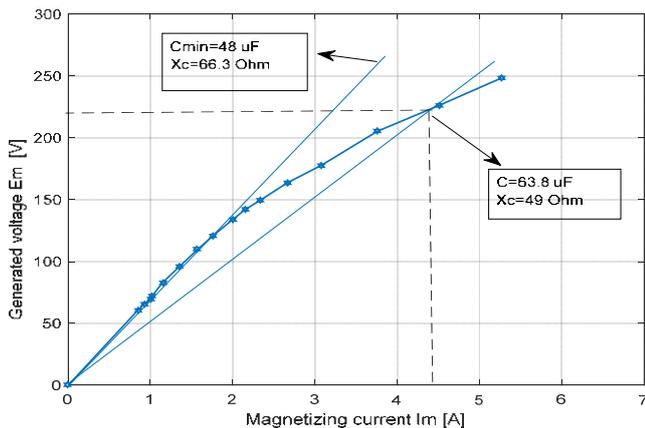


Рис.5. Кривая намагничивания.

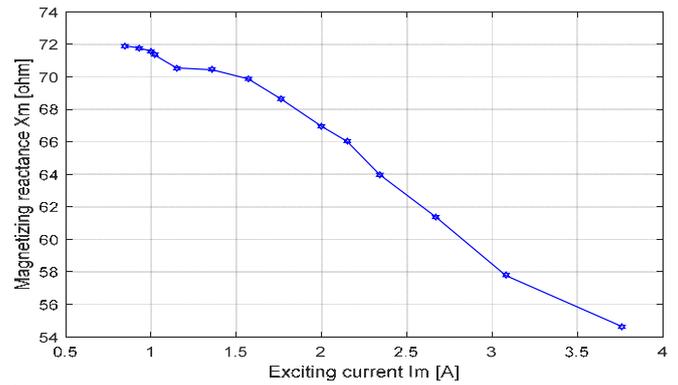


Рис.6. Изменение намагничивающего реактивного сопротивления в зависимости от тока намагничивания.

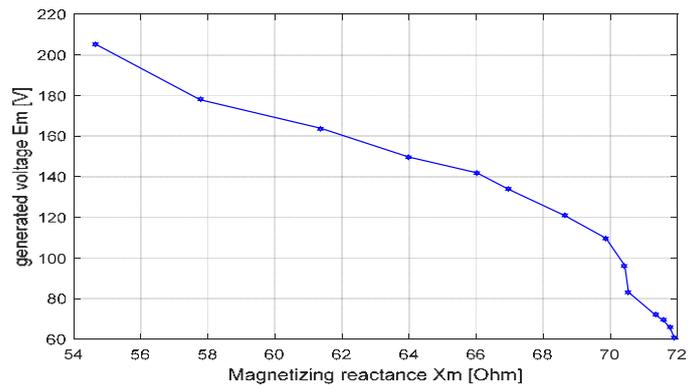


Рис.7. Изменение ЭДС с сопротивлением намагничивания.

Следующий опыт - нагрузочное испытание с переменной нагрузкой при постоянной напряжения и скорости вращения ( $n=1500$ об/мин,  $V_t=220$  В)

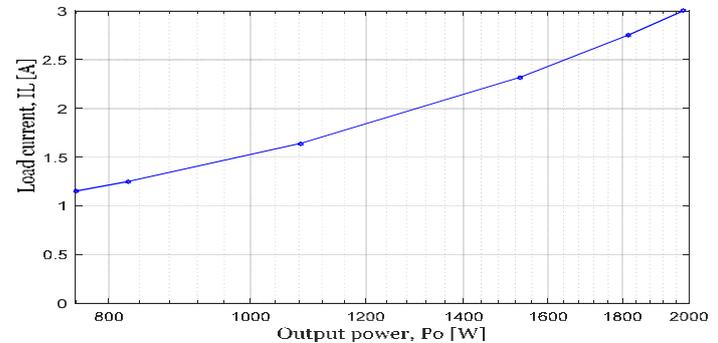


Рис.8. Зависимости параметров машины от выходной мощности и нагрузки.

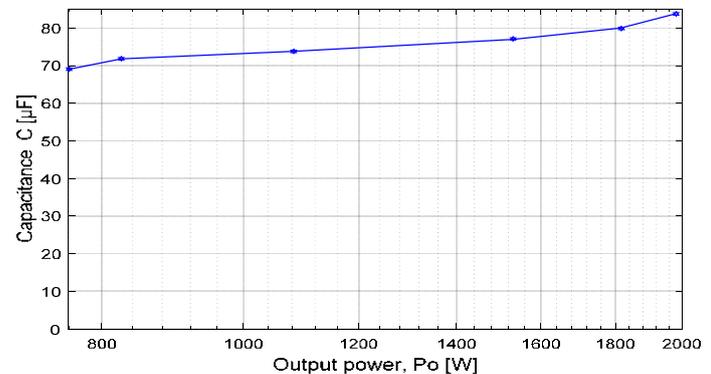


Рис.9. Зависимости параметров машины от выходной мощности и ёмкости.

Таблица I. РЕЗУЛЬТАТЫ НАГРУЗОЧНЫХ ОПЫТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЕМКОСТЯМИ  
( $U_{\phi}=220$  В,  $N=1500$  об/мин).

Асинхронный генератор (АГ)								Двигатель постоянного тока.			
№ п.	$I_{ген},$ А	$I_{наг},$ А	$C,$ μКФ	$X_c,$ Ом	$I_c,$ А	$R_{наг},$ Ом	$R_{ген},$ Вт	$U_{возб},$ В	$I_{возб},$ мА	$U_{якр},$ В	$I_{якр},$ А
1	4	0	63,8	49,12	4,00	∞	0	68,4	33,8	151,2	2,4
2	4,90	1,15	69	46,13	4,77	191,30	759	67,9	33,1	178,4	7,2
3	5,11	1,25	71,8	44,33	4,96	176,00	825	70	34,3	182,5	7,7
4	5,35	1,64	73,8	43,13	5,10	134,15	1082,4	70,2	34,5	193,2	9,7
5	5,8	2,32	77	41,34	5,32	94,83	1 531,2	68,1	33,1	201,3	11,5
6	6,17	2,75	80	39,79	5,53	80,00	1815	68,7	33,3	210,9	13,2
7	6,52	3,0	83,8	37,98	5,79	73,33	1980	68,9	33,4	214	13,9

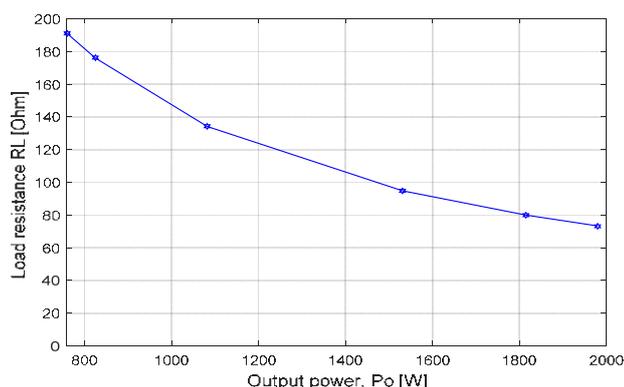


Рис.10. Зависимости параметров машины от выходной мощности и сопротивление нагрузки.

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТА ХОЛОСТОГО ХОДА

№ п.	$U_{л,xx}$ В	$I_{л,xx}$ А	$U_{ф,xx}$ В	$Z_{экв},$ Ом	$X_m,$ Ом	$E_m,$ В
1	110,6	0,85	63,855	75,123	71,407	60,696
2	120	0,93	69,282	74,497	70,781	65,826
3	126,6	1,00	73,093	73,093	69,377	69,377
4	131,2	1,02	75,748	74,263	70,547	71,958
5	151,5	1,15	87,469	76,060	72,344	83,195
6	175,6	1,36	101,383	74,546	70,830	96,329
7	200,1	1,57	115,528	73,585	69,869	109,694
8	220,6	1,76	127,363	72,366	68,650	120,823
9	244,8	2,0	141,335	70,668	66,952	133,903
10	259,7	2,15	149,938	69,739	66,023	141,948
11	274,4	2,34	158,425	67,703	63,987	149,729
12	301	2,67	173,782	65,087	61,371	163,861
13	328	3,08	189,371	61,484	57,768	177,926
14	380	3,76	219,393	58,349	54,633	205,421
15	421,034	4,51	243,084	53,899	50,183	226,325
16	464,259	5,27	268,040	50,861	47,145	248,457

## V ВЫВОДЫ

В данной работе предлагается новая система АРН, основанной на вычислении требуемой ёмкости для регулирования напряжения по ранее построенным кривым машин экспериментальным путем. Разработанная система позволяет асинхронному генератору быть конкурентоспособным в ветроэнергетике. Определены значения ёмкости для каждой нагрузки, и соответственно необходимую реактивную мощность, что позволила генератору работать устойчиво под любой нагрузкой. Стабилизация напряжения при работе в автономных системах электроснабжения и работающих параллельно с централизованным источником питания приводит к повышению экономической эффективности. Предложенная нами модель подтвердилась результатами экспериментальных работ.

## Список литературы

- [1] Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Ветроэнергетика: Справочно-Методическое издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. – М.: «Интэхэнерго-Издат», 2014. – 304с.
- [2] Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. - М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. - 88 с.
- [3] Джендубаев А-З.Р. Исследование автономного асинхронного генератора с конденсаторным самовозбуждением и параллельным соединением обмоток статора и фазного ротора. // Электричество. 2005, № 12. - С. 44-49.
- [4] А.Л. Встовский, К.С. Федий, М.Г. Архипцев, Е.А. Спирин, Система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии. Известия Томского политехнического университета 2014 г. Т.324 №4. С. 133-137.
- [5] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМ К Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288с.
- [6] T. Elango, A.Senthil Kumar, Comparison of Voltage and Frequency Regulation of Self-excited Induction Generator Different Control Techniques for Solid State Voltage Regulator, International Journal Advanced Engineering Tech/Vol. VII/Issue II/April-June,2016/1156-1162.
- [7] Dhikra Chermiti, Adel Khedher, A New Method Voltage and Frequency Regulation of Self-Excited Induction Generator Operating in Stand Alone, WSEAS Transactions on Environment and DevelopmentE, Volume 10, 2014.

# Услуги Жигулевской ГЭС, оказываемые на рынке электроэнергии и мощности в ЕЭС РФ по обеспечению системной надежности

В.С. Романов<sup>1</sup>, В.Г. Гольдштейн<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ПАО «РусГидро» - «Жигулевская ГЭС», Жигулевск, Россия

<sup>2</sup>ФБГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия

**Аннотация** – задачи по обеспечению основных показателей качества электроэнергии, напрямую связанных с системной надежностью становятся технологически обязательными услугами - «системными услугами». Регулирование частоты, мощности, напряжения, резервирование генерирующих мощностей, предотвращение и ликвидация аварий становятся организационно и экономически самостоятельными видами деятельности, без выполнения которых невозможно обеспечить надежное, качественное и экономичное функционирование ЕЭС РФ. Российский рынок электроэнергии и мощности является развивающейся структурой и вопрос оплаты системных услуг на данный момент решен частично, где не в полной мере учтены интересы всех участников рынка электроэнергии и мощности.

**Ключевые слова** – рынок электроэнергии и мощности; системные услуги; режимы работы; системная надежность.

## Services Zhigulevskaya HPP provided in the electricity market and capacity in UES of the Russian Federation to ensure system reliability

V.S. Romanov<sup>1</sup>, V.G. Goldstein<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The branch of JSC "RusHydro" - "Zhigulevskaya HPP", Zhigulevsk, Russia

<sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia

**Abstract**— the task of providing the main indicators of power quality directly related to system reliability become technologically mandatory services "system services". The regulation of frequency, power, voltage, backup power generation facilities, prevention and liquidation of accidents are organizationally and economically independent activities, without which it is impossible to provide a reliable, quality and economical functioning of the UES of Russia. The Russian market of electricity and power is a developing structure and payment system services has been solved partially or not fully taken into account the interests of all participants of electricity market and power.

**Keywords**— electricity Market and power system services; modes of operation; system reliability.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все производство, практически все распределение и большая часть потребления электроэнергии в энергосистемах выполняются на переменном токе. Поэтому параметры переменного тока приобрели значение унифицированных, в соответствии с которыми конструируются все источники, средства передачи и приемники электрической энергии. В процессе работы энергосистемы количественные показатели переменного тока могут изменяться. Чем ближе они поддерживаются к номинальным, т.е. расчетным для оборудования значениям, тем ближе режим к оптимальному и тем надежнее и безотказнее работает установленное оборудование [2].

Задачи по обеспечению основных показателей качества электроэнергии, напрямую связанных с системной надежностью становятся технологически обязательными услугами. Услуги такого рода принято обозначать термином «системные услуги». Системные услуги - это деятельность, обеспечивающая надежность работы энергосистемы и электроснабжения потребителей,

а также стабильное значение частоты и напряжения в соответствии с установленными стандартами.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 03.03.2010 №117 определены 4 вида услуг по обеспечению системной надежности:

– нормированное первичное регулирование частоты с использованием генерирующего оборудования электростанций;

– автоматическое вторичное регулирование частоты и перетоков активной мощности с использованием генерирующего оборудования электростанций (за исключением гидроэлектростанций установленной мощностью более 100 МВт);

– регулирование реактивной мощности с использованием генерирующего оборудования электростанций, на котором в течение периода оказания соответствующих услуг не производится электрическая энергия;

– развитие систем противоаварийного управления в ЕЭС России.

По мнению экспертов количество дополнительных услуг достигает 19 видов.

На сегодняшний день Жигулевская ГЭС оказывает три вида системных услуг: вторичное регулирование частоты, регулирование реактивной мощности, эксплуатацию элементов систем противоаварийного управления. Оказание системных услуг требует определенных затрат, которые должны компенсироваться субъектами энергосистем, являющимися причиной данных затрат. На данном этапе вопрос платы за оказываемые системные услуги является нерешённым.

### III. ТЕОРИЯ. ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ПЭД

Рассмотрим каждую из оказываемых системных услуг в отдельности.

#### 1) Регулирование частоты.

Частота является общесистемным параметром и определяется балансом активной мощности. При возникновении дефицита генерируемой мощности в системе происходит снижение частоты до такого значения, при котором устанавливается новый баланс генерируемой и потребляемой мощности, при избытке генерируемой мощности, наоборот, частота повышается. На рис. 1 рассмотрены статические характеристики системы по частоте и из них видно, что регулирование частоты в системе возможно только при наличии резерва активной мощности.

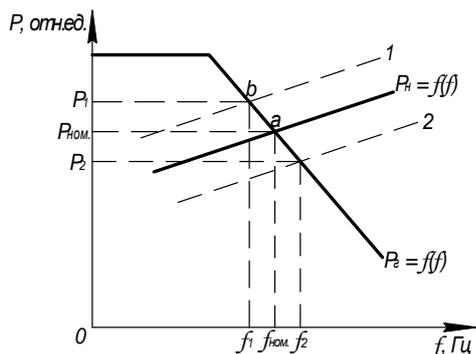


Рис. 1. Статические характеристики системы по частоте.

Согласно ГОСТ 13109—97 на качество электрической энергии частота в энергосистемах РФ в нормальном режиме должна поддерживаться с точностью  $\pm 0,05$  Гц. Допускается кратковременная (не более 72 мин в сутки) работа энергосистем с отклонением частоты в пределах  $\pm(0,2\div 0,4)$  Гц.

Жигулевская ГЭС является единственной частоторегулирующей электростанцией на европейской территории РФ. Из суточного графика нагрузки гидроагрегатов Жигулёвской ГЭС, представленного на рис. 2 видно, что гидроагрегаты Жигулевской ГЭС участвуют во вторичном регулировании частоты в энергосистеме. Электростанции вторичного регулирования частоты должны быть достаточно мощными, поддерживать необходимый диапазон регулирования, обладать хорошими маневренными качествами для компенсации всего возникшего небаланса мощности в энергосистеме.

Понятно, что в таких условиях работы детали и узлы гидроагрегатов подвергаются резким знакопеременным нагрузкам, что значительно снижает их срок службы, оборудование терпит повышенный износ и станция несёт

дополнительные убытки, связанные с увеличением издержек на ремонт и обслуживание гидроагрегатов.

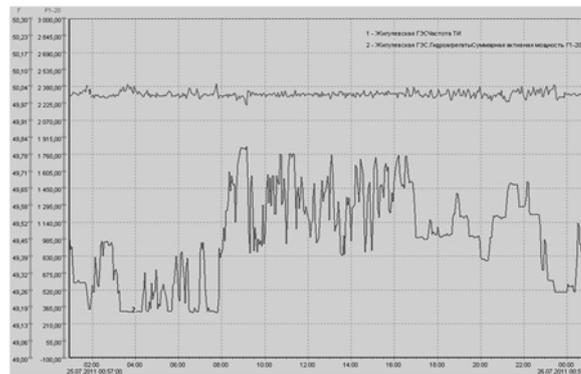


Рис. 2. Суточный график нагрузки гидроагрегатов Жигулёвской ГЭС.

При формировании тарифов за вторичное регулирование частоты в энергосистеме необходимо учесть опыт реализации данного вида услуг в зарубежных странах, из которого можно выделить три основных подхода:

а) компенсация упущенной выгоды. Для каждого генератора, используемого для предоставления услуг АРЧМ, анализируется отклонение от оптимального уровня нагрузки, заданного кривой оптимизации нагрузки. Определяется коэффициент потери эффективности (0.25 - 0.29 для разных типов турбин), умножение которого на среднее время отклонения от оптимального графика нагрузки и цену электроэнергии, дает базу для расчета величины компенсации.

б) определяется интервал времени, в течение которого генераторы предоставляют свою мощность в распоряжение Системного Оператора с определенным текущим уровнем нагрузки (выработки) и определенными границами отклонения от этого уровня вверх и вниз. Тогда, как правило, определяется размер платы за час регулирования. Процедура расчета компенсации упущенной выгоды генератора, рассчитывается на основе разницы между фактической и потенциальной величиной выработки при сложившемся уровне оптовых цен на электроэнергию. Зная процедуру расчета, конкурирующие поставщики резерва АРЧМ подают заявки с предложением цены часа регулирования Системному Оператору, который на основе ценового аукциона решает задачу выбора оборудования в складывающихся системных условиях.

в) определение стоимости каждого регулирующего импульса. Если система АРЧМ предусматривает возможность дискретизации управляющих воздействий с минимальным стандартным шагом, то генераторы, предоставляющие услуги АРЧМ могут конкурировать по цене регулирующего импульса. В этом случае Системному Оператору приходится рассчитывать некое оптимальное суммарное число импульсов в течение часа регулирования, и уже потом решать задачу выбора оборудования для реализации АРЧМ.

Каждый из выделенных подходов в равной степени применим к действующей экономической модели российской энергетики.

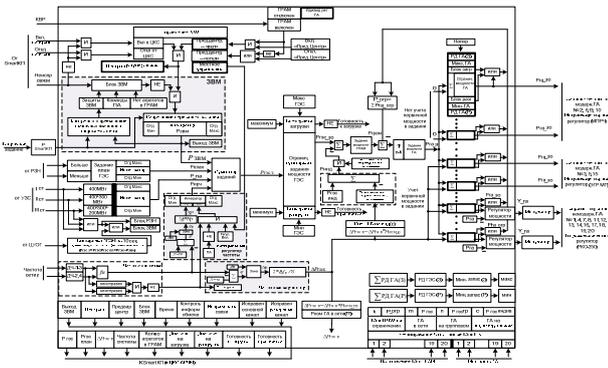


Рис. 3. Функциональная схема МПЦР Жигулевской ГЭС.

Благодаря реализации комплексной программы компании ОАО «РусГидро» по реконструкции оборудования Жигулевской ГЭС и накопленный 50-летний опыт свидетельствуют, что станция полностью готова к конкурентному оказанию услуг АРЧМ. Смонтировано новое устройство ГРАМ, которое предназначено: 1) для участия Жигулевской ГЭС во вторичном регулировании режима работы ЕЭС путем приема и реализации вторичного задания от ЦКС АРЧМ ЕЭС; 2) участия Жигулевской ГЭС в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) в ЕЭС путем автоматического изменения мощности подключенных гидрогенераторов при изменении частоты в сети в соответствии с заданным статизмом первичного регулирования и зоной нечувствительности по частоте; 3) поддержания заданной мощности Жигулевской ГЭС (при неизменной частоте и задании от ЦКС АРЧМ ЕЭС).

Функциональная схема микропроцессорного центрального регулятора (МПЦР), являющегося одной из главных подсистем ГРАМ, представлена на рис. 3. МПЦР получает плановое задание мощности ГЭС ( $P_{\text{ПЛАН}}$ ) от дежурного персонала ГЭС, вторичное (внеплановое) задание ( $P_{\text{ЗВМ}}$ ) от устройств взаимодействия с ЦКС АРЧМ ЕЭС, задание на противоаварийное изменение мощности ( $P_{\text{ПА}}$ ) от устройств взаимодействия с ПА и формирует задание ГЭС ( $P_{\text{ГЭС з}}$ ), данное задание мощности равномерно распределяется между агрегатами, подключенными к ГРАМ с учетом их индивидуальных ограничений и особенностей.

Система АРЧМ Жигулевской ГЭС является достаточно гибкой системой с широкими функциональными возможностями. Именно поэтому Жигулевская ГЭС занимает лидирующее место на рынке системных услуг среди гидроэлектростанций своего класса в области регулирования частоты.

#### 2) Регулирование реактивной мощности.

При нормальных рабочих условиях все потребители электрической энергии, чей режим сопровождается постоянным потреблением реактивной энергии (электродвигатели, оборудование сварки, люминесцентные лампы и многое др.) нагружают сеть как активной, так и реактивной составляющими полной потребляемой мощности. Эта реактивная составляющая мощности необходима для работы оборудования содержащего значительные индуктивности и является дополнительной нагрузкой на сеть. Однако небаланс реактивной мощности может привести к серьезному экономическому ущербу [1].

При создании полноценного рынка услуг по регулированию реактивной мощности и напряжения

многие страны сталкиваются с проблемой однозначного понимания того, что именно является предоставляемой и приобретаемой услугой, кто должен быть ее продавцом или покупателем. Это обусловлено как спецификой физической сущности реактивной мощности, так и особенностями ее генерации и потребления и возможностями локального регулирования уровней напряжения в сети. При этом недостаточная оснащенность средствами компенсации реактивной мощности приводит к сложностям в регулировании напряжения в отдельных узлах ЕЭС России. Неудовлетворительное состояние средств компенсации реактивной мощности в отдельных узлах электрической сети приводит к тому, что генерирующее оборудование электростанций становится фактически единственным эффективным средством поддержания допустимых уровней напряжения в этих узлах и прилегающих к ним участках сети.

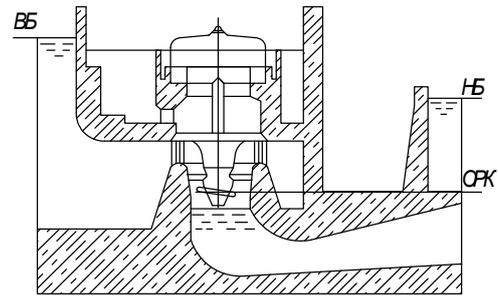


Рис. 4. Работа гидроагрегата Жигулевской ГЭС в режиме СК.

Будучи основным источником реактивной мощности в электроэнергетической системе, генераторы электростанций одновременно являются важнейшими средствами регулирования напряжения. Регулирование реактивной мощности в системе осуществляется путём изменения тока ротора работающих генераторов с соответствующим переводом их в режим перевозбуждения, либо недо возбуждения. При недостаточной выдаче реактивной мощности для поддержания баланса в системе на Жигулевской ГЭС реализована дополнительная возможность – перевод гидроагрегатов в режим синхронного компенсатора (далее СК). Применение генераторов, работающих в режиме СК, является эффективным средством предотвращения недопустимых отклонений напряжения в прилегающей сети. В режиме СК генератор работает как синхронный двигатель с относительно небольшой механической нагрузкой, потребляя из сети активную мощность и выдавая или потребляя реактивную.

Перевод агрегата из генераторного режима в режим синхронного компенсатора осуществляется закрытием направляющего аппарата и последующим отжатием воды из зоны рабочего колеса (рис. 4). При этом увеличивается диапазон регулирования реактивной мощности генератором и не происходит расход энергоресурса. Однако при переводе генератора в двигательный режим происходит потребление им из сети активной мощности порядка 2,4 МВт. Так же следует учитывать работу компрессоров, необходимых для создания избыточного давления воздуха в зоне камеры рабочего колеса гидроагрегата. Энергопотребление компрессоров составляет 0,9 МВт. В итоге получается, что в режиме СК генератор потребляет из сети 3,3 МВт. Анализ информации о работе генераторов в режиме СК показал, что такой режим широко и стабильно востребован.

Возможность регулирования реактивной мощности изначально заложена в конструкцию генераторов, что делает реактивную мощность, получаемую от генераторов на электростанциях, наиболее дешевой. Однако работа этих машин в режиме синхронного компенсатора сопряжена с определенными затратами, возместить которые способен только рынок системных услуг.

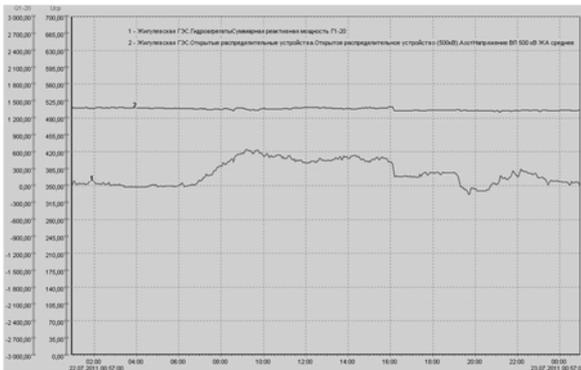


Рис. 5. График регулирования напряжения и реактивной мощности.

генераторами Жигулевской ГЭС

На рис. 5 представлен график регулирования напряжения и реактивной мощности генераторами Жигулевской ГЭС. Из него видно, что генераторы участвуют в непрерывном регулировании напряжения и реактивной мощности, а не только в период минимальных нагрузок, когда избытки реактивной мощности необходимо принудительно потреблять, в том числе и путем перевода режима работы генераторов в емкостный квадрант. Именно поэтому плата за данный вид услуг должна охватывать весь период регулирования. Имеется ввиду, что данные услуги должны оплачиваться, если параметры регулирования выходят за пределы согласованных значений (например, для генераторов в пределах  $-0,2 < \text{tg}\varphi < 0,4$  не оплачиваются, а за пределами указанных значений подлежат оплате; для потребителей с  $\cos\varphi=1$  не оплачиваются, при иных значениях  $\cos\varphi$  подлежат оплате и т. д.) [4].

На данный момент на Жигулевской ГЭС происходит комплексная модернизация системы регулирования напряжения и реактивной мощности. Устанавливаемая система группового регулирования напряжения и реактивной мощности (ГРПМ) предназначена для автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности ГЭС по сигналам задания, поступающим со станционного и вышестоящего уровней управления, а также формируемым в самой системе по отклонению частоты с распределением нагрузки между агрегатами по заданному критерию. Данное устройство автоматики является одной из подсистем АСУ ТП Жигулевской ГЭС и обеспечит более быстрое, точное и надежное регулирование напряжения и реактивной мощности в системе.

3) эксплуатация элементов систем противоаварийного управления.

Основу системы противоаварийной автоматики (далее ПА) ОЭС Средней Волги составляют три централизованных комплекса противоаварийной автоматики сети 500 кВ, расположенные на Жигулевской ГЭС, Балаковской АЭС и Заинской ГРЭС.

Централизованный комплекс ПА Жигулевской ГЭС предназначен для:

- сохранения устойчивости при транзитных перетоках мощности между ОЭС Центра и ОЭС Средней Волги по Северному транзиту 500 кВ;
- обеспечения противоаварийного управления при нарушениях режима работы Жигулевской ГЭС;
- реализации команд на автоматический пуск и загрузку генераторов;
- ретрансляции сигналов и команд противоаварийной автоматики по устройствам передачи аварийных сигналов и команд – УПАСК.

Противоаварийная автоматика Жигулевской ГЭС обеспечивает статическую и динамическую устойчивость ОЭС Средней Волги, что является ключевым фактором системной надёжности. К сожалению, вопрос оплаты данного вида услуг не решен.

#### IV. Выводы и заключение

В заключение хотелось бы отметить, что у Жигулевской ГЭС, как и у ряда российских станций, есть возможность строить операционную стратегию на продаже дополнительных системных услуг участникам российского оптового рынка электроэнергии Системному Оператору и ФСК (плавка гололёда). Регулирование частоты, мощности, напряжения, резервирование генерирующих мощностей, предотвращение и ликвидация аварий становятся организационно и экономически самостоятельными видами деятельности, без выполнения которых невозможно обеспечить надёжное, качественное и экономичное электроснабжение. Именно поэтому системные услуги должны являться товаром таким же как электроэнергия, мощность.

На развитых рынках в электроэнергетике распределение доходов между рынком электроэнергии и рынком мощности равномерное и характеризуются сбалансированным развитием разных сегментов. Рынок системных услуг является элементом, который позволяет генерации получить средства, необходимые для модернизации оборудования и содержания его в надлежащем состоянии. Российский рынок электроэнергии и мощности является развивающейся структурой и проблеме оплаты системных услуг не уделялось должного внимания. Однако на данном этапе функционирования рынка Правительство РФ совместно с Системным Оператором вплотную подошли к решению данного вопроса, примером служит постановление правительства №117. Именно поэтому рынок электроэнергии и мощности претерпевает изменения, которые приведут к созданию более развитого и стабильного рынка.

#### Список литературы

- [1] Минин, Г.П. Реактивная мощность / Г.П. Минин. – М. : Энергоатомиздат, 2003. – 88 с.
- [2] Романов, А.А. Информационно-измерительная система АСУ-ТП гидроэлектростанций : автореф. дис. канд. техн. наук : защищена 12.02.1996 : утв. 24.06.1996 / А.А. Романов. – Москва : Издательство СамГТУ, 1996. - 25 с.
- [3] Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.] – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
- [4] Шкатов, В.Н. Системные услуги на рынке электроэнергии / В.Н. Шкатов // Журнал «Энергорынок» - 2010. - №9. – С. 15-19.

# УСТРАНЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ГРАФИКА ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ЗАЯВЛЕННОГО МАКСИМУМА

Р.В. Майдак  
Филиал ОАО «СО ЕЭС» Курское РДУ, Курск, Россия  
E-mail: [roman\\_maidak@mail.ru](mailto:roman_maidak@mail.ru)

*Аннотация* - иногда электрические станции при изменении погодных условий или технологического процесса производства электроэнергии не могут подтвердить свой максимум генерации активной мощности, заявленный на рынке электроэнергии. Чтобы не терять экономическую выгоду, получаемую от заявленного максимума, часто станции утаивают эту информацию. В конечном итоге это ведет к необоснованным денежным выплатам станциям за заявленный максимум, а также в случае аварии к ухудшению электроэнергетического режима. Выработаны определённые мероприятия, направленные на проверку заявленного максимума, тем самым они не позволяют обманывать станциям рынок электрической мощности. Но, всегда станции находят лазейки получать прибыль не обеспечивая заявленный максимум. Основная задача в рассматриваемом вопросе это устранение всех попыток обмана станциями рынка электрической мощности и в конечном итоге потребителя электроэнергии.

*Ключевые слова* - максимум активной мощности, допустимые отклонения, график генерации, собственная и внешняя инициатива, ограничения по выдаче мощности.

## THE ELIMINATION OF THE DEVIATION GRAPH GENERATION POWER PLANTS THE HIGH

R. V. Maydak  
The branch of JSC "so UES" RDU Kursk, Kursk, Russia  
E-mail: [roman\\_maidak@mail.ru](mailto:roman_maidak@mail.ru)

*Abstract* - sometimes the power station when weather conditions change or the technological process of production of electricity can not confirm your high generation of active power, as stated in the electricity market. In order not to lose the economic benefits derived from the stated maximum, the station often conceal this information. In the end it leads to unwarranted cash payments to the stations for the high, and in the event of an accident to a deterioration in the electricity regime. Developed specific measures aimed at the verification of the declared maximum, thus they do not allow to deceive stations electric capacity market. But the station is always finding loopholes to profit without providing the stated maximum. The main task in this question is the elimination of all attempts to defraud stations capacity market and ultimately consumers of electricity.

*Key words* - maximum active power, permissible deviations, graph generation, own and external initiative, restrictions on the distribution of power.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Электрические станции, работающие на оптовом рынке электроэнергии Российской Федерации, получают основную прибыль за выработанную электроэнергию в мегаватт час и предоставляемый максимум активной мощности мегаватт. Если за первую составляющую дохода электрических станций всё ясно, а именно сколько выработал электроэнергию, столько и получил, то за вторую – нет. В тёплые дни, как правило, при температуре окружающего воздуха, двадцать градусов Цельсия и выше, не все электрические станции могут подтвердить свой максимум активной мощности.

### II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Электрическая станция заявляет максимум по станции 10 мегаватт, но по факту с 10 до 18 часов может генерировать лишь 9,1 мегаватт, то есть на протяжении 8 часов отклонение будет составлять 0,9 мегаватт или 900

киловатт. Таким образом, на протяжении восьми часов станция: не подтверждает заявленный максимум, необоснованно получает деньги за завышенный максимум. Однако, исходя из требований оптового рынка, такое отклонение допустимо и не наказывается экономически, так как оно не превышает одного мегаватт. Таких станций лишь в одном субъекте федерации может быть несколько, а в пределах страны несколько сотен и тогда отклонения будут исчисляться сотнями мегаватт. В такой ситуации выгоду получают электрические станции, так как расходуют меньше топлива, а деньги получают за завышенную заявленную мощность. Потребители - мы с вами, остаёмся в проигрыше, так как в конечном итоге все издержки закладываются в киловатт час субъекта федерации.

Проведём расчёт, согласно которому электрическая станция необоснованно зарабатывает деньги. При цене 1000 рублей за 1 мегаватт электрической энергии,

отклонение от заявленного максимума считается с учётом понижающего коэффициента К, который составляет 0,2.

$$C = K * 1000 * (P_{\text{заявл.}} - P_{\text{факт.}}) = 0,2 * 1000 * (10 - 9,1) = 180, \quad (1)$$

где С – выгода станции (рубль),  $P_{\text{заявл.}}$  – заявленный максимум станции (мега Вт),  $P_{\text{факт.}}$  – фактический максимум станции (мега Вт).

При не обеспечении заявленного максимума на протяжении 8 часов, общая выгода станции будет составлять:

$$C_{\text{общ.}} = 8 * 180 = 1440, \quad (2)$$

где  $C_{\text{общ.}}$  – выгода станции на протяжении 8 часов (рубль).

В понятие 8 часов вкладываем невозможность станции обеспечивать заявленный максимум на протяжении дня. Если в течение месяца температура окружающего воздуха не менее 15 дней будет выше 20 градусов Цельсия, то общая выгода станции будет составлять:

$$C_{\text{мес.}} = 1440 * 15 = 21600, \quad (3)$$

где  $C_{\text{мес.}}$  – выгода станции в течение месяца (рубль).

Посчитаем выгоду станции в течение трёх летних месяцев.

$$C_{\text{лет.}} = 3 * 21600 = 64800, \quad (4)$$

где  $C_{\text{лет.}}$  – выгода станции в течение трёх летних месяцев (рубль).

Из расчётов видно, что начиная со 180 рублей в день, мы выходим на 64800 рублей за летний период. 64800 рублей – это та сумма, которую станция необоснованно получит, в конечном итоге эту сумму заплатит потребитель, фактически не получив ничего взамен.

Помимо экономических составляющих, решается вопрос с фактическим обеспечением максимума активной мощности, что важно в аварийных ситуациях. В пики потребления электрической энергии возникает дефицит электрической мощности, который устраняется загрузкой электрических станций по активной мощности. Если станция, с двумя работающими генераторами, заявляет максимум 20 мега Ватт, а по факту сможет набрать лишь 18,2 мега Ватт, по 9,1 мега Ватт на каждом генераторе, то отклонение от заявленного максимума составит:

$$\text{Ротк} = 20 - (9,1 + 9,1) = 1,8 \text{ мега Ватт} \quad (5),$$

где  $\text{Ротк}$  – величина отклонения электрической мощности электростанции от заявленного максимума.

Максимальная величина  $\text{Ротк}$  достигает в наиболее теплые часы суток, т.к. при высокой температуры генераторы не могут набрать заявленный максимум активной мощности по ряду причин, таких как высокая температура горячих газов в камере сгорания газотурбинных установок, ухудшенный вакуум в конденсаторах паротурбинных установок, высокая температура охлаждающих газов и другие.

В момент времени, когда потребуются резервы активной мощности – это в максимум её потребления, в энергосистеме требуется загрузить работающие генераторы до заявленного максимума. Станция с отклонением  $\text{Ротк} = 1,8$  мега Ватт не выдаст в общую электрическую сеть 1,8 мега Ватт, а уже сто таких станций не выдадут 180 мега Ватт. Существенного влияния на электроэнергетический режим страны величина 180 мега Ватт не окажет, но в случае аварийных ситуаций, например, неспособность по техническим причинам гидрогенераторам набрать максимум активной

мощности, произойдёт дополнительное снижение частоты электрического тока. Снижение частоты электрического тока возникает при дефиците активной мощности. Частота электрического тока является одной из составляющей качества электрической энергии и надёжности электроэнергетического режима. В июне 2016 года возникла нештатная ситуация в единой энергетической сети России, при которой в максимум потребления электрической мощности, генераторы, находящиеся в резерве не смогли обеспечить свой заявленный максимум, это привело к снижению частоты электрического тока. Одной из причин этого явилось допустимое отклонение 1 мега Ватт для генераторов мощностью менее 150 мега Ватт и 3 мега Ватт для генераторов мощностью менее 150 мега Ватт. Изначально кажется, что величина 1 и 3 мега Ватт - это мало, но в масштабе всей энергосистемы таких генераторов может быть несколько сотен и тогда величина отклонений может составлять сотни мега Ватт. Это приведёт к ещё большему отклонению частоты электрического тока. При снижении частоты электрического тока ниже допустимых пределов происходит не обеспечение условий договора электроснабжения потребителя качественной электроэнергией, потребитель может законно потребовать компенсацию за некачественную поставленную электроэнергию. Соответственно это дополнительные убытки как для электроснабжающих организаций, так и для потребителя. У потребителя могут возникнуть неисправности и повреждения оборудования, особо чувствительны к снижению частоты электрического тока электронно-вычислительные комплексы.

### III. ВЫВОДЫ

Необходимо ужесточить штрафные санкции по отношению к электрическим станциям, отклоняющимся от заявленного максимума на величину менее 1 мегаватта. Эта мера вынудит станции при невозможности обеспечивать заявленный максимум, изменять его в сторону уменьшения, тем самым оплата за предоставляемую мощность будет производиться исходя из фактической возможности генерирующего оборудования. В аварийной ситуации можно будет рассчитывать на реальный заявленный максимум активной мощности, что необходимо для поддержания частоты электрического тока. В конечном итоге выгоду получает потребитель электроэнергии, потому что не оплачивает неоправданную мощность электрических станций. Также принятые меры позволят снизить стоимость кило Ватта электроэнергии в Российской Федерации.

### Список литературы

- [1] Федеральный Закон «Об электроэнергетике». Москва, 2003. - С. 10 – 11. // СПС Консультант Плюс.
- [2] Технические требования к генерирующему оборудованию участников оптового рынка от 01.01.2017. АО «СО ЕЭС». - С. 47.
- [3] Порядок установления соответствия генерирующего оборудования участников оптового рынка техническим требованиям от 01.02.2017. АО «СО ЕЭС». - С. 126.

## Секция № 7

### ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

- Программы и методики повышения квалификации работников
- Реновация образовательных процессов профильных кафедр вузов по подготовке специалистов для электроэнергетической отрасли
- Развитие систем тренажерной подготовки



## Section № 7

### EDUCATIONAL TECHNOLOGIES AND TRAINING PROGRAMS FOR ELECTRICAL POWER INDUSTRY

- Professional advancement programs and methods
- Educational process renovation at university departments preparing specialists for power industry
- Training systems development

# ОРИЕНТИРОВАННАЯ ДОВУЗОВСКАЯ ПОДГОТОВКА УЧАЩИХСЯ ДЛЯ ПАО «РУСГИДРО»

А.И.Тухватуллин, А.Ю.Кузьмин  
ФГАОУ ВО «Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета»  
г. Саяногорск, рп. Черемушки, Россия  
fergys.1@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** в рамках Концепции подготовки кадров ПАО «РусГидро» на базе Корпоративного университета в р.п. Черёмушки были созданы энергоклассы для учащихся 9—11 классов, направленные на довузовскую подготовку школьников по направлению Электроэнергетика и электротехника.

Профильная дисциплина «Электроэнергетика» преподаётся в объеме 12 часов. Большое внимание в рамках данной дисциплины уделяется вопросам энергосбережения и энергоэффективности.

**Материалы и методы:** Для учебно-методического комплекса дисциплины «Электроэнергетика» разработан анимационный фильм «Энергосбережение». Создание анимационного фильма было выполнено в программах: «Adobe Photoshop», «Movavi video Editor 2011», «Toon Boom Animate».

**Результаты:** Создан учебно-методический комплекс, разработан анимационный фильм, который используется при изучении данной дисциплины.

**Выводы:** Создан фильм на одну из самых актуальных проблем – энергосбережение, который позволяет учащимся на ступени довузовского обучения ознакомиться с основными направлениями в данной области.

*Ключевые слова — довузовское образование, энергосбережение, энергоэффективность, подготовка кадров.*

## ANIMATED CARTOON AS ONE OF THE COMPONENTS OF LEARNING

Tuhvatullin Artem, Kuz'min Aleksej  
The Sayano-Shushenskaya branch of the Siberian Federal University  
Sayanogorsk, Cheremushki, Russia  
fergys.1@mail.ru

## Abstract

**Background:** in the framework of the Concept of personnel training of JSC "RusHydro" on the basis of Corporate University in R. p. Cheremushki was created energieklass for students in grades 9-11 to pre-University training in power and electrical engineering.

Core subject electrical power engineering is taught 12 hours. Much attention in this discipline is paid to the issues of energy conservation and efficiency.

**Materials and Methods:** educational-methodical complex of the discipline "electric power" developed by the animated film "Saving". The animation movie was made in the programs: "Photoshop", "Movavi video editor 2011", "toon boom animate".

**Results:** created educational-methodical complex developed an animated film which is used in the study of this discipline.

**Conclusions:** the Created movie to one of the most relevant problem – saving, which allows students at the stage of pre-University training to familiarize with the main trends in this area.

**Keywords — pre-University education, energy conservation, energy efficiency, training.**

В настоящее время в ведущих энергетических компаниях России заметно «старение» кадров. Средний возраст специалистов-инженеров – около 47 лет. На повестке дня стоит задача обеспечения притока новых молодых кадров и создание системы преемственности в инженерной деятельности.

Современные выпускники школ слабо ориентированы на технические вузы. Так, например, ЕГЭ по физике сдает всего лишь 20% выпускников страны, что существенно снижает приток абитуриентов в профильные вузы.

Таким образом, перед компанией «РусГидро» серьезно встал вопрос о стратегическом управлении кадрами

ресурсами и разворачивании проектов, способных обеспечить работу гидроэнергетических объектов в перспективе 10–20 лет.

С этой целью в сентябре 2010 года в компании была утверждена Концепция опережающего развития кадрового потенциала Общества «От Новой школы к рабочему месту» и Программа ее реализации, цель которой - выстраивание системы стратегического управления человеческими ресурсами.

В рамках программы на базе Корпоративного университета «РусГидро» были созданы энергоклассы - внешкольные занятия для учащихся 9—11 классов, направленные на усиленную довузовскую подготовку и развитие технических способностей школьников. Такой энергокласс в р.п. Черёмушки существует с 2011 года. Для школьников разработана образовательная программа с привлечением ведущих специалистов Саяно-Шушенской ГЭС и преподавателей Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета. Среди равных прочих дисциплин учащимся читается «Электроэнергетика». В 2016 году был создан учебно-методический комплекс (УМК) по данному предмету. Объём дисциплины в рамках учебного плана составляет 12 часов, из которых 6 часов уделено вопросам энергосбережения и энергоэффективности. Предусмотрены виды занятий: лекции, практики, тестирование. Разработаны презентационные материалы, текстовая часть к ним, тесты, темы практических занятий, анимационный фильм. Наибольший интерес у учащихся, с точки зрения образовательного процесса, вызывает анимационный фильм по энергосбережению.

Фильм наглядно объясняет: что такое энергосбережение, зачем оно нужно, а также расскажет о методах сбережения электроэнергии.

В среднем 1 минута фильма может заменить 2 тысячи слов. В то же время, в отличие от фото, анимация намного информативнее. Если текст или фото охватывают только один из способов демонстрации процесса или явления, то фильм - это их комбинация. Анимационный фильм идеально подходит для уроков, описания научных открытий. Приведенные аргументы являются большим достоинством данного метода преподавания

Создание анимационного фильма осуществляется в несколько этапов. В основе фильма лежат общеизвестные факты об энергосбережении: энергосберегающие лампы, режим использования электроприборов и т.д. Идея фильма является фундаментом всего анимационного процесса. Сценарий развивает идею, добавляет конкретики – это второй этап создания. Он повествует о различных технологиях энергосбережения. Третьим этапом была выполнена раскадровка. Это самый трудоемкий этап. Изначально от руки на листах бумаги «отрисовывались» фоны, персонажи и т.д. После каждый кадр был перенесен в электронный вид с использованием программ «Adobe Photoshop», «Toon Boom Animation».



Рис.1 Корректировка фонов в «Adobe Photoshop»

Затем была произведена корректировка кадров. На последнем этапе был выполнен монтаж анимационного фильма. Монтаж выполнялся в программе «Movavi Video Editor».

Фильм демонстрируется пять минут, на его создание было затрачено более 480 часов.

#### ВЫВОДЫ

1. Сложилась и устойчиво развивается система довузовской подготовки кадров для ПАО «РусГидро».
2. Данная система улучшает подготовку специалистов.
3. Создание УМК и их наполнение позволяет профессионально ориентировать выпускников школ.
4. Создание профильных фильмов способствует адекватному восприятию будущей профессии.

#### Список литературы

- [1] Солдатенков В. Ю. Концессионная форма хозяйствования в электроэнергетике России: целесообразность и перспективы развития / В.Ю. Солдатенков // Управление экономическими системами: электронный научный журнал, 2011. - № 1 (25). - № гос. рег. статьи 0421000034/. – Режим доступа к журн.: <http://uecs.mcnip.ru>
- [2] Об образовании в Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ
- [3] Актуальные задачи и пути их решения в области кадрового обеспечения электро- и теплоэнергетики/НИУ «МЭИ» - Москва 2016, 168 с.
- [4] Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации"
- [5] КОНЦЕПЦИЯ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО РАЗВИТИЯ КАДРОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ПАО «РусГидро» - Москва 2010, 153 с.
- [6] Гидроэлектростанции в XXI веке : сборник материалов IV Всероссийской науч.-практич. конф. / под. ред. В.В. Татарникова. Саяногорск; Черемушки: Сибирский федеральный университет; Саяно-Шушенский филиал, 2017. – 344 с.

# ПРОГРАММА ПРОФОРИЕНТАЦИИ И ПОДГОТОВКИ «ШКОЛА-ВУЗ-ПРЕДПРИЯТИЕ»: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А.С. Королев<sup>1</sup>, Л.Г. Мигунова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>БФ «Надежная смена», Москва, Россия, <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, Россия

## Аннотация

Деятельность Благотворительного Фонда «Надежная смена» совместно с крупнейшими ВУЗами страны основана на создании базовых знаний для специалистов отраслей топливно-энергетического комплекса.

Лучшие школьники начинают свой путь в энергетику с нашего курса «Введение в специальность». Активная работа со студентами профильных ВУЗов развивает их профессиональные и личностные качества. Молодые специалисты топливно-энергетических компаний совершенствуют свои профессиональные навыки.

Фонд сотрудничает со школами, гимназиями, лицеями, проводит отбор среди технически одаренных учащихся, формируя группы для подготовки к обучению в профильных ВУЗах, привлекает к работе по профессиональной ориентации сотрудников предприятий электроэнергетической отрасли, преподавателей базовых кафедр ВУЗов. Фонд осуществляет сопровождение учащихся – участников проектов во время обучения в ВУЗе и в период профессиональной адаптации.

Комплексный подход в создании единого блока профориентации и подготовки молодых специалистов «Школа-ВУЗ-Предприятие» позволяет подготовить надежную смену профессиональных работников новой формации для отраслей ТЭК и МСК.

**Ключевые слова:** Профориентация, подготовка специалистов, введение в специальность, надежная смена, профильные ВУЗы.

## THE PROGRAMME OF PROFESSION-ORIENTED WORK AND TRAINING «SCHOOL-HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENT-PLANT»: RESULTS AND PERSPECTIVES

A.S.Korolev<sup>1</sup>, L.G.Migunova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Charity Fund «Reliable Shift», Moscow, Russia, <sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia

## Abstract

The work of charity fund «Reliable shift» in collaboration with the greatest educational establishments of our country is based on fundamental knowledge creation about power complex.

The best pupils come to know energetics with the help of our course «Introduction to the major». Active work with students of specialized institutions develops their professional and personal characteristics. Young specialists of different power companies perfect their professional skills.

The fund cooperates with schools, gymnasiums, lyceums and chooses the best pupils, thus forming groups to be taught at the specialized higher educational establishments. It also helps to attract teachers to profession-orientated work. The fund helps students while studying at the university and during adaptation period.

Complex approach in creation of «School-Higher educational establishment-Plant» block helps to prepare reliable shift of professional workers for different branches of power plants.

**Key-words:** Profession-orientated work, teaching of specialists, introduction to the major, reliable shift, specialized institutions.

Фонд образовательных проектов «Надежная смена» основан в 2007 году по инициативе руководителей АО «Системный оператор Единой энергетической системы».

К тому времени в электроэнергетике объективно назрела необходимость системной работы по созданию кадрового потенциала для отрасли. При этом молодежь мало знала об электроэнергетической отрасли и

востребованных в ней профессиях, потому что в школах и лицеях практически не было программ профессиональной ориентации, нацеленных на потребности рынка труда.

Основными задачами фонда являются:

- Поддержка образовательных проектов, направленных на активное выявление и реализацию интеллектуальных и творческих способностей школьников.

- Содействие в поощрении научно-практической и творческой деятельности школьников и студентов.

- Оказание помощи в повышении квалификации и овладении новыми методиками преподавателями школ и ВУЗов.

- Содействие в создании единого блока профессиональной ориентации и подготовки молодых специалистов (школа – вуз - предприятие).

- Оказание помощи в подготовке будущих специалистов для ОАО «Системный оператор Единой энергетической системы России», предприятий электроэнергетической отрасли.

Фонд «Надежная смена» воплотил идею системной подготовки молодежи для работы в энергетике – идею поиска и подготовки талантливых молодых людей на этапе школьного обучения, сопровождения их через освоение профессии в вузе до первого этапа трудового пути в качестве молодого специалиста.

Одно из главных направлений деятельности - проведение работы по профессиональной ориентации и профессиональному просвещению среди школьников, выявление задатков подростков, углубление и развитие их способностей.

Выбор профессии — один из главных жизненных выборов, совершаемых человеком в юном возрасте, так как выбирая профессию, он выбирает и образ жизни.

Человека, выбирающего свою будущую профессию, называют оптантом (от латин. optatio — желание, избрание). Стадия выбора должна завершиться оформлением реалистического и достаточно четкого представления о той профессиональной общности, в которую подрастающий человек в будущем включит себя.

Количество профессий в наши дни измеряется пятизначным числом, а их мир представляет собой подвижную картину. По данным же разных исследователей, девятиклассники, например, могут назвать в среднем лишь 20—26 профессий, поэтому профориентация зачастую носит стихийный характер.

Обычно к выбору будущей профессии старшеклассники приходят с полной неразберихой в умных своих головах. Отчего неразбериха? А вот от чего. Неизвестно, чем руководствоваться, выбирая профессию. Самое очевидное: школьные предметы. Хорошо идет физика с математикой - пойду в инженерный вуз. А хочешь ли ты потом с этим работать? Профессиональные намерения оказываются более устойчивыми, а овладение деятельностью проходит быстрее и эффективнее, если главной причиной выбора является ориентация на содержание предстоящей деятельности.

Программа «Школа-вуз-предприятие» дает такую возможность, посмотреть на электроэнергетику «изнутри» и пообщаться с преподавателями технических вузов, а также с работающими специалистами.

Деятельность Благотворительного Фонда «Надежная смена» совместно с крупнейшими ВУЗами страны основана на создании базовых знаний для специалистов отраслей топливно-энергетического комплекса.

Фонд сотрудничает со школами, гимназиями, лицеями, проводит отбор среди технически одаренных учащихся, формируя группы для подготовки к обучению в профильных ВУЗах, привлекает к работе по

профессиональной ориентации сотрудников предприятий электроэнергетической отрасли, преподавателей базовых кафедр ВУЗов. Фонд осуществляет сопровождение учащихся – участников проектов во время обучения в ВУЗе и в период профессиональной адаптации.

В рамках программы из числа учащихся образовательных учреждений создаются «энергетические» группы на параллели 10 и 11 классов. Лучшие школьники начинают свой путь в энергетике с нашего курса «Введение в специальность», дополнительных занятий по физике и математике, участие в научно-практических конференциях, проектные и лабораторные занятия, экскурсии на предприятия, встречи с работниками отраслевых компаний.

Постепенно теоретическая программа, по которой занимались учащиеся, была дополнена проектами, позволяющими применять полученные знания.

В 2011 году возникла идея объединить будущих энергетиков из разных регионов России. Так появился Межрегиональный летний образовательный форум «ЭНЕРГИЯ МОЛОДОСТИ», положивший начало молодежному профессиональному энергетическому сообществу.

В 2012 году стартовал ежегодный КОНКУРС ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ, рассчитанный на развитие научно-технического творчества школьников и требующий освоения практических навыков.

Система «Школа – вуз – предприятие», форум «Энергия молодости» и Конкурс инженерных решений заложили основу действующей по сей день специализированной программы для будущих энергетиков – энергогрупп Фонда «Надежная смена».

В 2015 году партнером Фонда становится Ассоциация по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия». Под эгидой Ассоциации «Глобальная энергия» стартует общероссийская конкурсная программа для школьников «Энергия старта», благодаря которой около 500 учащихся 7 – 10 классов ежегодно узнают о профессии энергетика и развивают свои умения в области научно-технического творчества.

Активная работа со студентами профильных ВУЗов развивает их профессиональные и личностные качества.

Проекты Фонда становятся более универсальными: на форуме «ЭНЕРГИЯ МОЛОДОСТИ» к школьникам и студентам присоединяются молодые специалисты энергокомпаний России, а чемпионат CASE-IN открывает ЛИГУ РАБОЧИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ, в которой принимают участие учащиеся техникумов.

Молодые специалисты топливно-энергетических компаний совершенствуют свои профессиональные навыки.

Комплексный подход в создании единого блока профориентации и подготовки молодых специалистов «Школа-ВУЗ-Предприятие» позволяет подготовить надежную смену профессиональных работников новой формации для отраслей ТЭК и МСК.

# Разработка и составление развернутой тепловой схемы первого контура энергоблока ВВЭР-1000

М.В. Чечуй, Д.И. Нестерец, Г.В. Булавкин

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"

Иваново, Россия

E-mail: [misha19950895@mail.ru](mailto:misha19950895@mail.ru)

*Аннотация* — главная цель работы с полномасштабным тренажером (ПМТ) будущих специалистов и работников АЭС – интенсификация, повышение мотивации обучения и придания ему практической направленности. Уровень знаний по технологическим системам (ТС) АЭС является определяющим фактором в обучении студентов, а так же в дальнейшей профессиональной деятельности выпускающихся специалистов, что убедительно подтверждено практикой. В настоящее время развернутая тепловая схема (РТС) первого контура энергоблока ВВЭР-1000 представлена в виде альбома схем отдельных ТС ЯППУ (ядерная паро-производящая установка). Такое представление не даёт ясной картины и понимания связей отдельных ТС между собой. А такое понимание абсолютно необходимо для изучения ТС и эксплуатации ядерного энергоблока. Поэтому представляется актуальным и совершенно необходимым разработка полной тепловой схемы первого контура энергоблока ВВЭР-1000 в виде единой схемы со всеми связями между отдельными ТС.

*Ключевые слова* — энергоблок ВВЭР-1000, подготовка специалистов АЭС, развернутая тепловая схема первого контура, технологические системы, ПМТ.

## Development and composition of the deployed thermal scheme of the first circuit of the VVER-1000 type nuclear unit

Michail Chechui ,Dmitry Nesterets, Georgiy Bulavkin

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russian Federation

E-mail: [deimas93@mail.ru](mailto:deimas93@mail.ru)

*Abstract* — the main goal of working with a full-scale simulator (FSS) of future specialists and NPP workers is to intensify, increase the motivation for teaching and give it a practical focus. The level of knowledge of technological systems (TS) of nuclear power plants is a determining factor in the training of students, as well as in the further professional activities of graduates, which is convincingly confirmed by practice. At present, the expanded cycle arrangement (ECA) of the first circuit of the VVER-1000 power unit is presented in the form of an album of individual steam turbine's (ST) TSs arrangements. Such a presentation does not provide a clear picture and understanding of the connections between individual TSs. And this understanding is absolutely necessary for the study of the TS and nuclear power unit maintenance as well. Therefore, it seems relevant and absolutely necessary to develop an expanded cycle arrangement of the first circuit of the VVER-1000 power unit in the form of a united arrangement with all the connections between individual TSs.

*Key words* — VVER-1000 type nuclear unit, training of NPP specialists, ECA, FSS, technological systems.

### ВВЕДЕНИЕ

Для реализации провозглашенного высшим руководством страны стратегического курса на увеличение производства электроэнергии на АЭС, доля которой к 2030 г. должна достигнуть 20 - 25% от её

общего объёма производства, разработана и 2 июня 2014 г. утверждена постановлением Правительства Федеральная целевая программа «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2012 - 2015 гг. и на перспективу до 2020 г.».

Цели госпрограммы – обеспечение стабильного развития атомного энергопромышленного комплекса в интересах российской экономики и безопасного использования атомной энергии, сохранение геополитических позиций России и закрепление лидирующих позиций российских компаний на мировом рынке ядерных технологий и услуг при соблюдении режима нераспространения ядерных материалов и технологий.

Госпрограмма в целом определяет возрастание значения атомной энергетики и ядерных технологий в обеспечении устойчивого развития России.

Ввод в эксплуатацию новых ЭБ АЭС приведет к созданию новых рабочих мест.

Предусматривается, в том числе, решение следующих задач:

- 1) эффективное развитие атомной электрогенерации;
- 2) комплексное решение накопленных проблем при реализации ядерных программ и обеспечение ядерной и радиационной безопасности;
- 3) укрепление инновационного потенциала российских ядерных технологий и расширение сферы их использования;
- 4) сохранение статуса ядерной державы и обеспечение геополитических интересов Российской Федерации.

В направлении расширения мощностей электрогенерации на атомных электростанциях в России будет продолжено сооружение энергоблоков ежегодно и осуществлён ввод в эксплуатацию (энергетический пуск) не менее 10 новых энергоблоков. Общая мощность действующих атомных электростанций, расположенных в России, с учётом ввода новых мощностей энергоблоков и вывода из эксплуатации 10,8 ГВт мощностей энергоблоков, выработавших назначенный ресурс, достигнет 28,1 ГВт. Производство электроэнергии атомными электростанциями в 2020 году составит не менее 184,3 млрд кВт·ч.

Ядерное образование в России в настоящий момент не способно удовлетворить будущие потребности отрасли в молодых специалистах и кадрах высшей квалификации без срочного принятия специальных мер по формированию системы подготовки.

Дефицит кадров при комплектовании АЭС составляет подготовленный оперативный персонал БПУ (Блочный пульт управления) (ВИУР - ведущих инженеров по управлению реактором и ВИУТ - ведущих инженеров по управлению турбиной).

Кадровая проблема является в настоящий момент одной из ключевых проблем ядерной отрасли.

Сложившуюся ситуацию осложняет проблема «старения» кадров. Средний возраст российских энергетиков-атомщиков составляет 45 лет, тогда как в мировой практике нормой считается 35 лет.

По мнению подавляющего большинства российских и зарубежных экспертов, ядерное образование на современном этапе в России переживает системный кризис.

Основной причиной этого кризиса является потеря управления ядерным образованием со стороны государства, отход отраслевого министерства от активного участия (планового, научно-технического, финансового, методологического) в ядерном образовании и отсутствии эффективной отраслевой программы «Закрепления молодых специалистов в отрасли».

В связи с этим, необходимо:

Воссоздать отраслевую систему образования, включающую в себя подготовку, переподготовку и повышение квалификации кадров, а также систему подготовки кадров высшей квалификации.

Новое поколение образовательных стандартов бакалавриата и магистратуры по направлению профессиональной деятельности должно обеспечить выпускнику необходимый уровень знаний и умений.

Одним из способов повышения уровня знаний обучающихся является работа на ПМТ, изучение различных режимов, переходных процессов энергоблока и опробование их на практике. Энергоблок АЭС состоит из различных технологических систем. Для его безаварийного и экономического обслуживания необходимо обладать знаниями об этих системах, знать как они взаимодействуют между собой и как изменение одного параметра в системе скажется на параметрах других систем. Для этого понимания и упрощения обучения на ПМТ необходима разработка развернутой технологической схемы (РТС) энергоблока ВВЭР-1000.

#### ПОСТРОЕНИЕ РАЗВЕРнуТОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПЕРВОГО КОНТУРА ЭБ АЭС с ВВЭР-1000

Для построения полной тепловой схемы первого контура ЭБ АЭС с ВВЭР-1000 необходимо изучить назначение всех технологических систем первого контура. Так же необходимо выделить основное оборудование каждой системы и изучить связи систем первого контура между собой.

Суть основного технологического процесса в ЯППУ (ядерная паро-производящая установка): нагрев теплоносителя в ядерном реакторе, его движение к парогенераторам, передача теплоты в парогенераторах к рабочему телу второго контура, возврат теплоносителя при помощи главных циркуляционных насосов в ядерный реактор, - отображается принципиальной тепловой схемой (ПТС). ПТС, как правило, включает в себя ТС основного технологического процесса. Вспомогательные системы ЯППУ обеспечивают поддержание требуемого уровня технологических параметров в нормальных условиях эксплуатации и при их нарушении.

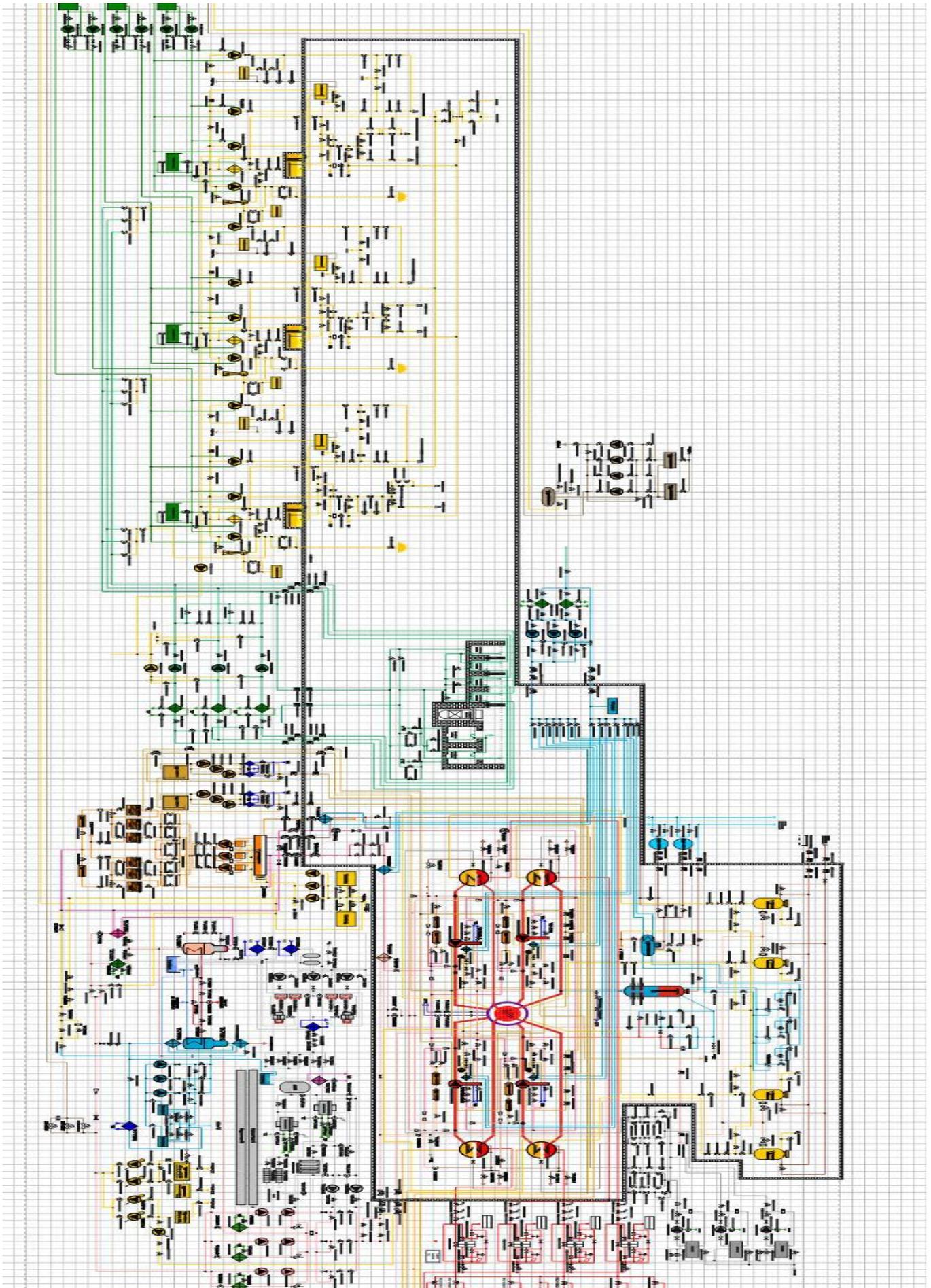


Рис.1. Развернутая тепловая схема первого контура ЭБ ВВЭР-1000

ВВЭР-1000 включает в себя как ТС основного технологического процесса, так и вспомогательные системы и системы безопасности, а именно:

**УВ**-ТС парогенераторов;

**УС**-ТС ядерного реактора;

**УД** – ТС ГЦН и его маслоснабжения;

**УР** – ТС компенсации давления;

**УТ** – ТС аварийного охлаждения зоны (пассивная часть);

**УЗ** – ТС защиты реактора;

**ТА** – ТС маслоснабжения реакторного отделения;

**ТВ** – ТС бакового хозяйства и реагентов реакторного отделения;

**ТС** – ТС байпасной очистки воды первого контура;

**ТД** – ТС очистки и хранения теплоносителя первого контура (СВО-6);

**ТЕ** – ТС очистки организованных протечек и продувочной воды;

**ТФ** – ТС промконтура;

**ТГ** – ТС охлаждения бассейна выдержки и перегрузки;

**ТН** – ТС отмывки уплотнений ГЦН;

**ТК** – ТС подпитки-продувки первого контура;

**ТЛ** – ТС вентиляции и кондиционирования;

**ТМ** – ТС дистиллята;

**ТН** – ТС азота, газовых сдувок и сжатого воздуха;

**ТР** – ТС очистки трапных вод (СВО-3);

**ТС** – ТС дожигания водорода и очистки газов;

**ТQ** – ТС безопасности (расхолаживание ЯППУ);

**ТВ** – ТС отбора проб первого контура и СВО;

**ТХ** – ТС аварийной подпитки парогенераторов;

**ТУ** – ТС организованных протечек первого контура;

**ТЗ** – ТС спецканализации;

**ВВ** – ТС технического водоснабжения ответственных потребителей;

**ВФ** – ТС технического водоснабжения ответственных потребителей;

**ВГ** – ТС техводоснабжения ответственных потребителей в районе ББ;

**УГ** – ТС подачи азота высокого давления на ресиверы;

**УН** – ТС бакового хозяйства спецпрачечной;

**УТ** – ТС сжатого воздуха к пневмоприводной арматуре;

**УВ** – ТС вентиляции и кондиционирования;

**УЖ** – ТС пожаротушения.

РТС первого контура представлена на рисунке 1.

#### ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Разработана развернутая тепловая схема первого контура энергоблока ВВЭР-1000, с отображением всех технологических систем и связей между ними. Данная разработка позволяет эффективно решить актуальную проблему интенсификации и повышения мотивации обучения, придания ему практической направленности, а также облегчение работы с ПМТ, более глубокое и наглядное изучение ТС первого контура, и связей между ними. Что позволит в будущем выпускать более квалифицированных специалистов, и снизить количество нештатных ситуаций и аварий, связанных с человеческим фактором, увеличивая эффективность работы ЭБ АЭС.

В будущем планируется объединить РТС первого и второго контуров ЭБ ВВЭР-1000, составить пособие по ТС ЭБ ВВЭР-1000, в котором будет собрана наиболее

важная информация о ТС, необходимая для работы с ПМТ. Что облегчит обучение студентов. На данный момент описание всех ТС находится в технической документации, где содержится слишком много информации для одновременной работы с ПМТ и изучения ТС. Это усложняет процесс усвоения необходимого материала.

Данное пособие будет составлено отдельно для первого и второго контура.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТХ.ПЭ.0012.44. – Москва: 2003. – 37 с.
- [2] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03VG.ПЭ.0022.44. – Москва: 2004. – 40 с.
- [3] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TQ.ПЭ.0028.42. – Москва: 2003. – 94 с.
- [4] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03УВ.ПЭ.0010.42. – Москва: 2003. – 62 с.
- [5] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03УС.ПЭ.0001.42. – Москва: 2003. – 46 с.
- [6] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03УД.ПЭ.0003.42. – Москва: 2003. – 39 с.
- [7] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03УТ.ПЭ.0035.42. – Москва: 2003. – 24 с.
- [8] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03УА.ПЭ.0002.42. – Москва: 2004. – 25 с.
- [9] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТУ.ПЭ.0023.42. – Москва: 2007. – 63 с.
- [10] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TZ.ПЭ.0027.42. – Москва: 2003. – 48 с.
- [11] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТС.ПЭ.0014.42. – Москва: 2003. – 24 с.
- [12] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TQ.ПЭ.0029.42. – Москва: 1998. – 93 с.
- [13] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03VB.ПЭ.0036.44. – Москва: 2004. – 25 с.
- [14] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03VB.ПЭ.0013.44. – Москва: 1998. – 67 с.
- [15] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TQ.ПЭ.0018.42. – Москва: 2003. – 50 с.
- [16] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТР.ПЭ.0011.42. – Москва: 2004. – 23 с.
- [17] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TQ.ПЭ.0009.42. – Москва: 2004. – 26 с.
- [18] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТА.ПЭ.0019.42. – Москва: 2004. – 62 с.
- [19] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТВ.ПЭ.0022.42. – Москва: 2004. – 49 с.
- [20] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТВ.ПЭ.0020.42. – Москва: 2004. – 20 с.
- [21] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТС.ПЭ.0013.42. – Москва: 2004. – 44 с.
- [22] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТЕ.ПЭ.0016.42. – Москва: 2004. – 62 с.
- [23] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TF.ПЭ.0007.42. – Москва: 2004. – 59 с.
- [24] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03TG.ПЭ.0009.42. – Москва: 2004. – 92 с.
- [25] МРФ по Атомной энергетике концерн «Росэнергоатом» филиал КАЭС 03ТН.ПЭ.0024.42. – Москва: 2004. – 25 с.

# Визуализация подстанционного оборудования для создания учебных трехмерных моделей энергообъектов

М.С. Панкратов

Филиал ПАО «Межрегиональная распределительная сетевая компания Волги» — «Самарские распределительные сети»  
Самара, Россия  
PankratovMS@samara.mrsk-volgi.ru

*Аннотация* — в настоящее время интенсивно развивается представление данных в виде интерактивных трехмерных визуализаций, поскольку позволяет получить наглядную целостную картину, с которой можно эффективно работать и выявлять те или иные проблемы. Электросетевое хозяйство не является исключением и особенно это актуально для основного электротехнического оборудования, размещаемого в зданиях и сооружениях, изучаемого при освоении образовательных программ бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

*Ключевые слова* — трехмерные технологии; визуализация; электросетевое хозяйство

## Visualization of substation equipment for making educational 3-d model of power facilities

M.S. Pankratov

Branch of «Interregional Distribution Grid Company of Volga» — «Samara distribution grids»  
Samara, Russian Federation  
PankratovMS@samara.mrsk-volgi.ru

*Abstract* — presently, data representation is being intensively developed in the form of interactive three-dimensional visualizations, since it allows to get an intuitive visual picture from which it is possible to work effectively and to identify problems. Electric grid are no exception and this is especially actual for the basic electrotechnical equipment located in buildings and structures that are being studied at bachelor programs on Electric power engineering.

*Keywords* — three-dimensional technologies; visualization; electric grid

### I. ВВЕДЕНИЕ

Привычные формы представления данных (чертежи, схемы, таблицы и т.п.) не всегда позволяют отразить специфику объекта и соотнести его с окружающими объектами. Современные программные продукты позволяют создавать трехмерные представления, которые с успехом можно применять при подготовке методических материалов.

### II. ИНТЕРАКТИВНАЯ ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Главным преимуществом трехмерных представлений является их наглядность - с их помощью можно рассмотреть предмет изучения со всех сторон и проанализировать его структуру. Важным плюсом является возможность хранить внутри созданных

трехмерных представлений иерархию моделей. Это свойство позволяет, манипулируя отображением тех или иных частей сцены, рассмотреть внешнее и внутреннее устройство объекта. При этом необходимо правильно организовать иерархию объектов для того, чтобы работа с ней была логичной и интуитивно-понятной.

При создании подобных представлений важно заранее определиться с тем, какую информацию требуется донести до пользователя. Имеет смысл пренебречь незначительными деталями для того чтобы выделить главное. Информативность созданного представления можно повысить, обозначив в трехмерной сцене не только реальные объекты, но и логические связи между ними, создав таким образом подобие схемы.

Большого методического эффекта можно достигнуть, создав набор интерактивных анимаций. Они помогут наглядно продемонстрировать тот или иной процесс или конструкционные особенности объекта.

Конечные форматы трехмерных представлений могут быть разными. Самым перспективным из них по праву является формат веб-страниц. Существует возможность создать веб-портал с реестром объектов электросетевого хозяйства, внутри которого каждое трехмерное представление будет сопровождаться сопутствующей информацией.

Объектом для практической реализации была выбрана комплектная трансформаторная подстанция. Средой разработки стал программный комплекс SolidWorks. Веб-интерфейс интерактивного представления состоит из нескольких областей (Рис. 1).

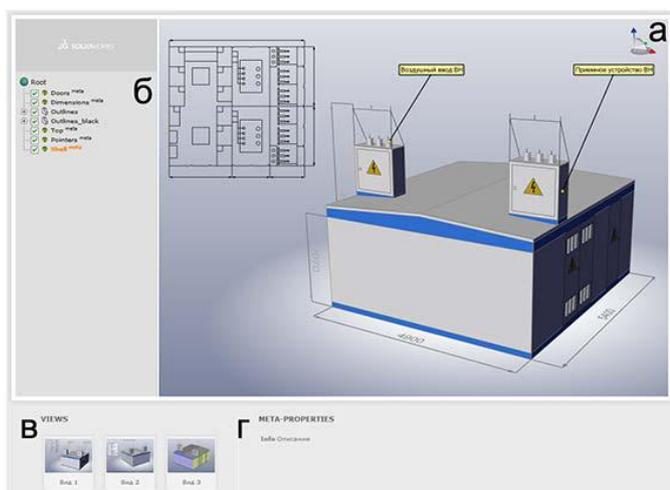


Рис. 1. Веб-интерфейс трехмерного представления:

- а) окно проекции, в котором происходит навигация по трехмерной сцене;
- б) дерево моделей, в котором можно видеть иерархию сцены и манипулировать видимостью объектов;
- в) окно для выбора вида;
- г) область, в которой отображается информация о текущем объекте.

Помимо формата веб-страниц существует возможность экспортировать трехмерные сцены в формат PDF, отличительной особенностью которого является его широкая распространенность (Рис. 2).

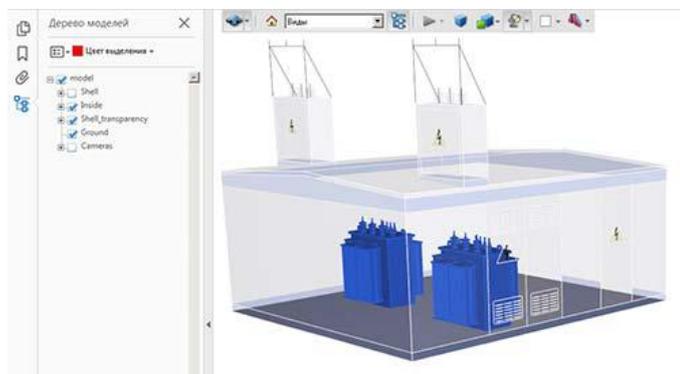


Рис. 2. Пример PDF-файла с трехмерным контентом.

### III. АРХИТЕКТУРНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Для реализации одной из рабочих задач потребовалось использование технологий архитектурной визуализации. Конечной целью было создание трехмерной сцены территории электрической подстанции, находящейся в стадии строительства. Помимо этого, было необходимо добавить не предусмотренные проектом модели конструкций.

В качестве среды разработки была выбрана программа Autodesk 3ds Max, которая обладает широким функционалом для создания архитектурных визуализаций.

Трехмерная сцена создавалась в соответствии с проектом, были соблюдены все размеры.

При подготовке ночного вида для более реалистичного освещения трехмерной сцены были использованы файлы фотометрических данных формата IES, предоставленные заводом-изготовителем осветительного оборудования.

В результате проделанной работы были созданы статичные изображения с высокой степенью фотореалистичности, которые позволили оценить визуальные качества конструкций в дневное (Рис. 3) и ночное (Рис. 4) время, взаимное расположение различных элементов.



Рис. 3. Визуализация электрической подстанции в дневное время.



Рис. 4. Визуализация электрической подстанции в ночное время.

По результатам анализа изображений в проект строительства были внесены корректировки.

Трехмерные технологии способны сделать процесс обучения более эффективным и безусловно их роль при подготовке методических материалов со временем будет только расти. Закономерно предположить, что новым шагом в развитии учебного процесса станет использование технологий дополненной и виртуальной реальности.

# Учебная понижающая подстанция 110 кВ в масштабе 1/10

А.О. Егоров, А.А. Ларионова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина», Уральский энергетический институт,  
Екатеринбург, Россия

e-mail: a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com

*Аннотация* — учебная понижающая подстанция 110 кВ в масштабе 1/10, предназначена для материально-технического оснащения образовательных процессов профильных кафедр вузов осуществляющих подготовку специалистов для Электроэнергетики. Отсутствие постоянного и неограниченного доступа на энергообъекты для студентов, а также отсутствие возможности проводить на них любые работы, создаёт резкий дефицит практических знаний и навыков у студентов. Решением данной проблемы является создание действующих материальных моделей подстанций и отдельно стоящего силового оборудования, как в качестве наглядного пособия, так и в качестве лабораторной установки с малыми габаритами. Наличие действующей подстанции в масштабе 1/10 позволит в учебных целях выполнять широкий спектр работ: проектирование, строительство, монтаж, оперативные переключения и т.д.

*Ключевые слова* — конструктор электроэнергетических систем, учебная действующая подстанция 110 кВ, система образования, трехмерное моделирование и конструирование, 3D принтеры и печать.

## The training step-down substation of 110 kV in 1/10 scale

Alexander Egorov, Anastasia Larionova

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia

e-mail: a.o.egorov@urfu.ru, stacylarionova@gmail.com

*Abstract* — the training step-down substation of 110 kV in 1/10 scale is intended for material fitting of educational processes of higher education institutions profile departments which are carrying out training of specialists for power industry. Absence of continuous and unlimited access of students to power facilities and also absence of an opportunity to carry out any works on it results in severe deficiency in practical knowledge and skills among students. The solution of this problem is creation of operating material models of substations and the separate power equipment, both as the visual aid and as laboratory unit small in size. Existence of the operating substation in 1/10 scale allows performing a wide range of works for educational purposes: design, construction, installation, routine switching, etc.

*Keywords* — designer of electrical power systems, training the existing 110 kV substation, education system, three-dimensional modeling and design, 3D printing.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Проект «Конструктор электроэнергетических систем» действует на кафедре АЭС УралЭНИН УрФУ (г.Екатеринбург) с 2013 г. Основная задача, которая ставится перед проектом – повышение материально-технического и информационного оснащения образовательных процессов с применением методов и технологий масштабного моделирования, создание сборных масштабных моделей силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем. Тем самым решая, в первую очередь, образовательные задачи, связанные с обеспечением качества подготовки студентов и специалистов технических специальностей для нужд

электроэнергетической отрасли России. Кроме того, в рамках данного проекта производится обучение студентов конструированию, моделированию, проектированию, инженерным расчётам, что позволяет проектировать и создавать новое собственное действующее оборудование[1].

Конструктор выполняется на основе методов и технологий масштабного моделирования в средах промышленных систем объемного CAD/CAM проектирования, таких как, например AutoCAD. В настоящее время в производстве конструктора широко используются методы и технологии объемного лазерного сканирования, обратного инжиниринга и 3D печати. Такой подход к производственному процессу позволяет

производить масштабные модели подстанций, отдельного силового и вторичного оборудования электроэнергетических систем из различных материалов и обеспечить их высокую внешнюю точность и геометрическую идентичность. В перспективе это позволит использовать модели в качестве действующих лабораторных установок с малыми габаритами и низкой стоимостью. Очередным преимуществом масштабного моделирования является обеспечение наглядности изучаемого или управляемого объекта обеспечение «эффекта присутствия» на энергообъекте.

## II. Цели и задачи

Основная цель создания конструктора электроэнергетических систем состоит в повышении качества обучения студентов посредством улучшения материально-технического и информационного оснащения образовательной программы и созданием новых видов лабораторных и практических занятий на основе типовых и нетиповых ситуаций в электроэнергетике. То есть подразумевается создание и использование моделей силового оборудования и энергообъектов на их основе из оригинальных материалов, а так же виртуальных и напечатанных макетов электрических станций, подстанций и других энергетических объектов при изучении различных профильных дисциплин (электромеханика, электрические аппараты, оборудование ЭЭС, ЭЧС, системы АСДУ и пр.). В настоящее время ведутся работы по выпуску учебно-методических пособий и по постановке производства учебной ПС 110 кВ для того чтобы стало возможным донести до учащихся проблемы и знания о внешнем виде оборудования, его детализации и наглядности его устройства, принципах действия, назначения, конструктивного выполнения, транспортировки, монтажа, правилах сборки и технической эксплуатации, обслуживания и оперативно-диспетчерского управления.

Создание, сборка и печать масштабных моделей играет на данном этапе важную роль, т.к. получение наглядной модели внешнего и внутреннего устройства силового оборудования позволяет обеспечить качественное понимание физики и динамики процессов, а так же позволяет студенту погрузиться в процесс строительства и эксплуатации энергообъекта. Познакомиться и изучить детальное устройство энергообъекта позволит проект «Конструктор ЭЭС» на примере ОРУ трансформаторной ячейки блочной подстанции 110 кВ.

## III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ МАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ

Создание масштабной модели любого элемента оборудования производится в несколько технологических этапов методом обратного инжиниринга.

Первый этап - это проведение изысканий, поиск лучшего элемента из ряда разных производителей и сбор полного состава исходных данных (фотографии, габаритные чертежи, каталоги, технические паспорта и др.). В настоящее время для оборудования 110 кВ такие изыскания полностью выполнены, и за основу (прототип)

учебной ПС 110 кВ взята ПС 110/20 кВ «Медная» (АО «ЕЭСК» [www.eesk.ru](http://www.eesk.ru)), с трансформаторами ТДН 40 МВА (СВЭЛ [www.svel.ru](http://www.svel.ru)), на площадке которой установлено современное оборудование. Ранее на площадке подстанции так же при проведении изысканий использовались методы объёмного лазерного сканирования для выполнения обратного инжиниринга оборудования [2]. Для перехода к созданию виртуальной ПС 110 кВ и воспроизводства её материальной модели в масштабе 1/10, запрошена технологическая документация, габаритные чертежи и выполнены фотографии, фрагменты которых приведены на рис.1-4.

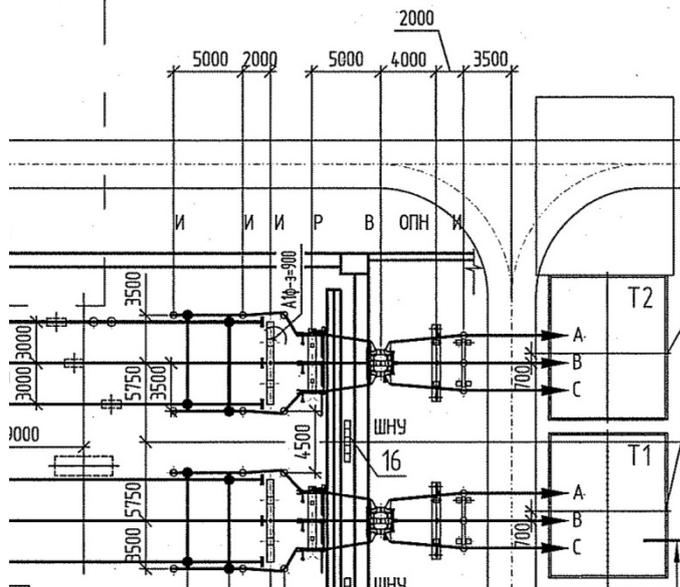


Рис. 1. ОРУ блочной ПС 110/20 кВ, вид сверху

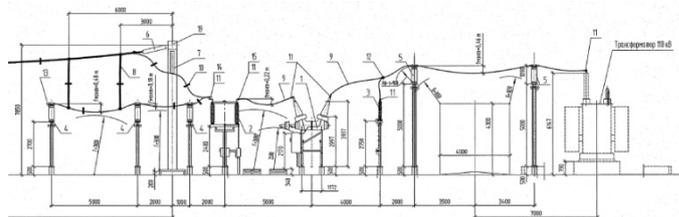


Рис. 2. Ячейка блочной ПС 110/20 кВ, вид сбоку

Этап создания конструктора является ключевым, так как именно от него зависит качество и дальнейшая детализация любой создаваемой модели. Требования к модели очень высокие т.к. в неё закладываются высокие модернизационные ресурсы, необходимые на будущих этапах развития проекта. Для того чтобы максимально быстро и качественно собрать все необходимые данные на этапе проектирования, используются технологии обратного инжиниринга, которые, в свою очередь, необходимы для восстановления размеров образцов оборудования на основании скан-файла, установления размеров крепежа, металлопроката и сортамента той части оборудования, которая находится под напряжением и доступ к нему закрыт. Тем самым значительно упрощается и ускоряется процесс сбора исходных данных, воспроизводства технической конструкторской документации и создание масштабной модели элемента конструктора. Важно заметить, что по итогам выполнения

обратного инжиниринга площадки подстанции, становится возможным выполнение контроля качества выполненных строительно-монтажных работ, анализ механических деформаций, повреждений и износа поверхностей оборудования. Тем самым решаются не только образовательные, но и производственные задачи.



Рис. 3. ОРУ 110 кВ блочной ПС 110 кВ



Рис. 4. Трансформатор 110/20 кВ 40 МВА блочной ПС

На втором этапе производится обработка всех исходных данных и моделирование внешнего вида объекта с частичным воспроизведением внутреннего устройства элементов ОРУ. Также проводились эксперименты по поиску оптимального размера трансформаторной ячейки ОРУ 110 кВ, результаты которого показаны на рис.5 и в таблице 1.

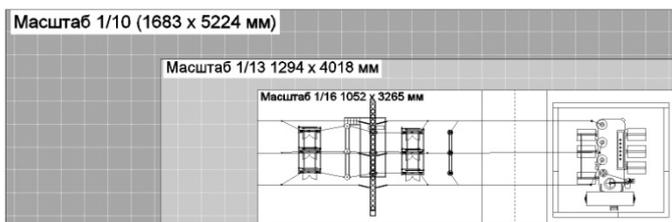


Рис. 5. Землеотвод ячейки ОРУ трансформатора 110 кВ

ТАБЛИЦА 1. СООТНОШЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПЛОЩАДИ УЧЕБНОЙ ПС 110 кВ

Масштаб	Ширина	Длина	Площадь	↑
1/10	1683 мм	5224 мм	$8,79 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$	256%
1/13	1294 мм	4018 мм	$5,19 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$	151%
1/16	1052 мм	3265 мм	$3,43 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$	100%

Из рисунка и таблицы видно что, площадь ячейки ПС 110 кВ в масштабе 1/10 в 2,5 раза больше чем размер такой же ячейки в масштабе 1/16, но в то же время масштаб 1/10 хорошо подходит для интеграции в отдельностоящее оборудование крепежа часовых

механизмов и стандартного металлосортамента. За базовый принят масштаб подстанции 1/10 с размерами трансформаторной ячейки ОРУ 110 кВ 1,68×5,22 мм. Для моделирования выполняются объёмные чертежи в масштабе 1/1 отдельно стоящего оборудования (рис.6-12) с полной детализацией и воспроизведением всех частей, соединений, элементов и узлов оборудования. Такой подход позволяет в перспективе перейти к любому как типовому, так и нетиповому масштабу в случае необходимости и если этого требует ситуация.

На сегодняшний день линейка масштабов достаточна хорошо проработана, от самых крупных: 1/2, 1/4, 1/8, 1/10, 1/13, 1/16, до самых маленьких 1/20, 1/24, 1/35, 1/48, 1/72, 1/100 и 1/144. По итогам изысканий было принято решение далее работать в масштабах 1/10, 1/13, 1/16 т.к. в этом случае, кроме вышеуказанных причин, также сохраняется возможность интеграции микроэлектронных компонентов и их установки внутри оборудования.

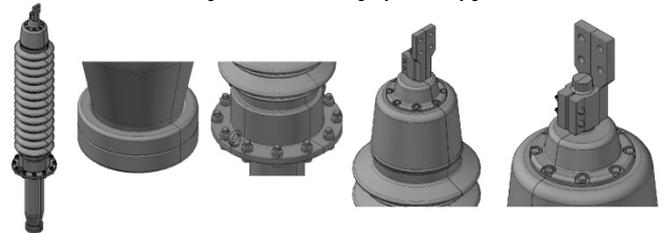


Рис. 6. Ввод 110 кВ Мосисолятор. Узлы экрана, опорного фланца, колпак ввода и узел клеммы и аппаратного зажима

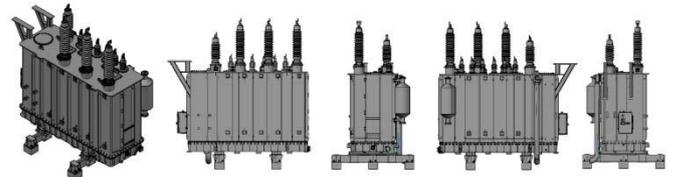


Рис. 7. Трансформатор ТДН 110/20 кВ 40 МВА СВЭЛ (снят расширитель)

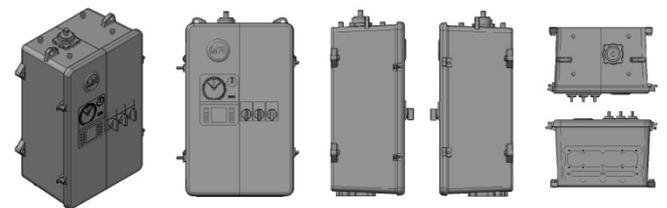


Рис. 8. Шкаф управления РПН трансформатора фирмы MR (виды спереди, слева, справа, сверху, снизу)

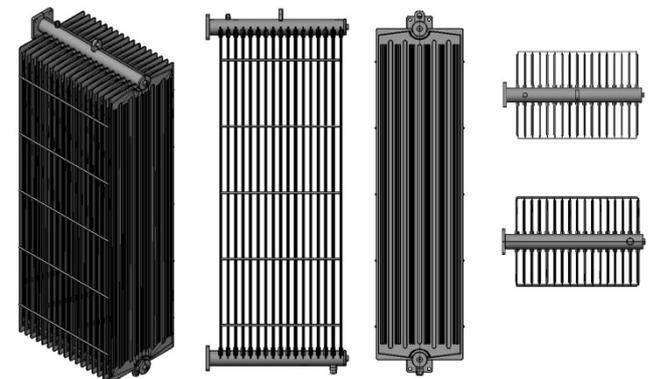


Рис. 9. Радиатор «Д» EuroCooler (виды слева, спереди, сверху, снизу)

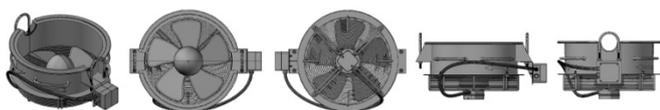


Рис. 10. Вентилятор EuroCooler (виды сверху, снизу, слева, спереди)

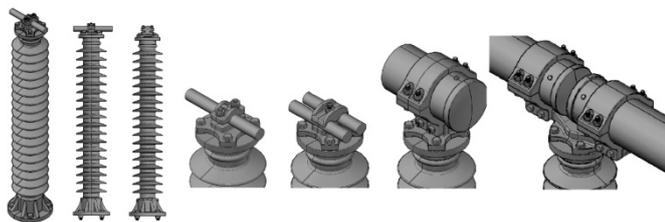


Рис. 11. Шинная опора 110 кВ АИЗ в 2х исполнениях и жёсткая ошиновка Arutti на её основе

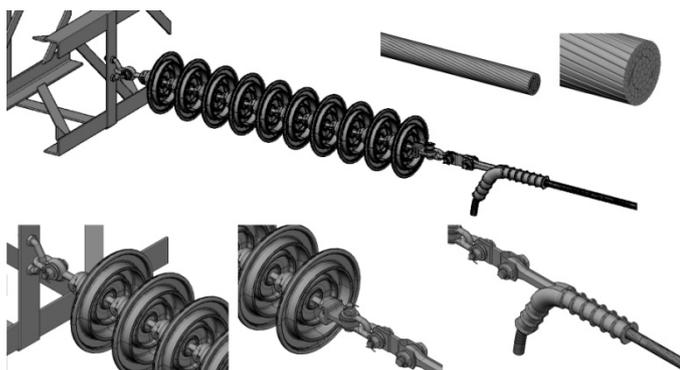


Рис. 12. Гирлянда ошиновки ОРУ 110 кВ GIG с проводом АС-240

После выполнения всех трёхмерных чертежей отдельного электротехнического оборудования, также, в масштабе 1/1 выполняются чертежи строительной части подстанции: железобетонных изделий и металлоконструкций на которых устанавливается силовое оборудование. За основу взяты железобетонные изделия фирмы «БалтТеплострой», исчерпывающую информацию по металлоконструкциям предоставила Группа СВЭЛ [3]. Далее, на третьем этапе осуществляется трехмерная печать элементов подстанции, на 3D принтерах. Технологии 3D печати применяются для прототипирования, т.к. являются дорогостоящими. С применением технологий 3D печати выполняется прототип одной ячейки ОРУ 110 кВ. Серийное производство элементов ПС требует применения других высоких технологий, в частности литья цветных металлов. При печати прототипа подстанции используются 2 машины - 3D принтеры имеющиеся на кафедре АЭС УралЭНИИ УрФУ: 3D принтер StarLight (Россия) - применяется для печати мелких элементов с высокой точностью и 3D принтер CubeX (США), используемый для печати крупногабаритных деталей с хорошей точностью.

На четвертом этапе предусмотрена постобработка деталей после выполнения печати - осуществляется механическая зачистка и обработка деталей, удаление рафта, необходимого для печати, промывка деталей и их засветка и сушка в ультрафиолетовой камере. Далее выполняется грунтовка, покраска, подготовка к сборке и непосредственно сама сборка ячейки подстанции.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящее время полностью выполнены чертежи и частично выполнена 3D печать: силового трансформатора ТДН 110/20 кВ 40 МВА (СВЭЛ), вводов 110, 66 и 20 кВ (Мосизолятор), выключателя ВЭБ-110 кВ (УЭТМ), трансформатора тока ТРГ-110 (УЭТМ), шинные опоры ШО-110 кВ (АИЗ), линейная арматура и изоляция (Global Insulator Group), жёсткая ошиновка (Arutti). В разработке находятся 3D чертежи Разъединителя РПД 110 кВ (УЭТМ), измерительного трансформатора напряжения ЗНГ-110 кВ (УЭТМ), ВЧ заградитель (СВЭЛ) и конденсатор связи СМА (DECRA). Создана виртуальная ячейка подстанции 110 кВ с максимальной проработкой и детализацией, выполняется её материальная копия-прототип из фотополимеров и пластмасс в масштабе 1/10.

#### V. ПЕРСПЕКТИВЫ

Выполняется работа по поиску высоких технологий подходящих для серийного производства. Одновременно к ячейке ПС ведутся изыскания по созданию максимально информативной и эффективной пошаговой инструкции по сборке. Осуществляется подбор различных сортов цветных металлов и их сплавов. В планах полного состава работ по ячейке ОРУ 110 кВ выполнить:

- 1) Объёмные 3D чертежи ПС 110 кВ;
- 2) Плоские 2D чертежи ПС 110 кВ;
- 3) Учебное пособие по проектированию ПС 110 кВ;
- 4) Плакаты с инфографикой по устройству ПС 110 кВ;
- 5) Статичный макет ПС 110 кВ в масштабе 1/10;
- 6) Пошаговую инструкцию по сборке ПС 110 кВ;
- 7) Рабочую ПС 110 кВ в масштабе 1/10.

В перспективе ячейка ОРУ ПС 110 кВ в масштабе 1/10, позволит выполнять широкий спектр учебных практик и лабораторных работ: проектирование, строительство, монтаж, оперативные переключения и т.д. Планируемое окончание работ по выполнению чертежей и статичного макета ПС 110 кВ намечено на январь 2018 г.

#### Список литературы

- [1] Возисова О., Егоров А., Трёмбач А. Конструктор электроэнергетических систем. Siemens 3API DT 145kV Circuit-Breaker // Applied Mechanics and Materials. Vol. 698 (2015). pp. 699-703. Submitted 07.10.2014 © (2015) Trans Tech Publications, Швейцария (references)
- [2] Fröhlich C. and Markus M. "Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3D surveying." International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences 36.Part 8 (2004): W2.
- [3] Tavlintsev A., Eroshenko S., Kuzin P., Kazantsev A., Trembach A., Vozisova O., Koksharova E., Zhavrid N., Kunshin V., Bannih P., Baltin D. 220/110 kV 250 MVA Autotransformer kit. Advanced Materials Research, 1008-1009.C. 1162-1165

# Результаты исследования аварийных режимов работы энергоблока ВВЭР-1000 на ФАТ и ПМТ с исходными событиями во втором контуре

Н.О. Разуваев, Н.С. Железов, В.А. Субаш, Г.В. Булавкин  
ФГБОУ ВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"  
Иваново, Россия  
E-mail: VeRg1LiY@yandex.ru

*Аннотация* — главная цель эксплуатационной подготовки и повышения квалификации специалистов АЭС – выработка у них умения быстро принимать ответственные и правильные решения в самых разнообразных ситуациях, включая и аварийные режимы работы. Основная роль в достижении этой цели принадлежит тренажерной подготовке с использованием функционального аналитического и полномасштабного тренажеров (ФАТ и ПМТ) энергоблока АЭС. Для реализации этой подготовки необходимо учебно-методическое обеспечение (УМО) и проведение соответствующих исследований. При исследованиях проводились эксперименты на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000, а также теоретический анализ различных аварийных режимов работы с исходными событиями во втором контуре.

*Ключевые слова* — энергоблок ВВЭР-1000, подготовка специалистов АЭС, аварийные режимы работы, УМО, ФАТ, ПМТ.

## AFS and FSS investigation results of emergency operational modes of VVER-1000 type nuclear unit with stated characteristics in second circuit

Nikolay Razuvaev, Nikita Zhelezov, Vladimir Subash, Georgiy Bulavkin  
Ivanovo State Power Engineering University  
Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: VeRg1LiY@yandex.ru

*Abstract* — The main goal of operational and advanced training of NPP specialists is to develop their skills of fast making responsible and right decisions in a various situations including emergency ones. Simulator-based learning system with usage of analytical functional simulator (AFS) and full-scale simulator (FSS) of nuclear unit plays the main role in achieving it. Both learning and teaching guides (LTG) and practical researches are necessary to implement this learning system. Theoretical analysis of different emergency operational modes with stated events in second circuit as well as experiments on analytical functional simulator (AFS) and full-scale simulator (FSS) of VVER-1000 type nuclear unit were conducted during the investigation.

*Key words* — VVER-1000 type nuclear unit, training NPP specialists, emergency operational modes, LTG, AFS, FSS.

Любой аварийный режим начинается с нарушения условий нормальной эксплуатации, приводящего к выходу важнейших технологических параметров энергоблока за допустимые пределы. Как правило, эти нарушения проявляются внезапно, хотя причины их могут накапливаться в течение длительного времени. Причины возникновения аварийных ситуаций и режимов многообразны. Так, нормальные режимы работы могут быть нарушены вследствие механических повреждений того или иного элемента энергоблока (например, разрывов циркуляционных трубопроводов, ядерной паропроизводящей установки (ЯППУ), главных

паропроводов и др.), обусловленного изменением механических свойств металла в процессе эксплуатации, развитием, имеющихся в металле скрытых дефектов, повышением давления рабочей среды выше допустимого значения и др.; внезапного отключения или выхода из строя того или иного оборудования (например, останова главных циркуляционных насосов (ГЦН) из-за потери питания); неправильных коммуникационных переключений в электрической схеме питания собственных нужд и т.п. Значительная часть нарушений нормальной эксплуатации обусловлена неправильными действиями эксплуатационного персонала.

Различают аварийные ситуации и аварийные режимы. Само по себе нарушение нормального режима эксплуатации чаще всего создает аварийную ситуацию, т.е. потенциальную опасность возникновения и развития аварийного режима. Если в аварийной ситуации не принимать никаких мер для восстановления нормального режима или если принятые меры окажутся недостаточными, она перерастает в аварийный режим, при котором энергоблок не может продолжать работу в требуемом режиме и развитие которого создает угрозу разрушения оборудования и нарушения безопасности АЭС, в наиболее тяжелых случаях с радиоактивным выбросом за пределы станции.

Наиболее серьезные аварийные ситуации, при которых возникает опасность расплавления активной зоны, связаны с непреднамеренным высвобождением реактивности и обусловленной этим угрозой разгона ядерного реактора, а также нарушением отвода теплоты от твэлов из-за потери теплоносителя вследствие разгерметизации циркуляционного контура или из-за нарушения работы тепломеханического оборудования энергоблока.

Согласно [3] в ТЦ АЭС отмечаются наиболее характерные режимы нарушений в работе турбины К-1000-60/3000 и оборудования второго контура энергоблока ВВЭР-1000, приводящие к аварийным ситуациям и режимам:

1. Повышение частоты вращения роторов турбоагрегата.
2. Увеличение осевого сдвига роторов турбины.
3. Попадание воды в турбину.
4. Повышение вибрации турбоагрегата.
5. Повреждение лопаточного аппарата.
6. Нарушение работы масляной системы турбоагрегата.
7. Неисправности в работе ВПУ.
8. Воспламенение масла на маслопроводе.
9. Повышение давления в конденсаторах турбины.
10. Повышение уровня в сепараторе СПП.
11. Повышение уровня в конденсаторе СПП.
12. Изменение температуры баббита одного опорного подшипника.
13. Утечка водорода через уплотняющие подшипники.
14. Нарушения работы оборудования при сбросах электрической нагрузки.
15. Нарушение ВХР второго контура, вследствие неплотности.
16. Неисправность КИП.
17. Разрыв трубопровода сетевой воды в машзале.
18. Попадание органических и синтетических масел в промканализацию.
19. Действия персонала при отрицательных температурах наружного воздуха.
20. Снижение уровня в ДБ УВГ.
21. Отключение трех МНУ.
22. Разрыв трубопроводов питательной воды.
23. Действия персонала при стихийных бедствиях.
24. Отключение циркуляционных насосов.
25. Отказ ЭЧСР.
26. Ложная посадка одного БЗОК.
27. Отключение КЭН второй ступени при неисправности их АВР.
28. Разлив синтетического масла «Файркуэл-Л» в

больших количествах.

Хотя первопричины аварий могут лежать в недостатках, допущенных на каждом этапе жизни АЭС, непосредственными причинами аварийных ситуаций являются технический отказ оборудования или ошибки эксплуатационного персонала. По статистике, в ядерной энергетике из-за ошибок персонала происходит до 80% тяжелых аварий [1].

Надежность, безопасность и эффективность работы АЭС во многом определяется квалификацией эксплуатационного персонала. Главная цель эксплуатационной подготовки и повышения квалификации специалистов – выработка у них умения быстро принимать решения в самых разнообразных ситуациях, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации ядерного энергоблока (включая аварийные).

Разумеется, при этом речи не может идти о преднамеренном создании аварийных ситуаций на действующем оборудовании АЭС. Основная роль в достижении поставленной цели принадлежит инновационным формам обучения, среди которых важную роль играет тренажерная подготовка.

Необходимость применения современных технических средств обучения в целях интенсификации обучения и придания ему практической направленности (повышения качества практической подготовки), а также адаптации программы обучения специалистов с программой и требованиями руководящих документов по подготовке оперативного персонала АЭС представляется весьма актуальной.

Внедрение в учебный процесс компьютерных обучающих систем (КОС), в сочетании с практическими занятиями на функциональном аналитическом тренажере (ФАТ) и полномасштабном тренажере (ПМТ) энергоблока ВВЭР-1000, позволяет обеспечить системный подход к организации образовательного процесса, т.е. поэтапный, логически последовательный процесс организации обучения, начиная с приобретения необходимых оперативному персоналу АЭС знаний, умений и навыков и заканчивая оценкой эффективности проведенного обучения. Использование в учебном процессе уникального оборудования – ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000, позволяющего проводить профессиональную подготовку оперативного персонала АЭС на базе полномасштабной модели реального БПУ и комплексной всережимной математической модели энергоблока, функционирующей в реальном масштабе времени – позволяет сократить сроки адаптации молодого специалиста на производстве, так как такая форма обучения студентов стыкуется с подготовкой оперативного персонала на АЭС [2].

Программное обеспечение ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 позволяет реализовать аварийные режимы работы ядерного энергоблока с различными исходными событиями. Ход аварийного процесса можно контролировать как в реальном времени, так и с ускорением до 10 раз. Это дает возможность исследовать различные аварийные ситуации и режимы со значительным сокращением затрат времени на проведение экспериментов. Изменение параметров технологических систем, влияющих на безопасность энергоблока, отслеживается при помощи соответствующих графиков. Формат графиков можно менять, адаптируя их к

конкретной аварийной ситуации или режиму. На дисплей компьютера можно выводить любой необходимый набор графиков изменения технологических параметров во времени с последующей их распечаткой для анализа результатов.

Для реализации поставленной задачи разработаны лабораторный стенд на базе ПМТ и ФАТ энергоблока ВВЭР-1000, сценарий, методика проведения экспериментальных исследований, а также методика обработки данных, полученных в результате проведения экспериментальных исследований; учебно-методическое обеспечение (УМО) и проведены экспериментальные исследования на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 с последующим теоретическим анализом различных аварийных режимов работы с исходными событиями в первом контуре.

В качестве примера на рисунках 2 – 12 приведены результаты исследований аварийного режима работы энергоблока ВВЭР-1000 с паротурбинной установкой К-1000-60/3000 с отключением турбогенератора от сети («отключение выключателя КАГ-24»). Следует отметить, что «расшифровка» графиков реализуется с помощью специально созданной спецификации, которая здесь не приводится, т.к. не вписывается в регламентированный формат и допустимый объем, поэтому приводимые графики играют иллюстративно-информационную роль о содержании и объеме работы. Заинтересованные лица при необходимости могут обратиться за соответствующими разъяснениями и дополнительной информацией к авторам статьи.

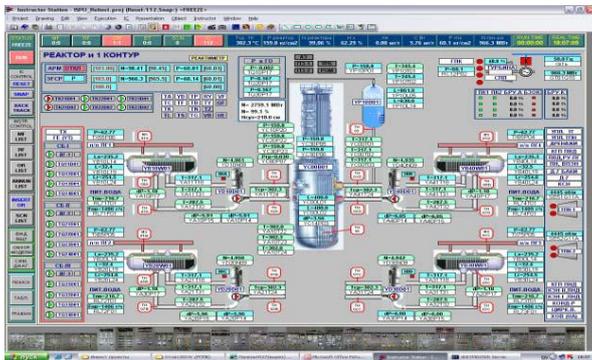


Рис. 1. Общий вид ФАТ.



Рис.2. Изменение во времени нейтронной, тепловой и электрической мощностей, а также положения стержней СУЗ.



Рис. 3. Изменение во времени параметров теплоносителя в компенсаторе давления и уровень теплоносителя в реакторе.

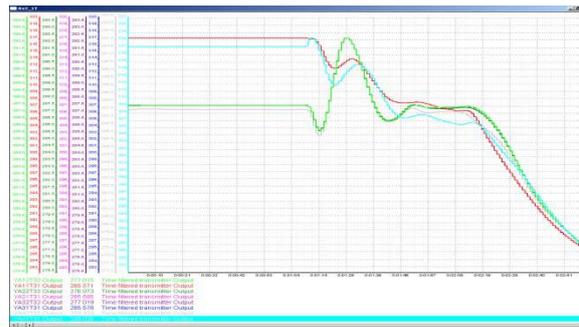


Рис. 4. Изменение во времени температуры «горячего» и «холодного» теплоносителя по циркуляционным петлям.

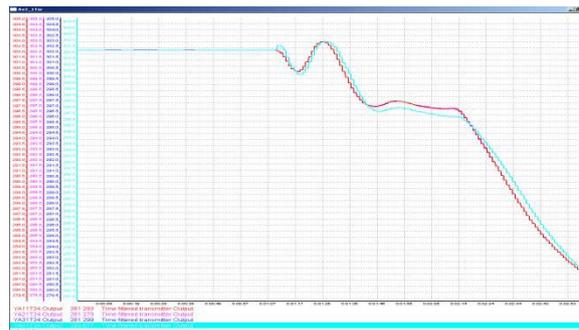


Рис. 5. Изменение во времени средние температуры теплоносителя по циркуляционным петлям.



Рис. 6. Изменение во времени перепада давления теплоносителя в ГЦН 1-4.

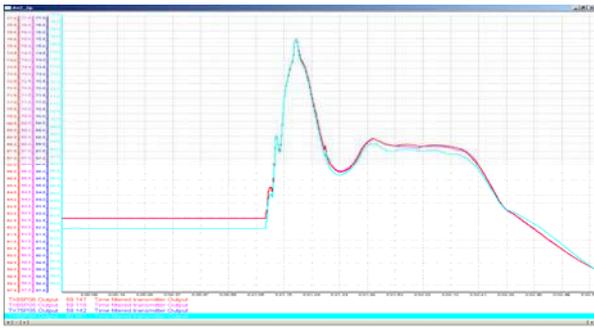


Рис. 7. Изменение во времени давления пара в парогенераторах.



Рис. 8. Изменение во времени расхода питательной воды в парогенераторы.

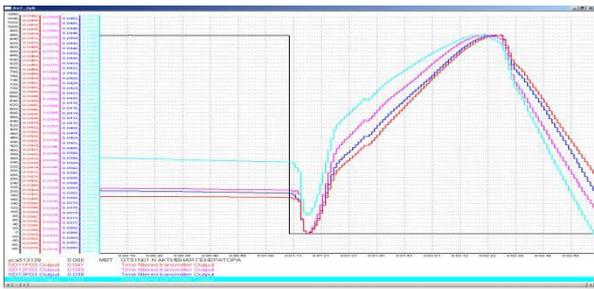


Рис. 9. Изменение во времени давления пара в корпусах конденсатора паровой турбины

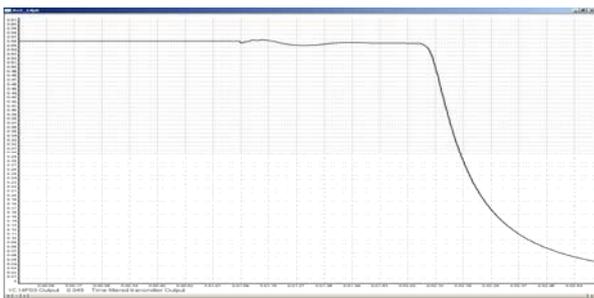


Рис.10. Изменение во времени перепада давления теплоносителя в корпусе ядерного реактора.



Рис. 11. Изменение во времени параметров теплоносителя в гидрааккумулирующих ёмкостях САОЗ.

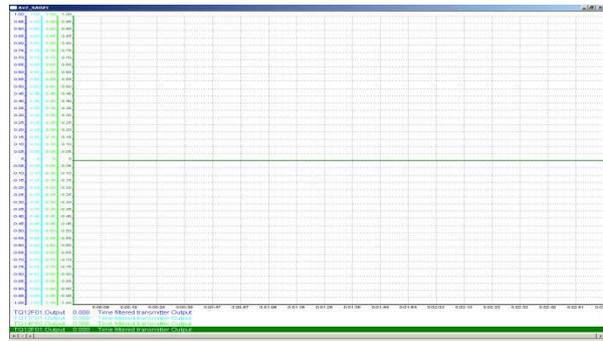


Рис. 12. Изменение во времени расхода теплоносителя и борного раствора в активной части САОЗ-1,2,3.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Подобрана и обработана научно-техническая информация по аварийным ситуациям и режимам работы энергоблоков АЭС, на основании которой была реализована поставленная задача.

2. Разработаны сценарий, методика проведения экспериментальных исследований, а также методика обработки данных, полученных в результате проведения экспериментальных исследований.

3. Проведены эксперименты на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 при различных исходных событиях аварийных режимов, инициированных в технологических системах второго контура.

4. Материалы работы использованы для разработки УМО, для реализации заявленной работы в условиях проведения лабораторного практикума обучаемыми.

5. Разработанное УМО и проведенные исследования позволяют эффективно решать актуальную проблему интенсификации и повышения мотивации обучения и придания ему практической направленности, а также адаптации программы обучения специалистов с программой и требованиями руководящих документов по подготовке оперативного персонала АЭС.

## Список литературы

- [1] Иванов В.А. Режимы мощных паротурбинных установок. Л.: «Энергия», 1971.
- [2] Щербнев В.С, Булавкин Г.В. и др. Разработка компьютерных тренажерных систем по эксплуатации оборудования блока АЭС. Комплексные инновационные проекты (работы) по развитию структурных подразделений ИГЭУ в 2009г.:Сб. отчетов ИГЭУ – Иваново. 2010 г.
- [3] Инструкция по предупреждению и ликвидации аварий турбинного оборудования, Эксплуатационная Инструкция (ЭИ) 03.SA.ПЭ.0026.44. – Калининская АЭС, Удомля 2003г.

# Опыт подготовки кадрового резерва из числа студентов очной формы обучения в операционной зоне ОДУ Юга

Д.Н. Гура, В.М. Пасторов, А.Л. Корольков, Ф.В. Михайленко  
Филиал АО «СО ЕЭС» Северокавказское РДУ, Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга  
Пятигорск, Россия  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

*Аннотация* — обучение и развитие кадров, формирование кадрового резерва являются основной задачей, стоящей перед АО «СО ЕЭС». Эффективная работа в этом направлении позволяет гарантировать АО «СО ЕЭС» лидирующие позиции в электроэнергетики. Процесс формирования кадрового резерва, способного поддерживать и увеличивать имеющийся кадровый потенциал - систематическая и плановая работа, которая должна приносить плоды. В основу обучения должно быть положено привлечение в качестве наставников и экспертов для студентов тех сотрудников, которые имеют необходимый опыт, навыки и способны консультировать других. Проанализированы способы и эффективность доведения студентам необходимых знаний и умений, приближенных к действительным условиям работы подразделений ОДУ Юга и РДУ операционной зоны ОДУ Юга. Также представлен опыт совместных научных исследований студентов и работников АО «СО ЕЭС» по темам, актуальным для АО «СО ЕЭС». Описан алгоритм обучения студентов в подразделениях ОДУ Юга и РДУ операционной зоны ОДУ Юга. В докладе обобщен опыт подготовки кадрового резерва из числа студентов очной формы обучения филиалов АО «СО ЕЭС» Южного и Северо-Кавказского Федеральных округов, начиная с 2008 года.

*Ключевые слова:* кадровый резерв; опыт подготовки; способы и эффективность доведения знаний; совместные научные исследования.

## The transportation of electric energy on the basis of microwave beam and rectan

D.N. Gura, V.M. Pastorov, A.L. Korolkov, F.V. Mihailenko  
JSC "SO UPS" North Caucasus RDU, JSC «SO UPS» ODU to the South  
Pytigorsk, Russia  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

*Abstract* — training and development of personnel, formation of the personnel reserve are the main task facing JSC "SO UPS". Effective work in this direction allows to guarantee JSC "SO UPS" the leading positions in the electric power industry. The process of forming the personnel reserve, which is able to maintain and increase the available human resources - is a systematic and planned work that should bear fruit. The training should be based on the involvement of mentors and experts for students who have the necessary experience, skills and are able to advise others. The ways and effectiveness of communicating the necessary knowledge and skills to students, which are close to the actual working conditions of the subdivisions of the ODU of the South and the RDU of the operational zone of the ODU of the South, are analyzed. The experience of joint scientific research of students and employees of JSC "SO UPS" on topics relevant to JSC "SO UPS". The algorithm for teaching students in the subdivisions of the ODD of the South and RDU of the operational zone of the ODU of the South. The report summarizes the experience of preparing the personnel reserve from among the full-time students of JSC "SO UPS" of the South and North Caucasus Federal Districts, beginning in 2008.

*Keywords:* staff reserve; experience in training; ways and effectiveness of knowledge delivery; joint scientific research.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с изменением целей образования и разработкой нового Федерального государственного образовательного стандарта, меняется и методика преподавания в ВУЗе. Новый стандарт основан на компетентном подходе, ориентированном на получении студентами практических знаний и диктует

необходимость внедрения новых методик преподавания. Знания, полученные студентом при обучении в ВУЗе, несколько расходятся со знаниями, необходимыми на производстве. Связано это в основном с тем, что на производстве используется узконаправленное программное обеспечение, которое новоиспеченному работнику приходится осваивать [1].

Основной задачей создания специализированных групп подготовки студентов является подготовка кадрового резерва для АО «СО ЕЭС», квалифицированного и готового в кратчайшие сроки полноценно встать в строй его подразделений и выполнять задания любой сложности.

## II. ПРОФИЛЬНАЯ ПРОГРАММА

Одним из важнейших условий успешного развития энергетики является подготовка специалистов высокой квалификации. Для любой компании вопросы подбора, подготовки и переподготовки, повышения квалификации персонала является одним из важнейших вопросов организации всей деятельности [2].

Эффективными формами учебной работы по формированию ключевых, профессиональных компетенций будущих специалистов является применение различных активных форм и методов обучения: создание проектов, подготовка публичных выступлений, дискуссионное обсуждение профессионально важных проблем, обучение в сотрудничестве, создание проблемных ситуаций.

Новые требования к уровню образованности студентов энергетического профиля приводят к необходимости изменения технологий обучения и переходу к инновационному инженерному образованию, при котором мотивация к усвоению знания достигается путем выстраивания отношений между конкретным знанием и его применением. Инновационное обучение можно охарактеризовать как процесс и результат целенаправленного формирования определенных знаний, умений и технологии к инновационной инженерной деятельности за счет соответствующего содержания и методов обучения [3].

С 2008 года в СКФУ и НПИ совместно с Филиалом АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга (ОДУ) была создана профильная программа подготовки специалистов по направлению «Электроэнергетика».

Программа представляет собой двухлетний курс обучения и прохождения практики в подразделениях ОДУ и СК РДУ. За каждым студентом закрепляется опытный руководитель, контролирующий уровень знаний и компетентности своего подопечного. Обычно за каждым руководителем закрепляется несколько студентов, тем самым приобретает умение работать в коллективе. Обучение проводится по утверждённому руководителем подразделения планам. Также, как и в институте, студентам читаются лекции, и проводится периодическая проверка знаний.

## III. ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ

Особенности обучения рассмотрим на примере службы релейной защиты и автоматики (СРЗА) Филиала АО «СО ЕЭС» Северокавказское РДУ (СК РДУ).

Первые лекции носят ознакомительный характер и направлены на понимание:

- основных функций диспетчерского управления энергосистемами;

- уникальности операционной зоны СК РДУ по количеству субъектов электроэнергетики и их разнородности
- разделения на генерацию, распределительные сети и потребителей электрической энергии. Иерархическая структура;
- организационной структуры СК РДУ, блоков и служб (отделов).

Основной курс лекций включает в себя изучение основ релейной защиты и автоматики.

С первых дней обучения студенты погружаются в атмосферу будней СРЗА. Каждое занятие начинается с анализа ежедневного рапорта отключений устройств и оборудования РЗА. Акцент ставится на приобретении практических навыков работы со специализированным программным обеспечением, используемым в СРЗА. Студенты выполняют задания, относящиеся к компетенции службы. Тем самым реализуется применение полученных теоритических знаний на практике.

При прохождении практики студенты получают индивидуальные задания. Как показывает опыт, в дальнейшем эти наработки ложатся в основу магистерских выпускных работ.

Во главу угла поставлены совместные научные исследования студентов и работников АО «СО ЕЭС» по темам, актуальным для АО «СО ЕЭС». Студенты принимают участия в научно-практических конференциях, публикуют свои труды в периодических изданиях.

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в настоящей статье особенности обучения направлены на повышение активности студентов и их мотивации к учебно-профессиональной деятельности. Применение методов позволяет студентам идентифицировать себя с учебным материалом, перейти от пассивного усвоения знаний к их активному применению в реальных ситуациях, профессиональной деятельности, что способствует повышению качества подготовки будущих специалистов.

## Список литературы

- [1] И.С. Целуковский. Использование динамических моделей при подготовке студентов ВУЗов. //сб. док. V международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». г. Томск, 10-14 ноября 2014, с. 596.
- [2] И.В. Воронов. О подготовке специалистов по профильной программе Системного Оператора совместно с СКФУ и НПИ на примере службы сопровождения рынка сб. док. V международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». г. Томск, 10-14 ноября 2014, с. 615.
- [3] Б.Л. Агранович, А.И. Чучалин, М.А. Соловьев. Инновационное инженерное образование. // Инженерное образование. 2003. -№1. – С. 11-14.
- [4] О.А. Мальшева. Применение интерактивных методов обучения при подготовке студентов энергетических специальностей. //сб. док. V международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». г. Томск, 10-14 ноября 2014, с. 595.

# Психолого-педагогическое сопровождение использования полномасштабного тренажера энергоблока АЭС в вузовской подготовке

М.А. Вольман

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
Иваново, Россия  
maria\_volman@mail.ru

*Аннотация* — Одним из эффективных инструментов по формированию профессиональной компетенций будущего специалиста является использование различных моделирующих программно-технических средств, особое место среди которых занимают полномасштабные тренажеры энергоблоков. Ими оснащены учебно-тренировочные подразделения всех атомных станций России, однако применение таких тренажеров в вузе требует разработки и внедрения специальных методик, в том числе в плане психолого-педагогического обеспечения. Данное исследование касается применения полномасштабного тренажера энергоблока АЭС в Ивановском государственном энергетическом университете. Выявлены индивидуально-личностные особенности студентов, влияющие на успешность выполнения ими тренажерных заданий. На основе выявленных закономерностей и с учетом опыта психолого-педагогического сопровождения процесса обучения работников действующих станций разработаны психолого-педагогические рекомендации, которые внедрены в учебный процесс.

*Ключевые слова* — АЭС, подготовка кадров, полномасштабный тренажер, психолого-педагогическое обеспечение

## Psychological and pedagogical support for use of full-scale simulator in high school

Maria Volman

Ivanovo State Power Engineering University  
Ivanovo, Russian Federation  
maria\_volman@mail.ru

*Abstract* — Various modeling software tools are effective tools for the formation of professional competencies. A special place among them is occupied by full-scale simulators of power units. They are equipped with training subdivisions of all nuclear power plants in Russia. The use of such simulators in a university requires the development and implementation of special techniques, psychological and pedagogical support. The research concerns the application in the Ivanovo State Power Engineering University of a full-scale simulator of nuclear power plants generating units. Individual features of students that affect the success of their training tasks are identified. Based on the identified patterns and taking into account the experience of psychological support of the training process of the workers of operating stations, psychological and pedagogical recommendations developed in the educational process are developed.

*Keywords* — nuclear power plant, training of personnel, full-scale simulator, psychological and pedagogical support

Одним из эффективных инструментов по формированию профессиональной компетенций будущего специалиста является использование различных тренажерных комплексов. Тренажеры являются учебным средством, позволяющим моделировать отдельные действия и будущую профессиональную деятельность в целом. В подготовке специалистов к эксплуатации энергетических объектов они позволяют не только закреплять теоретические знания, но и способствуют формированию умственных навыков, профессионального мышления. Особое место среди моделирующих программно-технических средств занимают

полномасштабные тренажеры энергоблоков, объединяющие полномасштабную модели реального блочного пульта управления и комплексную всережимную математическую модель блока, функционирующую в реальном масштабе времени. Ими оснащены учебно-тренировочные подразделения (центры) всех атомных станций России. В свете повсеместного оснащения учебных центров действующих энергоблоков тренажерными комплексами встает задача их освоения и в вузовской подготовке. Кроме того, использование тренажеров в вузовской подготовке позволяет уже на этом этапе вносить вклад в решение актуальной задачи

повышения уровня подготовки персонала АЭС, который во многом определяет возможность безопасной эксплуатации ядерных энергоустановок.

Применение тренажеров в вузе кардинально отличается в плане тех целей, которые ставятся при их использовании, и требует разработки и внедрения специальных методик. Ивановский государственный энергетический университет располагает уникальным для вузов объектом – полномасштабным тренажером энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Это, в свою очередь, ставит задачу максимально эффективного использования тех преимуществ, которые предоставляет этот объект для учебного процесса. Он дает возможность обучаемому выполнять такие же действия, как оператор на энергоблоке-прототипе, позволяет объединить и систематизировать все ранее полученные знания. Преимущества тренажера, помимо прочего, состоят и в возможности активизации не только и не столько внешних – исполнительских действий, сколько в актуализации внутренних – интеллектуальных процессов, включающих антиципацию, оперативное мышление, планирование новых действий, принятие решения [1].

Кроме того, стоит отметить тот факт, что на действующих объектах ядерной энергетики нашей страны активно реализуется система психологической поддержки персонала в процессе его профессиональной подготовки и производственной деятельности. На атомных станциях, на многих предприятиях ГК «Росатом» созданы и успешно функционируют более 35-ти лабораторий психофизиологического обеспечения, где работают специалисты-психологи, социологи и физиологи [2]. Целесообразным представляется психолого-педагогическое сопровождение и вузовского учебного процесса, особенно тех его элементов, которые касаются использования тренажеров и имитации будущей профессиональной деятельности.

Полномасштабный тренажер является средством личностного развития оператора, а значит и студента. Но существует и обратная связь. У студентов, успешно справляющихся с заданиями на тренажере, и у студентов, испытывающих трудности при выполнении этих задач, могут быть выявлены значимые различия в показателях выраженности индивидуально-личностных качеств, которые необходимо учитывать при работе с ними. Для исследования этих связей использовался метод психологического тестирования. Для оценки индивидуально-психологических особенностей личностей была выбрана стандартизированная валидизированная психодиагностическая методика – многофакторный личностный опросник Р. Кеттелла (форма С) [3]. Методика состоит из опросника и бланка для ответа. Респонденту предлагается ряд вопросов (всего 105). Выбранная психодиагностическая методика и определила набор исследуемых индивидуально-личностных особенностей студентов, а именно 16 личностных факторов и фактор самооценки. Полученные данные анализировались по каждой личности. Ориентируясь на средние оценки и анализ, в котором учитывается соотношение между оценками по факторам, строились индивидуальные графики личности или «профили личности».

Метод экспертных оценок использовался для определения групп студентов с различным уровнем (высоким, средним, низким) успешности выполнения заданий на полномасштабном тренажере. Оценивалась работа студентов по следующим показателям: техническая эрудиция, скорость принятия решения, техническое мышление, общее впечатление. Далее выявлялись индивидуально-личностные особенности студентов с различным уровнем успешности выполнения задания на тренажере. Были составлены психологические портреты каждой из выявленных «по успешности» групп студентов, и проведено их сравнение. Выявлены корреляционные зависимости индивидуально-психологических особенностей студентов от уровня успешности выполнения задания на тренажере и от каждого из оцениваемых показателей тренажерной подготовки в отдельности.

Влияние индивидуально-личностных особенностей на успешность выполнения тренажерных заданий, а значит и на формирование профессиональных компетенций студентов, должно и может быть учтено в методике обучения студентов. На основе выявленных закономерностей, а также с учетом указаний по психолого-педагогическому сопровождению процесса обучения работников станции, закрепленных в отраслевых методических документах, сформулированы психолого-педагогические рекомендации по каждому фактору. Использование этих рекомендаций подразумевает работу как непосредственно с обучающимися (групповая и индивидуальная формы работы), так и с преподавателями, задействованными в тренажерной подготовке. Кроме того, для оценки эффективности программы разработаны критерии оценки выполнения обучающимися тренажерных заданий до начала и после окончания реализации программы психолого-педагогического сопровождения, предполагающие, в том числе, самооценку обучающимися их деятельности.

Программа психолого-педагогического сопровождения внедряется в Ивановском государственном энергетическом университете в процесс подготовки студентов по направлению (специальности) 14.05.02:01 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» и рассматривается как часть комплекса мероприятий по повышению эффективности вузовской подготовки специалистов для АЭС [4].

### Список литературы

- [1] Гандер Д.В. Тренажер в системе профессионального обучения // Психология обучения. – 2013. – №2. – С. 116-119.
- [2] Абрамова В.Н. Методологические основы психологической подготовки персонала промышленных предприятий к работе в условиях повышенного риска // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – №3. – С. 79-87.
- [3] Капустина А.Н. Многофакторная личностная методика Р. Кеттелла. – СПб.: Речь, 2004. – 104 с.
- [4] Семенов В.К., Вольман М.А., Журавлева В.С. Опыт применения компьютерных технологий в вузовской подготовке будущих специалистов для АЭС по программе «вуз-предприятие» // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – №2. – С. 88-95.

# Результаты исследования аварийных режимов работы энергоблока ВВЭР-1000 на ФАТ и ПМТ с исходными событиями в первом контуре

Н.С. Железов, Н.О. Разуваев, Г.В. Булавкин

ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", Иваново, Россия  
E-mail: nsjelezov@gmail.com

*Аннотация* — Главная цель эксплуатационной подготовки и повышения квалификации специалистов АЭС – выработка у них умения быстро принимать ответственные и правильные решения в самых разнообразных ситуациях, включая и аварийные режимы работы. Основная роль в достижении этой цели принадлежит тренажерной подготовке с использованием функционального аналитического и полномасштабного тренажеров (ФАТ и ПМТ) энергоблока АЭС. Для реализации этой подготовки необходимо учебно-методическое обеспечение (УМО) и проведение соответствующих исследований. При исследованиях проводились эксперименты на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000, а также теоретический анализ различных аварийных режимов работы с исходными событиями в первом контуре. Разработано УМО и проведены экспериментальные исследования на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 с последующим теоретическим анализом различных аварийных режимов работы с исходными событиями в первом контуре. Разработанное УМО и проведенные исследования позволяют эффективно решать актуальную проблему интенсификации и повышения мотивации обучения и придания ему практической направленности, а также адаптации программы обучения специалистов с программой и требованиями руководящих документов по подготовке оперативного персонала АЭС.

*Ключевые слова* — энергоблок ВВЭР-1000, подготовка специалистов АЭС, аварийные режимы работы, УМО, ФАТ, ПМТ.

## Results of investigation of emergency operational modes of VVER-1000 type nuclear unit on AFS and FSS with stated characteristics in first circuit

N.S. Jelezov, N.O. Razuvaev, G.V. Bulavkin

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: njelezov@gmail.com

*Abstract* — The main goal of operational and advanced training of NPP specialists is to develop their ability to efficiently make correct decisions and execute them in a timely manner in various situations while under pressure. Simulator-based learning systems with usage of analytical functional simulator (AFS) and full-scale simulator (FSS) of nuclear units play the main role in demonstrating these abilities. Both learning and teaching guides (LTG) and practical researches are necessary to implement these learning systems. Theoretical analysis of different emergency operational modes with stated events in first circuit as well as experiments on analytical functional simulator (AFS) and full-scale simulator (FSS) of VVER-1000 type nuclear unit were conducted during the investigation. LTG was developed and experimental investigations were conducted on AFS and FSS of VVER-1000 type nuclear units with consecutive theoretical analysis of different emergency operational modes with stated characteristics in first circuit. Both LTG developed and conducted the research allowed us to solve essential problems of intensification and raising the motivation for studying and making processes of studying more practice-oriented. It also helps us to adapt specialist's educational program to the criteria from governing documents for training NPP operating personnel.

*Keywords* — VVER-1000 type nuclear unit, training NPP specialists, emergency operational modes, LTG, AFS, FSS.

Любой аварийный режим начинается с нарушения условий нормальной эксплуатации, приводящего к выходу важнейших технологических параметров энергоблока за допустимые пределы. Как правило эти нарушения проявляются внезапно, хотя причины их могут накапливаться в течение длительного времени. Причины возникновения аварийных ситуаций и режимов многообразны. Так, нормальные режимы работы могут быть нарушены вследствие механических повреждений

того или иного элемента энергоблока (например, разрывов циркуляционных трубопроводов, ядерной паропроизводящей установки (ЯППУ), главных паропроводов и др.), обусловленного изменением механических свойств металла в процессе эксплуатации, развитием, имеющихся в металле скрытых дефектов, повышением давления рабочей среды выше допустимого значения и др.; внезапного отключения или выхода из строя того или иного оборудования (например, остановка

главных циркуляционных насосов (ГЦН) из-за потери питания); неправильных коммуникационных переключений в электрической схеме питания собственных нужд и т.п. Значительная часть нарушений нормальной эксплуатации обусловлена неправильными действиями эксплуатационного персонала.

Различают аварийные ситуации и аварийные режимы. Само по себе нарушение нормального режима эксплуатации чаще всего создает аварийную ситуацию, т.е. потенциальную опасность возникновения и развития аварийного режима. Если в аварийной ситуации не принимать никаких мер для восстановления нормального режима или если принятые меры окажутся недостаточными, она перерастает в аварийный режим, при котором энергоблок не может продолжать работу в требуемом режиме и развитие которого создает угрозу разрушения оборудования и нарушения безопасности АЭС, в наиболее тяжелых случаях с радиоактивным выбросом за пределы станции.

Наиболее серьезные аварийные ситуации, при которых возникает опасность расплавления активной зоны, связаны с непреднамеренным высвобождением реактивности и обусловленной этим угрозой разгона ядерного реактора, а также нарушением отвода теплоты от ТВЭЛов из-за потери теплоносителя вследствие разгерметизации циркуляционного контура или из-за нарушения работы тепломеханического оборудования энергоблока.

В процессе проектирования АЭС разрабатывают меры защиты ядерных реакторов при возникновении максимальной проектной аварии (МПА). Такой аварией по отношению к ВВЭР считают мгновенный разрыв основного трубопровода, по которому теплоноситель, охлаждающий активную зону, попадает в ядерный реактор, причем происходит беспрепятственное двухстороннее истечение теплоносителя, а реактор работает с некоторым превышением номинальной мощности за счет допусков системы контроля и управления.

Хотя первопричины аварий могут лежать в недостатках, допущенных на каждом этапе жизни АЭС, непосредственными причинами аварийных ситуаций являются технический отказ оборудования или ошибки эксплуатационного персонала. По статистике, в ядерной энергетике из-за ошибок персонала происходит до 80% тяжелых аварий[1].

Надежность, безопасность и эффективность работы АЭС во многом определяется квалификацией эксплуатационного персонала. Главная цель эксплуатационной подготовки и повышения квалификации специалистов – выработка у них умения быстро принимать решения в самых разнообразных ситуациях, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации ядерного энергоблока (включая аварийные). Разумеется, при этом речи не может идти о преднамеренном создании аварийных ситуаций на действующем оборудовании АЭС. Основная роль в достижении поставленной цели принадлежит

инновационным формам обучения, среди которых важную роль играет тренажерная подготовка.

Необходимость применения современных технических средств обучения в целях интенсификации обучения и придания ему практической направленности (повышения качества практической подготовки), а также адаптации программы обучения специалистов с программой и требованиями руководящих документов по подготовке оперативного персонала АЭС представляется весьма актуальным.

Внедрение в учебный процесс компьютерных обучающих систем (КОС), в сочетании с практическими занятиями на функциональном аналитическом тренажере (ФАТ) и полномасштабном тренажере (ПМТ) энергоблока ВВЭР-1000, позволяет обеспечить системный подход к организации образовательного процесса, т.е. поэтапный, логически последовательный процесс организации обучения, начиная с приобретения необходимых оперативному персоналу АЭС знаний, умений и навыков и заканчивая оценкой эффективности проведенного обучения. Использование в учебном процессе уникального оборудования – ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000, позволяющего проводить профессиональную подготовку оперативного персонала АЭС на базе полномасштабной модели реального БПУ и комплексной всережимной математической модели энергоблока, функционирующей в реальном масштабе времени – позволяет сократить сроки адаптации молодого специалиста на производстве, так как такая форма обучения студентов стыкуется с подготовкой оперативного персонала на АЭС [2].

Программное обеспечение ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 позволяет реализовать аварийные режимы работы ядерного энергоблока с различными исходными событиями. Ход аварийного процесса можно контролировать как в реальном времени, так и с ускорением до 10 раз. Это дает возможность исследовать различные аварийные ситуации и режимы со значительным сокращением затрат времени на проведение экспериментов. Изменение параметров технологических систем, влияющих на безопасность энергоблока, отслеживается при помощи соответствующих графиков. Формат графиков можно менять, адаптируя их к конкретной аварийной ситуации или режиму. На дисплей компьютера можно выводить любой необходимый набор графиков изменения технологических параметров во времени с последующей их распечаткой для анализа результатов.

Для реализации поставленной задачи разработаны лабораторный стенд на базе ПМТ и ФАТ энергоблока ВВЭР-1000, сценарий, методика проведения экспериментальных исследований, а также методика обработки данных, полученных в результате проведения экспериментальных исследований; учебно-методическое обеспечение (УМО) и проведены экспериментальные исследования на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 с последующим теоретическим анализом различных аварийных режимов работы с исходными событиями в первом контуре.

В качестве примера на рисунках 2 – 13 приведены результаты исследований протекания МПА энергоблока ВВЭР-1000 с паротурбинной установкой К-1000-60/3000 (мгновенный разрыв «холодного» трубопровода четвертой циркуляционной петли). Следует отметить, что «расшифровка» графиков реализуется с помощью специально созданной спецификации, которая здесь не приводится, т.к. не вписывается в регламентированный формат и допустимый объем статьи (нужны две страницы формата А-4), поэтому приводимые графики играют иллюстративно-информационную роль о содержании и объеме работы. Заинтересованные лица при необходимости могут обратиться за соответствующими разъяснениями и дополнительной информацией к авторам статьи.

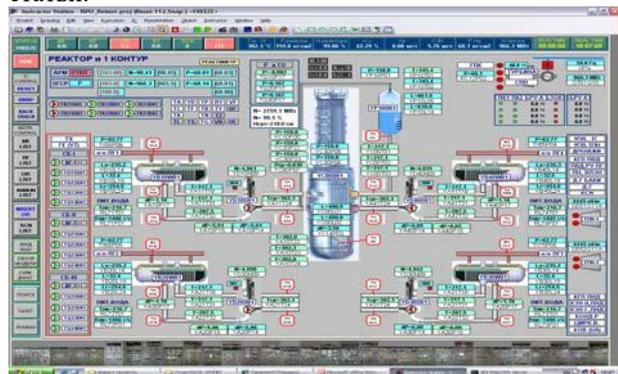


Рис. 1. Общий вид ФАТ.



Рис.2. Изменение во времени нейтронной, тепловой и электрической мощностей, а также положения стержней СУЗ.



Рис. 3. Изменение во времени параметров теплоносителя в компенсаторе давления и уровень теплоносителя в реакторе.



Рис. 4. Изменение во времени температуры «горячего» и «холодного» теплоносителя по циркуляционным петлям.



Рис. 5. Изменение во времени средние температуры теплоносителя по циркуляционным петлям.

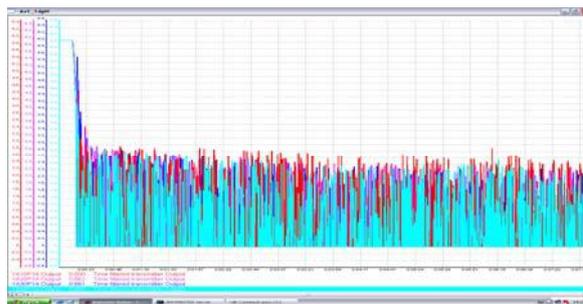


Рис. 6. Изменение во времени перепада давления теплоносителя в ГЦН 1-4.

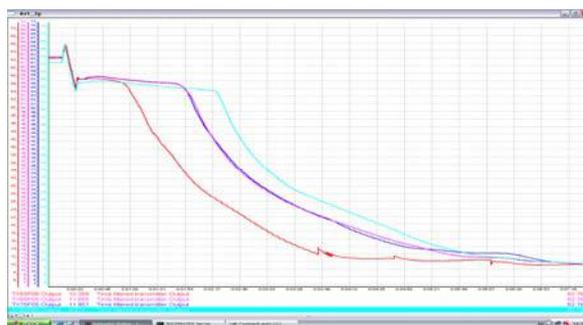


Рис. 7. Изменение во времени давления пара в парогенераторах.



Рис. 8. Изменение во времени расхода питательной воды в парогенераторы.

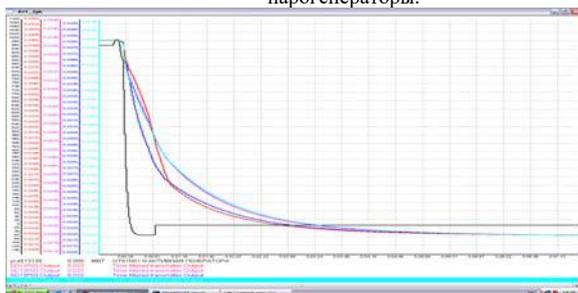


Рис. 9. Изменение во времени давления пара в корпусах конденсатора паровой турбины

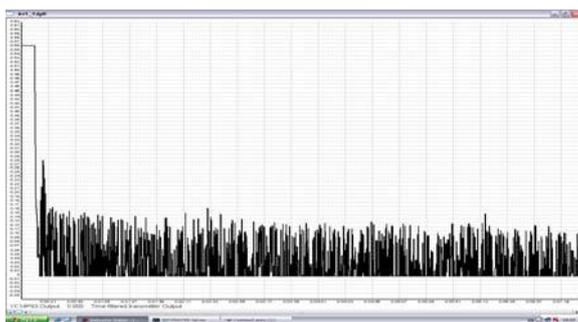


Рис.10. Изменение во времени перепада давления теплоносителя в корпусе ядерного реактора.

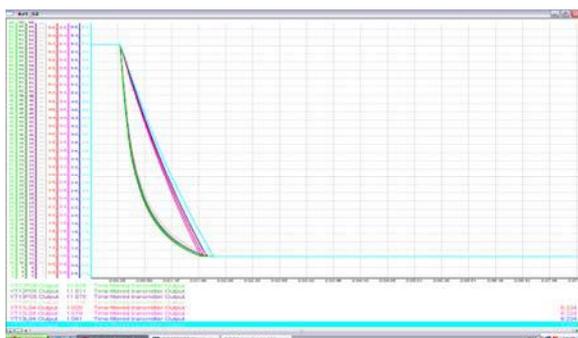


Рис. 11. Изменение во времени параметров теплоносителя в гидроаккумулирующих ёмкостях САОЗ.

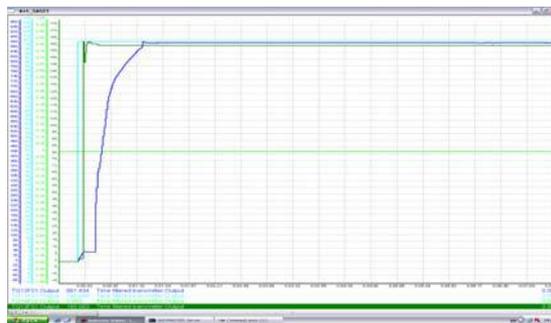


Рис. 12. Изменение во времени расхода теплоносителя и борного раствора в активной части САОЗ-1.

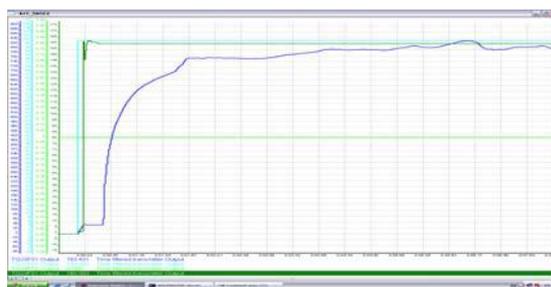


Рис.13. Изменение во времени расхода теплоносителя и борного раствора в активной части САОЗ-2 и 3

### Выводы по работе.

1. Разработан лабораторный стенд на базе ПМТ и ФАТ энергоблока ВВЭР-1000, необходимый для реализации поставленной задачи;
2. Разработаны сценарий, методика проведения экспериментальных исследований, а также методика обработки данных, полученных в результате проведения экспериментальных исследований;
3. Подготовлено УМО для проведения экспериментальных исследований аварийных режимов работы с исходными событиями в первом контуре на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000;
4. Проведены эксперименты на ФАТ и ПМТ энергоблока ВВЭР-1000 при различных исходных событиях аварийных режимом, инициированных в технологических системах первого контура.
5. Разработанное УМО и проведенные исследования позволяют эффективно решать актуальную проблему интенсификации и повышения мотивации обучения и придания ему практической направленности, а также адаптации программы обучения специалистов с программой и требованиями руководящих документов по подготовке оперативного персонала АЭС.

### Список литературы

- [1] Иванов В.А. Режимы мощных паротурбинных установок. Л.: «Энергия», 1971.
- [2] Щербнев В.С, Булавкин Г.В. и др. Разработка компьютерных тренажерных систем по эксплуатации оборудования блока АЭС. Комплексные инновационные проекты (работы) по развитию структурных подразделений ИГЭУ в 2009г.:Сб. отчетов ИГЭУ – Иваново. 2010 г.

# Обновление программного обеспечения по курсу «Переходные процессы в ЭЭС»

А.В. Сидоров, И.А. Москвин, Д.Н. Кормилицын, А.А. Братолобов  
ФГБОУ ВО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"  
Иваново, Россия  
alexandriksid@gmail.com

*Аннотация* — разработана программа для обучения студентов по курсу «Электромеханические переходные процессы»

*Ключевые слова:* программное обеспечение, электромеханические переходные процессы, электромагнитные переходные процессы, статическая устойчивость, динамическая устойчивость.

## Software upgrade on “Transients in electrical power system” course

Alexander Sidorov, Ilya Moskvina, Dmitriy Kormilitsyn, Alexander Bratolyubov  
Ivanovo State Power University  
Ivanovo, Russian Federation  
alexandriksid@gmail.com

*Abstract* — the program for teaching students on “Transients in electrical power system” course has been developed.

*Keywords* — software, power-frequency transients, electrodynamic transients, steady-state stability, dynamical stability.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы – один из видов учебной деятельности, дающий студентам наиболее наглядное представление об изучаемой дисциплине. С помощью различных моделей реальных устройств будущие специалисты могут освоить все тонкости предмета.

Помимо физического, в современных реалиях набирает популярность компьютерное моделирование. Такой метод, при достаточной точности моделирования, позволяет изучить все процессы, протекающие в реальных устройствах, но без покупки и последующего обслуживания сложных физических моделей.

Однако даже к компьютерному моделированию предъявляются крайне жесткие требования. Когда речь заходит о программах для обучения студентов, помимо достижения необходимой точности моделирования и расчётов, нужно помнить о простоте использования и наглядности представления результатов.

Одним из важнейших курсов, преподаваемых студентам электроэнергетических специальностей, является курс «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах (ЭЭС)». Именно в процессе изучения данной дисциплины происходит знакомство с такими понятиями, как статическая и динамическая устойчивость в ЭЭС, являющимися важнейшими показателями возможности осуществления режима. Предыдущие программы по курсу были написаны в среде разработки МИК-АЛ в ИГЭУ на кафедре систем автоматизации проектирования и датированы 1993 годом. Основные недостатки их использования заключаются в неудобстве работы с одной конфигурацией сети при выполнении несколь-

ких экспериментов; некажистом для современного времени интерфейсе, а также в совместимости – для работы программ необходима операционная система не старше Windows XP.

Во время разработки одним из ключевых моментов было устранение этих недостатков.

### II. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Для написания программы был выбран современный, удобный в реализации и восприятии язык программирования C#.

Программа получила название SSST (Steady State Stability and Transient).

Программа предназначена для расчёта статической и динамической устойчивости простейшей ЭЭС: одного генератора, выдающего мощность на шины бесконечной мощности (ШБМ).

Отличительной особенностью такого подхода является тот факт, что все элементы ЭЭС, находящиеся между ШБМ и генератором, представляются в виде собственных и взаимных проводимостей. Это позволяет оценивать устойчивость практически любых ЭЭС после их эквивалентирования.

### III. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ

Все параметры в программе задаются и выражаются в относительных единицах, время – в секундах.

Программа позволяет выполнять следующие расчёты:

– расчёт установившегося режима по входным данным;

- построение угловых характеристик  $P_{ген}(\delta)$  для генератора без установленной системы автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и с ней с возможностью выбора любого режима на них для дальнейшего рассмотрения (рис. 1);
- оценка статической устойчивости выбранного режима путем составления и дальнейшего аналитического решения характеристического уравнения режима на предмет нарушения как статической аperiodической, так и статической колебательной устойчивости;
- построение областей устойчивости для выявления значений коэффициентов регулирования  $K_1$ ,  $K_2$ , не нарушающих статическую колебательную устойчивость методом D-разбиения (рис. 2);
- построение корневых годографов (рис. 3);
- построение графиков изменения режимных параметров во времени, по которым происходит оценка динамической устойчивости.

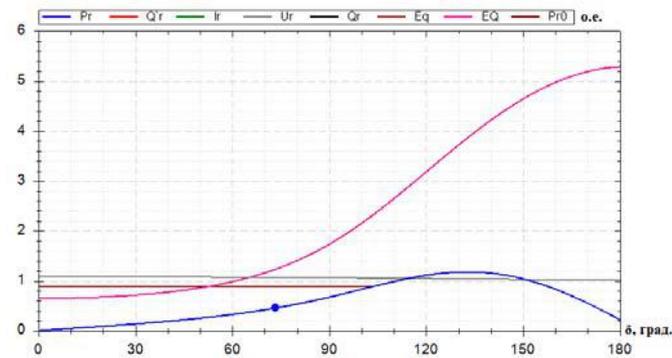


Рис. 1. Угловые характеристики

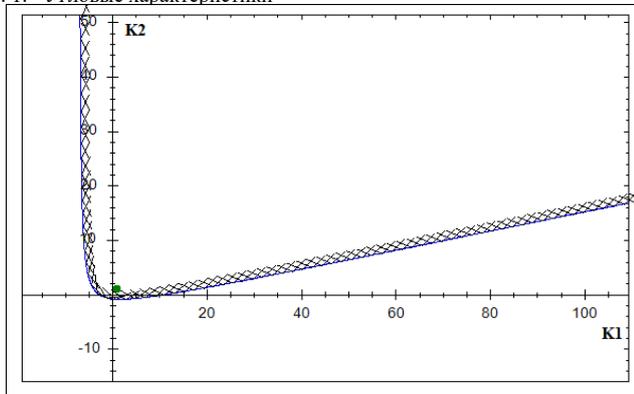


Рис. 2. Области устойчивости, построенные методом D-разбиения

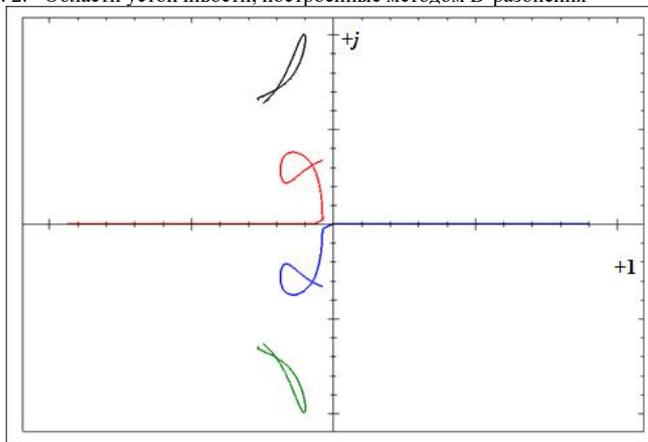


Рис. 3. Корневой годограф

Все внесенные данные могут быть сохранены пользователем в отдельный файл с возможностью последующего открытия.

Все графики, выводимые в ходе расчёта, могут быть скопированы и сохранены в виде изображений.

#### IV. ИСПОЛЪЗУЕМЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Оценка статической устойчивости производится в соответствии с методом первого приближения. Составляется система линеаризованных уравнений, описывающих переходные процессы в малых отклонениях режимных параметров от значений, которые они имели в анализируемом установившемся режиме.

Частные производные, содержащиеся в уравнениях, вычисляются по аналитическим формулам, изложенным в [1]. По системе составляется характеристический определитель, который раскрывается и приравняется к нулю. Полученное характеристическое уравнение решается методом Феррари. По полученным корням происходит оценка статической устойчивости.

Для оценки динамической устойчивости решается система уравнений на указанном интервале времени. Режимные параметры, связанные с механической инерцией (угол ротора генератора  $\delta$ , скольжение  $s$ , переходная ЭДС генератора  $E'_q$  и ЭДС обмотки возбуждения  $E_{qe}$ ) выражаются через дифференциальные уравнения, численно решаемые методом Рунге-Кутты 4 порядка с заданным шагом интегрирования.

В расчётах принимается допущение:

$$P_T = const, \quad (1)$$

т.е. о постоянстве механической мощности турбины.

#### V. ВЫВОДЫ

Программа была полностью разработана и уже введена в процесс обучения. Кроме проведения лабораторных занятий, под программу была адаптирована и курсовая работа.

Также, программа была успешно зарегистрирована в реестре программ для ЭВМ.

Поддержка программы не будет прекращена; планируется расширение функционала.

#### Список литературы

- [1] Ледянкин, Д.П., Шабарин, Е.В. Расчет переходных электромеханических процессов в электрических системах: Учебное пособие / «Ивановский государственный университет», Иваново, 1979. – 30с.
- [2] Братолобов, А.А., Огорельшев Н.А., Аржанникова А.Е. Применение ЭВМ в учебных расчетах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем: Учебное пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 108 с.
- [3] Сидоров, А.В., Москвин, И.А., Кормилицын Д.Н., Братолобов А.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660082. «SSST».

# Инженерные соревнования по оперативно-диспетчерскому управлению среди специалистов-стажеров в филиалах АО «СО ЕЭС»

О.В. Белоусова, И.М. Груздев, О.Ю. Малоземова  
Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Урала  
Екатеринбург, Россия  
belousova@ural.so-ups.ru

*Аннотация* — Системный оператор заинтересован в полноценной подготовке будущих кадров. Стажировка является одной из частей данной подготовки. Во время ее проведения стажер глубже знакомится с будущим местом работы и задачами, выполняемыми службой, в которой проходит стажировка. Работодатель в это время может ближе познакомиться со стажером и контролировать его возможности к усвоению новых знаний и целей, которые стоят перед службой. Один из методов контроля – проведение инженерных соревнований. Стажер во время их проведения имеет возможность продемонстрировать знания, полученные во время стажировки. Данная статья посвящена проведению инженерных соревнований, постановке целей и задач данного мероприятия.

*Ключевые слова* — стажировка, инженерные соревнования.

## Engineering competitions on operational-control office management among specialists-trainers in branches jsc «SO UPS»

Olesya Belousova, Ilya Gruzdev, Olga Malozemova  
SO UPS, JSC «Branch Interregional Dispatching Office, Energy System of Ural»  
Yekaterinburg, Russia Federation  
belousova@ural.so-ups.ru

*Abstract* — the System operator is interested in the full preparation of future personnel. Internship is one of the parts of this training. During it, the trainee gets deeper acquainted with the future work place and the tasks performed by the service in which the internship takes place. The employer at this time has the opportunity to become more familiar with the trainee and monitor his ability to assimilate new knowledge and goals that are facing the service. One of the methods of control is the holding of engineering competitions. An intern at the time of their holding has the opportunity to demonstrate the knowledge gained during the internship. This article is devoted to engineering competitions, setting goals and objectives of this event.

*Keywords* — internship, engineering competitions.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Системный оператор активно занимается кадровой политикой. Подготовка кадров начинается со старшей школы, когда талантливые учащиеся из профильных школ вступают в программу «Школа-Вуз-Предприятие». Для них читается курс лекций о введении в специальность, они занимаются написанием статей, участием в конференциях, созданием технических устройств, имеющих отношение к электроэнергетике, так же они ездят на экскурсии в предприятия отрасли, а летом имеют возможность поехать на образовательный форум «Энергия молодости». Работа со студентами представляет собой поездки на экскурсии, участие в конференциях,

решение инженерных кейсов, а также образовательный форум «Энергия молодости». После получения диплома бакалавра студентам, имеющим высокие показатели по учебе и прошедшим вступительные испытания, предоставляется возможность пройти летнюю практику в одном из филиалов АО «СО ЕЭС» (далее по тексту – Общество), по результатам которой принимается решение о зачислении в Группу кадрового резерва (далее по тексту – ГКР) и трудоустройстве на должность специалиста-стажера (далее по тексту – стажер). На всех этапах практики и стажировки проводятся контрольные мероприятия для проверки степени усвоения навыков и знаний. Так, например, по итогам практики студенты защищают доклады, где освещают основную информацию

о деятельности структурного подразделения, в котором проходили практику, а также рассказывают, какие задачи непосредственно выполнялись за время практики. По итогам стажировки проводятся оценочные мероприятия со стажерами ГКР, получившими на момент оценки высшее профессиональное образование (бакалавр, специалист, магистр, в том числе обучающихся на последнем курсе магистратуры), которые включают в себя: оценку со стороны учебного заведения, информацию о результатах стажировки (оценка наставника), оценку кандидата с помощью тестов профессиональных способностей и профессиональных личностных опросников, в том числе по результатам мотивационного опросника. База данных с итоговым рейтингом стажеров используется при подготовке предложений генеральному директору на заполнение существующих (планируемых) вакансий.

Перечисленные мероприятия имеют большой вклад в обучение и отбор будущих специалистов. Однако не всегда предоставляют комплексную картину о навыках и способностях студентов. В настоящей работе предлагается еще один метод обучения и контроля – инженерные соревнования. Главной особенностью проведения данных соревнований является взаимодействие стажеров различных структурных подразделений, проверка их знаний и практических навыков в условиях стрессовой ситуации.

Похожие соревнования использует одна известная нефтегазовая компания для проверки знаний и навыков инженеров, а Общество проводит соревнования профессионального мастерства диспетчеров, где принимают участие работники только оперативно-диспетчерской службы (далее по тексту – ОДС). Отличительной чертой предлагаемых соревнований является ориентированность на стажеров, что в значительной степени влияет на содержание и формат проведения. Также одним из основных преимуществ предлагаемой концепции является привлечение стажеров из разных структурных подразделений и их активное взаимодействие.

## II. ОПИСАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ СОРЕВНОВАНИЙ

### A. Цель соревнований

Приобретение молодыми специалистами практических навыков при выполнении рабочих задач, решаемых Системным оператором, формирование представлений о механизмах взаимодействия отдельных подразделений и о применении Нормативно-правовых актов (далее по тексту – НПА) и Нормативно-технических документов (далее по тексту – НТД) на практике.

### B. Задачи соревнований

- Демонстрация уровня знаний, приобретенных участниками при обучении в вузе и в процессе стажировки в филиалах Общества.
- Выявление имеющихся пробелов в знаниях стажеров посредством экспертного анализа принятых ими решений.
- Повышение квалификации стажеров ГКР.

- Оценка руководителями профильных структурных подразделений уровня подготовки стажеров, умения применить полученные теоретических знания и навыки, приобретенные в ходе прошедших стажировок.

### C. Условия участия в соревнованиях

В соревнованиях принимают участие стажеры ГКР из различных Объединенных диспетчерских управлений (последнего года обучения магистратуры или выпускники магистратуры), а также молодые специалисты, успешно окончившие обучение и ранее проходившие стажировку в одном из филиалов Общества в текущем году, со средним баллом по успеваемости не ниже четырех и с отсутствием академических задолженностей. Данное требование обусловлено высокой степенью сложности заданий, для решения которых требуются обширные знания по разным направлениям.

От каждой операционной зоны (далее по тексту – ОЗ) формируется команда численностью 5-6 человек из разных структурных подразделений. В каждой команде по 1-2 стажера из ОДС, службы релейной защиты и автоматики (далее по тексту – СРЗА) и службы электрических режимов (далее по тексту – СЭР). Допустимо участие стажеров других структурных подразделений при условии однообразного состава команд из различных Объединенных диспетчерских управлений.

Участники соревнований обеспечиваются всем необходимым материалом и соответствующими техническими средствами для решения поставленных перед ними задач.

### D. Состав экспертной комиссии

- Главный судья – руководитель одного из филиалов Общества в котором проводятся соревнования.
- Заместитель (заместители) главного судьи – представитель другого филиала Общества.
- Члены комиссии – руководители и специалисты служб, из числа которых формируются команды.
- Секретарь комиссии – специалист, который ведет протоколирование соревнований, оформление необходимых документов.

Также в соревнованиях принимают участие следующие приглашенные специалисты:

- Комендант, арбитр – специалист, отвечающий за контроль своевременности предоставления ответов командами.
- Наставники команд – отвечают за подготовку команд к соревнованиям, оказывают помощь при подготовке ответа командами.
- Тренеры (коучи), консультанты – специалисты иных организаций ТЭК, а также преподаватели профильной кафедры университета, которые могут оказывать консультативную помощь экспертной комиссии по вопросам оценки первой ступени очного этапа.

- Ведущий соревнований.

### Е. Регламент соревнований

Схематично регламент соревнований представлен на рисунке 1



Рис. 1 – Регламент проведения соревнований

### Ф. Протесты/Апелляции

Комиссия по организации просмотра работ команд и проведения апелляции создается из числа экспертной комиссии и приглашенных специалистов. В состав апелляционной комиссии могут входить: главный судья, заместитель судьи, члены комиссии, а также наставники команд, тренеры, консультанты и преподаватели профильной кафедры университета. Окончательное подведение итогов соревнований проходит только по окончании процедуры ознакомления командами с результатами и проведения апелляции.

## III. ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ СОРЕВНОВАНИЙ

Этапы соревнований: заочный и очный.

Заочный этап проводится за неделю до начала очного.

Предполагается, что суммарно очный этап соревнований будет иметь продолжительность 5 дней (День 1 – заезд и размещение участников, дни 2-4 – проведение трех очных ступеней, день 5 – подведение итогов, награждение и отъезд участников). Программа каждого дня будет предоставлена участникам на заочном туре вместе со всеми необходимыми документами.

### А. Заочный этап соревнований

Этап открывается видеоконференцией, в которой участвуют сформированные команды от каждой операционной зоны. Во время видеоконференции проводится жеребьевка, цель которой распределить задания для каждой команды. Жеребьевка исключает

возможность работы команды с документами своей ОЗ. Так, например, команда ОЗ ОДУ Урала не должна работать со схемой ОЭС Урала.

После жеребьевки командам предоставляются все необходимые документы для изучения и подготовки. Исходные данные должны включать в себя энергосистему, на которой будет проводиться второй этап очных соревнований. Для соревнований не должна использоваться схема реальной энергосистемы. Это связано с тем, что реальная энергосистема имеет сложную конфигурацию и множество особенностей, что затрудняет образовательный процесс. Она должна быть разработана отдельно. В сеть следует включать ВЛ 500 кВ и ВЛ 220 кВ. Также в исходных данных должна присутствовать информация о силовом оборудовании, установленном в энергосистеме, о релейной защите и автоматике.

### В. Очный этап соревнований

- Первая ступень – теоретическая. Командам необходимо ответить на вопросы, связанные со знанием дисциплин «Релейная защита и автоматика», «Электрические системы и сети», «Электрическая часть станций и подстанций», а также вопросы, связанные с деятельностью и историей Системного оператора, и предоставить ответы в письменном виде.
- Вторая ступень – практическая. Данная ступень заключается в решении задачи, поставленной перед командой, но с разделением обязанностей для каждого члена команды. Так, для стажеров СЭР могут быть предоставлены задачи на поиск максимально допустимых и аварийно допустимых перетоков (МДП и АДП). Для стажеров СРЗА может предоставляться задача на выбор уставок релейной защиты. Стажеры ОДС могут решать задачу на введение режима в допустимую область после аварийной ситуации.
- Третья ступень – ситуационная. На данной ступени используются исходные данные, выданные за неделю до соревнований. Помимо этого, в качестве исходных данных добавляется текущий режим энергосистемы. Постепенно начинают вводиться возмущения. Цель команды - ввести режим в допустимую область и обеспечить питание всех потребителей. Стажер ОДС является командиром команды и принимает решение о выполнении мероприятий и проведении необходимых расчетов. Расчеты проводятся стажером СЭР. Стажеру СРЗА может быть поручено выявление причин возникновения аварийной ситуации. В случае наличия в командах стажеров других структурных подразделений для них могут быть отдельно разработаны задания. Например, стажер службы перспективного развития может предложить меры по устранению подобных аварийных ситуаций в будущем. Итог решения – новый установившийся режим сети и информация о причине аварии. Предполагается, что вся ступень пройдет с использованием программных комплексов, а схема сети и возмущения будут отображаться на большом экране.

На протяжении всех этапов и ступеней соревнований ответы команд оценивает экспертное жюри.

### С. Подведение итогов

За каждый пройденный этап участникам будут выставляться соответствующие баллы, по итогам которых будет определена команда победителей. Определение команд, занявших 1, 2 и 3 места, и присуждение им призов различной степени. Из участников всех команд будет определен лучший стажер в своей номинации. Например, «Лучший специалист-стажер ОДС».

### IV. ОЖИДАЕМЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

Данное мероприятие позволит молодым специалистам оценить свои силы, знания, приобретенные навыки и умения в смоделированных ситуациях, приближенных к реальным задачам, решаемым Системным оператором.

Кроме того, у стажеров сформируется представление о механизмах взаимодействия отдельных подразделений Общества и о применении НПА и НТД на практике.

Руководители структурных подразделений, в которых участники проходят стажировку, при необходимости, смогут скорректировать планы развития стажеров, а также обменяться опытом организации работы с ГКР.

### V. ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ЭТАПОВ

#### А. Первая ступень

- Описание структуры оперативно - диспетчерского управления;
- Физические процессы во время асинхронного хода в энергосистеме. Причины и последствия. Характер изменения основных параметров.
- Принцип работы газового реле трансформатора.

#### В. Вторая ступень

Пример задания для стажера СЭР. Станция (показана на рисунке 2) связана с энергосистемой пятью ВЛ. Максимальная мощность станции составляет 3000 МВт. Сопротивление линий в относительных единицах показано на рисунке 2. В контролируемое частичное сечение входят три ВЛ (см. рисунок 2). МДП без ПА в данном сечении составляет 1500 МВт и определяется исходя из необходимого запаса по статической апериодической устойчивости в послеаварийной схеме при отключении одной из ВЛ сечения (любой). Необходимо определить требуемый объем управляющих воздействий для АПНУ, установленной на станции для обеспечения выдачи полной мощности станции.

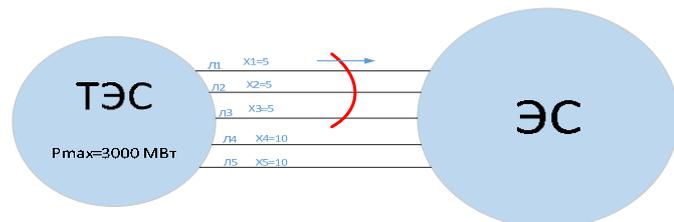


Рис. 2 – Схема сети

Пример задания для специалиста СРЗА. На рисунке 3: тип опоры ПБ-2, изолятор ПС-160Дх28 (146 мм), Dз = 330 мм, провод АС-330/43 3х400 (Rуд = 0,089 Ом/км, D=25,2 мм), грозотрос отсутствует.

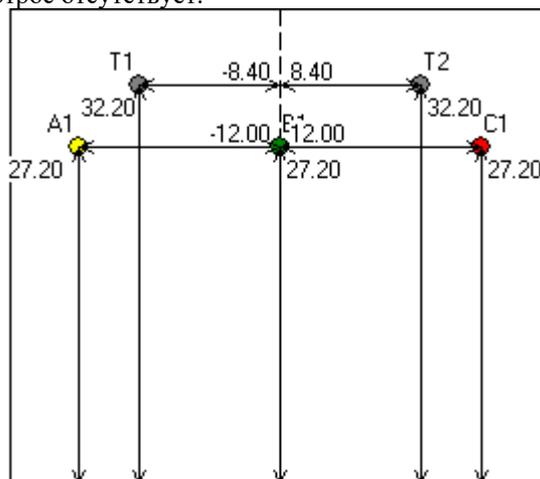


Рис. 3 – Схема расположения ЛЭП

Задание: по заданным параметрам выполнить ручной расчет сопротивлений прямой и нулевой последовательностей линии электропередач.

#### С. Третья ступень

Исходный режим. Ремонт ВЛ1 и ВЛ2. Максимум нагрузки на ПС1, ПС2, ПС3.

Аварийная ситуация. По неизвестной причине отключается ВЛ 3.

В ПАРе загрузка ВЛ4 составляет 114,6%

Автоматика действует на отключение 1го генератора и на разгрузку 2-го генератора на 15 МВт на ТЭЦ-1.

2-ой генератор в результате разгрузки аварийно отключается.

Из-за избыточной разгрузки ТЭЦ-1 происходит перегрузка трансформатора на ПС4, ВЛ5 и ВЛ6.

АОПО АТГ ПС4 с выдержкой времени действует на отключение потребителей на ПС1 и с большей выдержкой времени на ПС2.

Требуется ввести режим в допустимую область и включить отключенных потребителей.

### Список литературы:

- [1] Белоусова О.В., Малоземова О.Ю. Программа повышения качества производственных практик/стажировок в филиале ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Урала. // Сборник докладов Международной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодежи". – Иваново. – 2015. С.510-513
- [2] Чеклцова С.П. "Школа-ВУЗ-предприятие": программа подготовки кадров// Справочник по управлению персоналом. - 2014 №6. - С.86-92

# Программный комплекс лабораторных работ «ЭкоЛаб» по дисциплине «природоохранные технологии на ТЭС»

Н.П. Алексеев, А.В. Деревянко, Д.А. Денищук, К.С. Фоменко  
НИУ «МЭИ»  
Москва, Россия

E-mail: alekseevnp@list.ru, derevyankoanv@gmail.com, dmitry.denishuk@yandex.ru, fomenko.ks@gmail.com.

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Разработанный программный комплекс по дисциплине «Природоохранные технологии на ТЭС» позволяет изучить процессы образования вредных веществ, получить практические знания по влиянию энергетических объектов на окружающую среду и освоить применение современных технологий снижения их воздействия.

**Материалы и методы:** При проектировании программного комплекса лабораторных работ (далее ПКЛР) «ЭкоЛаб» по дисциплине «Природоохранные технологии на ТЭС» были использованы современные средства разработки – Java 8, Spring Framework, Vaadin Framework.

**Результаты:** Реализовано веб-приложение, доступное как из браузера, так и из настольного клиента, включающее базу данных под управлением СУБД PostgreSQL для хранения результатов выполнения лабораторных работ пользователями курса. Также предусмотрено автоматическое сохранение промежуточных шагов выполнения лабораторной работы.

**Выводы:** В данный момент ПКЛР «ЭкоЛаб» находится на завершающей стадии разработки и уже в сентябре 2017 года начнется его апробация в учебном процессе кафедры ТЭС Московского Энергетического Института г. Москва

**Ключевые слова** — выбросы, приземные концентрации, уровней шумов, тепловые электрические станции, современные природоохранные технологии.

## Software complex of laboratory works "EkoLab" for the discipline "environmental technologies at thermal power plants"

Nikolay Alekseev, Andrey Derevyanko, Dmitry Denishchuk, Konstantin Fomenko  
NRU «MPEI»  
Moscow, Russia

E-mail: alekseevnp@list.ru, derevyankoanv@gmail.com, dmitry.denishuk@yandex.ru, fomenko.ks@gmail.com

## Abstract

**The state of the question:** The program complex was developed for the discipline "Environmental technologies at thermal power plants (TPP)". This software allows students to study harmful substances formation processes, to obtain practical knowledge of power facilities negative impact on the environment and research modern environmental technologies at TPP.

**Materials and methods:** During construction of software complex of laboratory works (SCLW) "EkoLab" for the discipline "Environmental technologies at TPP" there was used modern development tools – Java 8, Spring Framework, Vaadin Framework.

**Results:** Web application was implemented both for browser and for desktop client, including the database managed by the PostgreSQL DBMS for storing the users results of laboratory works. In addition to it the software provides automatic saving intermediate lab works steps.

**Conclusions:** At this moment SCLW "EkoLab" is at the final stage of development, at the September of 2017 will be tested begin in the educational process in Moscow Power Engineering Institute at the department of Thermal Power Plants.

**Keywords** — emissions, surface concentrations, noise levels, thermal power plants, modern environmental technologies.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее важных задач, стоящих перед высшими и средне-специальными учебными заведениями России является активное вовлечение студентов в процесс их профессионального становления и повышение интереса к изучаемым дисциплинам. Стремительное развитие

информационных технологий позволяет сделать процесс обучения интерактивным, наглядным и максимально удобным как для студентов, так и для преподавателей. Именно для этих целей на кафедре Тепловых электрических станций Московского энергетического института разрабатывается программный комплекс для

проведения лабораторных работ по дисциплине «природоохранные технологии на ТЭС».

## II. РЕНОВАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Курс «природоохранные технологии на ТЭС» МЭИ включает в себя проведение и защиту ряда лабораторных работ, направленных на освоение студентами основных экологических расчетов, повсеместно используемых при оценке воздействия энергетических объектов и промышленных предприятий на окружающую среду.

Первый блок лабораторных работ направлен на изучение расчетов выбросов вредных газообразных веществ и пыли и их рассеивания в атмосфере, второй блок - изучение шумового загрязнения от энергетического оборудования.

В результате выполнения лабораторных работ студенты рассчитывают выбросы загрязняющих веществ и строят карты их рассеивания для дальнейшего анализа; ведут расчеты согласно нормативным методикам расчета уровней звукового давления в контрольных точках. Отличительной чертой разрабатываемого комплекса, при простоте использования и приветливом интерфейсе является максимальное приближение исходных данных и результатов лабораторных работ к реальным условиям. Исходные данные приняты в соответствии с показателями существующих энергетических объектов, а карты рассеивания строятся на картах реальных городов России. Также учитываются климатические условия в исследуемых регионах. Благодаря программному комплексу «ЭкоЛаб» студенты смогут наглядно оценить экологическое влияние ТЭС на районы реальных городов.

Программный комплекс обладает рядом особенностей, позволяющих повысить качество образования по изучаемой дисциплине.

Перед началом каждой лабораторной работы студенту предлагается ознакомиться с короткой презентацией по изучаемой теме. Презентация включает в себя наглядный графический материал и комментарии по основным процессам, изучаемым в работе.

Расчетные показатели и коэффициенты, принимаемые студентами самостоятельно снабжены интегрированной справочной информацией, позволяющей без консультаций и дополнительной литературы задать правильное значение. В программе использован справочный материал из основополагающих учебных пособий для ВУЗов, графическая часть которого переработана в векторную графику в соответствии с общим стилем интерфейса.

ПКЛР включает в себя тестирование по результатам каждой лабораторной работы. Тесты снабжены генератором случайных вопросов для исключения возможности плагиата.

ПКЛР обладает следующими преимуществами:

- отсутствие необходимости установки программы на каждый клиентский компьютер — программа устанавливается на один компьютер (сервер), после чего

любой пользователь компьютера ВУЗа может работать с ней через браузер;

- работа на компьютерах слабой мощности — вся обработка и вычисления происходят на сервере, данные отображаются в браузере пользователя;
- гибкость и универсальность архитектуры — имеются возможности настройки компонентов под конкретные условия, например, выполнение лабораторных студентами не в индивидуальном порядке, а в составе студенческих бригад;
- иерархическая модульная структура;
- масштабируемость — для балансировки нагрузки, в вычислительной сети может работать несколько запущенных экземпляров сервера;
- использование современных, открытых, зарекомендовавших себя технологий;
- возможность развития и наращивания функционала системы.

## III. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПКЛР

Как уже отмечалось, в данный момент ПКЛР разрабатывается для поддержки учебного процесса в рамках дисциплины «природоохранные технологии на ТЭС». При этом авторы предполагают использование разработанной архитектуры для реализации ПКЛР по другим дисциплинам. Основные преимущества разрабатываемого ПКЛР будут полезны для большого количества учебных дисциплин российских ВУЗов.

Существенным плюсом для возможностей тиражирования данного ПКЛР является то, что, благодаря архитектурным особенностям ПКЛР, ВУЗы, имеющие в своем распоряжении достаточные вычислительные мощности, смогут предоставлять доступ к работе с ПКЛР более мелким ВУЗам. Подобные способы тиражирования позволят повысить общий уровень качества обучения по выбранным дисциплинам.

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В текущей стадии разработки ПКЛР реализовано большинство требуемых функций. С сентября 2017 года запланирована апробация ПКЛР в учебном процессе кафедры ТЭС Московского Энергетического Института г. Москва. Апробация позволит протестировать работоспособность комплекса и выявить пользу от его использования в реальных учебных аудиториях ВУЗа — лидера в выбранной области образования. Подобное тестирование позволит внести необходимые правки в программную часть, повысить удобство использования, получить отзывы от конечных пользователей комплекса.

Внедрение ПКЛР в реальный учебный процесс является доказательством работоспособности и «гарантом качества» разрабатываемого продукта для других ВУЗов, заинтересованных в использовании современных программных средств в обучении своих студентов.



## Секция № 8

### ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

- Энергоэффективность и энергоснабжение при транспортировке энергетических ресурсов и выработке тепловой и электрической энергии
- Энергосберегающие технологии в инженерных системах промышленных предприятий, зданий и сооружений
- Энергоэффективное оборудование, устройства, изделия и материалы
- Системы учета и мониторинга для энергосбережения и потребления топливно-энергетических ресурсов



## Section № 8

### INDUSTRIAL POWER ENGINEERING. ENERGY EFFICIENCY

- Energy efficiency and power supply of energy resources transportation and heat and electrical power energy generation
- Energy saving technologies for engineering systems of industrial buildings
- Energy efficient equipment, devices, products and materials
- Accounting and monitoring systems for energy saving and consumption of fuel and energy resources

# Влияние осветительной нагрузки на качество электрической энергии

К.В. Духанина, В.М. Зырянов, В.С. Стрижов, Е.И. Эрекайкин  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия  
Новосибирск, Россия

Выполнен анализ основных особенностей влияния современных осветительных приборов на качество электроэнергии и коэффициент мощности в узлах потребления. Получены и проанализированы осциллограммы электромагнитных процессов в светильниках различного типа. Произведен гармонический анализ токов, потребляемых светильниками. Определены коэффициенты мощности и коэффициенты гармонических искажений по току и напряжению. Приведены рекомендации для снижения влияния гармоник от осветительной нагрузки на качество электроэнергии и нормализации коэффициента мощности.

*Ключевые слова:* качество электрической энергии; осветительное оборудование; коэффициент мощности; коэффициент искажения; гармонический анализ; фильтрокомпенсирующие устройства; распределительные электрические сети.

## The influence of lighting load on quality of electric energy

K.V. Dukhanina, V.M. Zyryanov, V.S. Strizhov, E.I. Erekaikin  
Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: erekaikin96@mail.ru

The analysis of the main features of modern lighting device's influence on quality of electric power and power factor in consumption nodes was carried out. The oscillograms of electromagnetic processes in luminaires of various types were obtained and analyzed. The harmonic analysis of the currents consumed by the luminaires was carried out. Power factors, and current and voltage total harmonic distortion were determined. Recommendations for reduction the influence of harmonics on power quality and normalizing power factor were developed.

*Keywords:* quality of electrical energy; lighting equipment; power factor; distortion factor; harmonic analysis; filter compensating devices; distribution electrical networks.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Освещение является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, и интенсивное технологическое развитие, безусловно, не могло не затронуть её. В стремлении повысить энергоэффективность осветительной нагрузки были созданы новые типы светильников, которые позволили добиться желаемого эффекта, и часть таких светильников представлена в данной работе.

Повсеместная замена традиционных осветительных приборов на энергосберегающие позволяет сэкономить средства потребителей, поскольку при одинаковой заявленной освещенности новые устройства освещения потребляют меньше электрической энергии. Однако, учитывая массовость этого эффекта, помимо заявленных достоинств начинают проявляться недостатки такой замены, которые оказывают существенное негативное влияние на качество электрической энергии.

Таким образом, возникает необходимость исследования проблем, связанных с использованием современных источников света (ИС), установления связи с происходящими в этих ИС электромагнитными процессами, а также предложения способов уменьшения негативного влияния таких приборов на энергосистему.

В работе рассмотрены люминесцентные (ЛЛ), компактные люминесцентные (энергосберегающие, ЛЭ) и светодиодные лампы (ЛС) в сравнении с традиционными лампами накаливания (ЛН). Основной конструктивной особенностью ЛЛ и ЛЭ является наличие газоразрядной колбы, в которой происходит свечение дуговых разрядов, а особенностью ЛС – светодиоды, испускающие излучение в видимом спектре. Кроме того, ключевым фактором создания компактных и энергоэффективных ламп является переход от электромагнитного пускорегулирующего аппарата (ЭМПРА), установленного в ЛЛ и основанного на дросселях и конденсаторах, к электронным (ЭПРА), построенным на базе полупроводниковых элементов и имеющим в своем составе частотные преобразователи и конденсаторы. Конструктивные особенности и принципы действия каждой лампы главным образом влияют на форму потребляемого из сети тока и, соответственно, на качество электроэнергии (КЭ). Для анализа и исследования воздействия ИС на энергосистему был сформирован стенд с возможностью снятия осциллограмм тока, протекающего через осветительные приборы, и напряжения, приложенного к ним. Наиболее актуальными для данной работы показателями КЭ в соответствии с существующим стандартом ГОСТ 32144-2013 выступают коэффициент гармонических искажений (КГИ, THD) кривой напряжения  $K_{U(n)}$ , и суммарный КГИ  $K_U$  [1]:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{ni}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

В формулах (1), (2)  $n$  – номер гармоники;  $U_{ni}$  – действующее значение напряжения  $n$ -ной гармоники в  $i$ -том наблюдении на суточном интервале времени (24 часа);  $U_1$  – действующее значение напряжения первой гармонической составляющей;  $U_n$  – действующее значение напряжения  $n$ -ной гармоники;  $U_1$  – действующее значение напряжения первой гармонической составляющей напряжения в контролируемой точке сети.

$K_{U(n)}$  нормирует составляющие напряжения до 40-ой гармоники так же, как и при расчёте  $K_U$ . КГИ по току  $K_I$  настоящим стандартом не нормируются, поэтому анализ КЭ по данному критерию производился, опираясь на американский стандарт IEEE STD 519-2014 [2].

## II. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ И ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

### А. Лампы накаливания

Единственный момент отличия формы тока от синусоидальной – это момент включения нити накала, когда она разогревается, и величина амплитуды тока плавно снижается (“Рис. 1”).

В результате разложения кривой тока, потребляемого ИС, и напряжения сети в ряд Фурье получены  $K_I = 3,3\%$ ,  $K_U = 3,3\%$ . Искажение формы напряжения вызвано работой энергосистемы в целом, и исследуемая нагрузка никак не могла повлиять на это в силу несоизмеримости номинальной мощности, поэтому целесообразно определять воздействие нагрузки коэффициентом гармонических искажений по току.

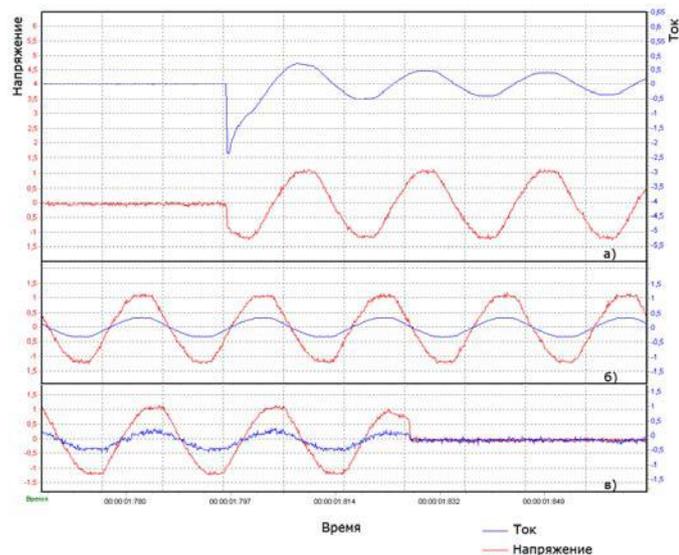


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения лампы накаливания: а) включение лампы, б) установившийся режим в) выключение лампы

Основные искажения в кривую тока вносят 3 и 5 гармоники, вклад которых составляет 1,1% и 2,7% соответственно. По рассчитанному коэффициенту мощности можно судить об активном характере ЛН ( $\cos\varphi = 1$ ).

### В. Люминесцентные осветительные приборы

Работа люминесцентных ламп основана на разрядных процессах в газах. В момент пуска стартер формирует импульс высокого напряжения, достаточного для пробоя газового промежутка. В это время процессы протекают с повышенной собственной частотой ЭМПРА, составляющей около 500 Гц (“Рис. 2”). За 1 мс происходит высокочастотный пробой промежутка между электродами, сопровождающийся броском тока. Становление стабильного разрядного канала в газе происходит за 3-4 секунды. Форма тока сохраняет вид синусоиды с заострёнными максимумами. Это можно объяснить насыщением сердечника дросселя.  $K_I = 12\%$ , что вызвано, в основном, 3 и 5 гармониками, вклад которых в общую кривую составляет соответственно 11,5% и 2,7% (“Рис. 3”). По выделенным первым гармоникам был установлен активно-индуктивный характер и коэффициент мощности, равный 0,4.

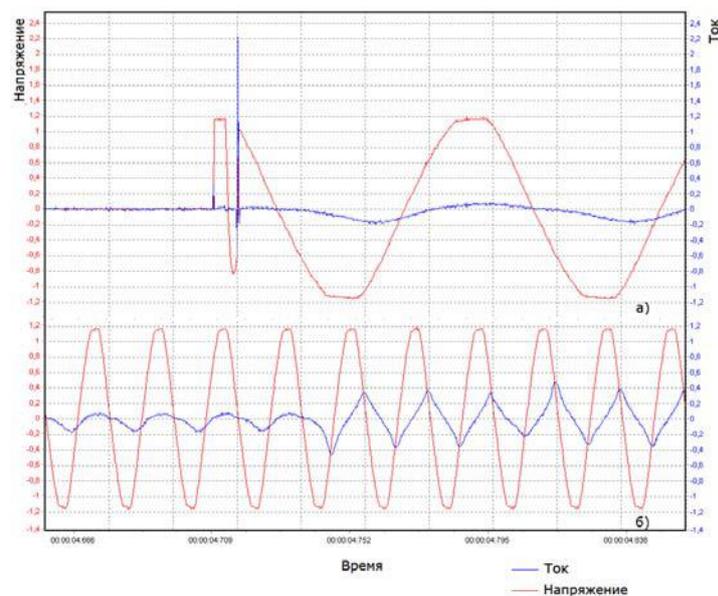


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения люминесцентного источника света: а) включение лампы, б) запуск лампы

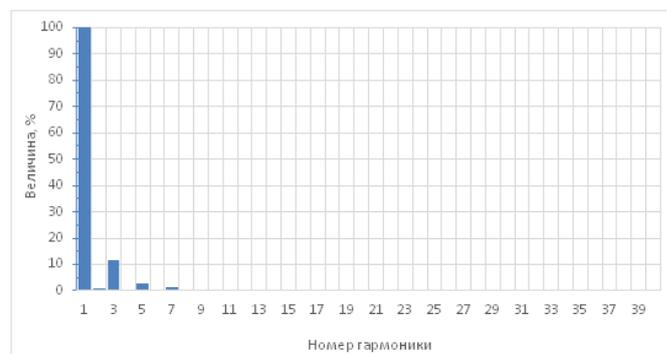


Рис. 3 Амплитудно-частотная характеристика тока люминесцентного источника света

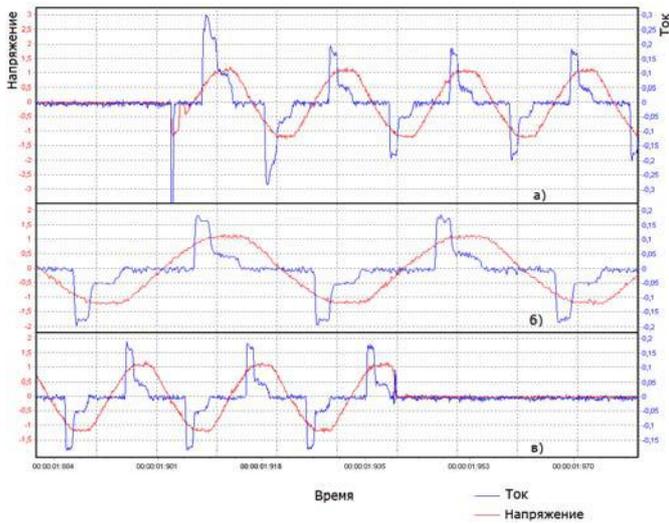


Рис. 4. Осциллограммы тока и напряжения компактного люминесцентного осветительного прибора:  
а) включение лампы, б) установившийся режим  
в) выключение лампы

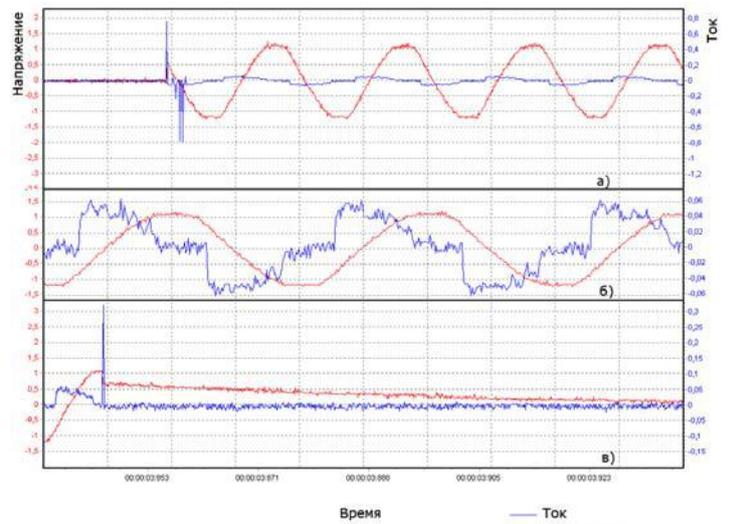


Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения светодиодного источника света: а) включение лампы, б) установившийся режим  
в) выключение лампы

### С. Компактные люминесцентные осветительные приборы

Поведение приборов при пуске так же связано с разрядными процессами. При этом пусковой ток достигает восьмикратного номинального значения. В течение нескольких периодов ток снижается до номинальной величины, имея при этом резко искажённую, периодическую, отдалённую от синусоиды форму (“Рис. 4”).

$K_d$  достигает величины 109%, наибольший вклад в искажение кривой тока вносят 3 (72,6%), 5 (47,1%), 7 (43,7%), 11 (19,8%), 19 (10%) гармоники. АЧХ по току представлена на “Рис. 5”. По выделенным первым гармоникам был получен достаточно высокий коэффициент мощности, равный 0,91, и определен активно-емкостной характер нагрузки, что обусловлено наличием конденсаторов в устройстве.

### Д. Светодиодные источники света

В момент включения ЛС в сеть наблюдаются скачки тока, вызванные коммутациями светодиодов. Ток во время номинального режима работы отдаленно напоминает синусоиду. Кривая тока резко изменяется от нуля до максимального значения в момент, когда мгновенное значение напряжения стремится к нулю, затем постепенно убывает до нулевого значения, когда напряжение достигает максимума (“Рис. 6”).

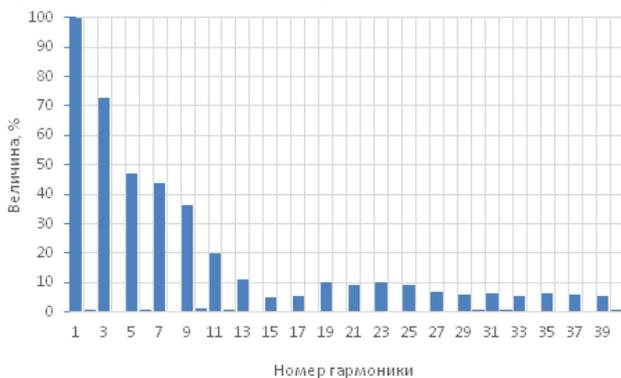


Рис. 5 Амплитудно-частотная характеристика тока компактного люминесцентного осветительного прибора

После выключения осветительного прибора напряжение по экспоненте убывает до нуля, что характеризует постепенное рассеивание накопленной конденсаторами энергии.  $K_d = 33.5\%$ , что также является значительной величиной. Величины третьей и пятой токовых гармоник составляют от первой 19,3% и 18,6% соответственно (“Рис. 7”). По выделенным первым гармоникам был получен низкий коэффициент мощности, равный 0,2, и определен активно-емкостной характер нагрузки, в силу подобия ПРА ЛС с ЛЭ.

### Е. Сравнительный анализ

Сравнение приведённых ИС отобразим в таблице I.

Таблица I. ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ ЛАМП

Вид ИС	P, Вт	Q, вар	S, ВА	I, mA	cosφ	КГИ <sub>1</sub> , %	η, лм/Вт
ЛН	90	0,7	90	405	1	3,3	10,5
ЛЭ	28,5	-13	31,3	138	0,91	109	65
ЛЛ	8,4	19,6	21,4	94	0,4	12	58
ЛС	2,7	-13,2	13,5	59	0,20	33,5	90

В таблице II приведены выдержки из [2], на основе которых можно заключить о недопустимом уровне генерируемых ЛС и ЛЭ гармоник.

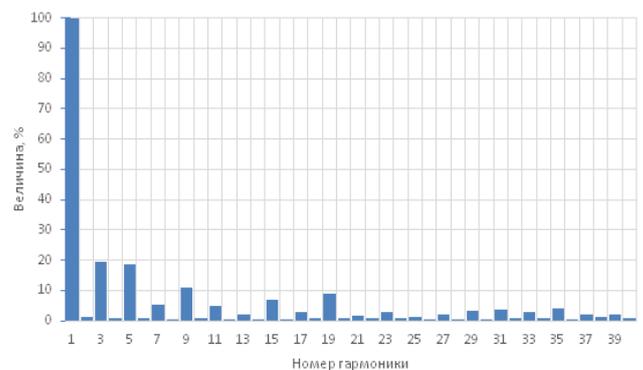


Рис. 7 Амплитудно-частотная характеристика тока светодиодного источника света

Таблица II. Коэффициенты  $n$  ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ И СУММАРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ РАЗЛИЧНОЙ НАГРУЗКИ

$I_s/I_L$	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n < 50$	TНD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

где  $I_{sc}/I_L$  – отношение тока источника и тока исследуемой нагрузки.

### III. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТРАНЕНИЮ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

С целью повышения качества электрической энергии применяются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ): пассивные и активные.

Пассивные ФКУ работают по принципу резонанса напряжений. Подобранные реактивные сопротивления из LC элементов имеют малые сопротивления для генерируемых нелинейной нагрузкой токов высших гармоник. Таким образом, «нежелательный» ток проникает в контур фильтров и не попадает в сеть.

Известно, что определённые промышленные потребители генерируют определённый порядок гармоник. Например, наиболее ожидаемые гармоники для частотного преобразователя [3]: 3, 5, 7. При наличии значительного числа LC в узле нагрузки, они потребляют значительные токи 3, 5, 9, 19 гармоник. Для эффективной борьбы с ними необходимо использовать ФКУ, настроенное на соответствующие резонансные частоты. Также ФКУ должно обладать мощностью, ориентировочно получаемой из АЧХ (рис. 7). Для успешного подавления 3-ей гармоники мощность фильтра должна составлять 0,2; 5-ой: 0,19; 9-ой: 0,12 относительно основной частоты. Для подавления таких высоких частот, как 19-ая, возможно применение широкополосных фильтров, имеющих характеристики фильтра Баттерворта второго порядка [4].

В настоящее время решение проблемы потребления неактивной мощности возложено на устройства компенсации неактивных составляющих (реактивная мощность, мощности искажений и несимметрии), например, активные силовые фильтры (АСФ). Системы фильтрации выделяют из тока нагрузки ток искажений, и его же в противофазе вырабатывают в сеть источники тока.

АСФ могут дополняться системами накопления энергии [5], что позволяет увеличить надёжность

электропитания, а также компенсировать некоторую часть активной нагрузки, выравнивая график работы генерации.

### IV. ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Выделены высокие показатели энергоэффективности светодиодных ламп.

Отмечено высокое содержание высших гармоник в форме тока современных источников света. При значительной доле осветительной нагрузки необходимо устанавливать фильтры гармоник.

Установлено, что из числа рассматриваемых ИС лампы ЛС и ЛЭ имеют активно-емкостной характер нагрузки, ЛЛ – активно-индуктивный. Характер нагрузки зависит от параметров ЭПРА.

При массовой замене ИС возможно не только увеличение генерации токов искажения, но и перекомпенсация реактивной мощности в узлах комплексной нагрузки со значительной долей асинхронных двигателей, где, как правило, присутствуют устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ). Эффект дополнительной генерации реактивной мощности будет накладываться на работу УКРМ. Такие эффекты следует учитывать на стадии проектирования новых объектов и при модернизации уже существующих за счёт применения пассивных или активных фильтрокомпенсирующих устройств.

Показана необходимость применения КГИ по току.

### Список литературы

- [1] ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- [2] IEEE STD 519-2014. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions.
- [3] Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты: Вестник ИГЭУ. – 2015. - №1. – с. 24-29.
- [4] Боярская Н.П., Довгун В.П., Шевченко Е.С., Егоров Д.Э. Широкополосные силовые фильтры гармоник: Ползуновский вестник. – 2013. - №4-2. – с. 34-38.
- [5] Дыбко М. А. Активный силовой фильтр с системой накопления энергии на базе инвертора с фиксирующими диодами / М. А. Дыбко, С. В. Брованов // Перспективные методы и средства интеллектуальных систем : материалы Всерос. науч.-практ. семинара и шк. молодых ученых, Новосибирск, 1–4 дек. 2015 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – С. 110–119.

# Исследование динамики подвешенного железоотделителя как объекта управления с массивным магнитопроводом

А.В. Радченко

ФБГОУ ВО Омский государственный технический университет

Омск, Россия

mechta7102@mail.ru

**Аннотация** — Использование подвесных электромагнитных железоотделителей для извлечения ферромагнитных включений из сыпучих немагнитных материалов при их транспортировке на ленточных конвейерах связано с решением актуальной задачи снижения затрат на электропотребление при одновременном повышении их эффективности функционирования. Для достижения этой цели разработчиками предусматривается совместная работа электромагнитного железоотделителя с металлодетектором. Обмотка электромагнитного железоотделителя при этом получает питание от источника постоянного напряжения, а ферромагнитные детали его конструкции изготавливаются цельнометаллическими. Такой подход обуславливает необходимость учета влияния вихревых токов в сплошных стальных деталях конструкции железоотделителя на развиваемые им пондеромоторные силы. При этом динамика работы электромагнитного железоотделителя в качестве объекта управления выступает на передний план. Длительный режим работы электромагнитного железоотделителя при постоянном токе должен быть заменен на повторно-кратковременный режим, связанный с протеканием тока в обмотке при переходном процессе. Принцип работы электромагнитного железоотделителя основан на создании мощного неоднородного магнитного поля в межполюсном зазоре и под полюсными наконечниками. Поэтому вызывает интерес изменение пондеромоторных сил при переходном процессе. Для этого в данной статье поставлена задача исследования нестационарного магнитного поля железоотделителя с использованием комплекса программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия) при переходном процессе, связанным с нарастанием тока в обмотке с нуля до установившегося значения с учетом заданных физических свойств объектов математической модели и граничных условий. Решение задачи нестационарного магнитного поля выполнено для опытного образца электромагнитного железоотделителя с наборными стальными полюсами и плоскими полюсными наконечниками. Результаты расчета сопоставлены с опытными данными, полученными на испытательном стенде.

**Ключевые слова** — подвесной электромагнитный железоотделитель, вихревые токи в стали, полюсные наконечники, межполюсный зазор, переходный процесс, геометрия магнитной системы, пондеромоторная сила.

## Dynamics research of suspended separator as control object with massive magnetic core

A. Radchenko

Omsk State Technical University

Omsk, Russia

mechta7102@mail.ru

**Abstract** — Using of suspended electromagnetic separators for extracting ferromagnetic objects from bulk non-magnetic materials during its transportation on belt conveyors is connected with the solution of the actual problem of reduction in power consumption costs while increasing their efficiency operation. The developers envisage the joint operation of an electromagnetic separator with a metal detector to achieve this goal. The winding of the electromagnetic separator in this case is powered by a constant voltage source, and the ferromagnetic parts of its construction are made with all-metal ones. As a result, it is necessary to take into account the effect of eddy currents in solid steel parts of the separator construction on the ponderomotive forces developed by it. At the same time, the dynamics of operation of the electromagnetic separator as a control object comes to the fore. The continuous duty of the DC electromagnet separator should be replaced by an intermittent duty associated with the transient current in the electromagnetic separator coil. The operation principle is based on the creation of a powerful non-uniform magnetic field in the pole gap and under the pole tips. Therefore, it is interesting the change of the ponderomotive forces during the transient process. For this purpose, the aim of this article is to investigate the non-stationary magnetic field of the separator using the ELCUT 6.0 program (professional version) in the transient process associated with the increasing of the current in the winding from zero to the steady value taking into account the given physical properties of the objects of the mathematical model. The solution of the problem of a non-stationary magnetic field is performed for a

prototype of the electromagnetic separator. The results of the calculation are compared with the experimental data obtained on the test stand.

**Keywords** — *suspended electromagnetic separator; eddy currents in steel; pole tips; pole gap; transient process; geometry of the magnetic system; ponderomotive force.*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Подвесные электромагнитные железоотделители (ЭЖ) постоянного тока выполняют функцию распознавания и извлечения ферромагнитных частиц из сыпучих немагнитных материалов и отличаются многообразием конструктивных решений [1,2,3]. По сравнению с железоотделителем на основе постоянных неодимовых магнитов, подвесной электромагнитный железоотделитель обладает лучшей извлекающей способностью, низкой закупочной стоимостью и удобством в эксплуатации. Как правило, ЭЖ, рассматриваемые как электромагниты постоянного тока, в которых из-за отсутствия вихревых токов в стали магнитопроводы изготавливаются сплошными нешихтованными с наборными полюсами, используются в длительном режиме работы. При этом происходит значительный расход электроэнергии, необходимый для создания мощного неоднородного магнитного поля в межполюсном зазоре и под полюсными наконечниками, под действием которого ферромагнитные предметы притягиваются к нижней поверхности железоотделителя и удерживаются на ней до окончания стадии очистки.

Установка ЭЖ в комплексе с металлодетектором значительно снижает электропотребление и позволяет рассматривать его как объект управления. При этом концепция рассмотрения длительного режима работы подвесного ЭЖ при постоянном токе в обмотке меняется на кратковременный режим с переходным током, возникающим при переходном процессе включения обмотки подвесного ЭЖ по сигналу металлодетектора на постоянное напряжение источника питания. Исследовать особенности данного кратковременного режима работы позволит решение задачи расчета нестационарного магнитного поля подвесного ЭЖ при переходном процессе с помощью программы Elcut 6.0.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для решения задачи расчета нестационарного магнитного поля в комплексе программ «ELCUT 6.0» (профессиональная версия) [4] используются параметры опытного образца подвесного ЭЖ, изготовленного с наборными полюсами и полюсными наконечниками, показанного на рис. 1., при этом составные части магнитопровода изготовлены цельнометаллическими в виде стальных плит, стянутых между собой болтовыми соединениями.

Геометрия магнитной системы опытного образца ЭЖ, применяемая для создания модели, представлена следующими параметрами: полное число витков обмотки  $w = 1100$ , активное сопротивление одной катушки, из которых состоит обмотка – 8,3 Ом. Магнитопровод

выполнен из листовой горячекатаной стали: ярмо сердечника размером 20140x376 мм, шесть наборных полюсов размерами 20x140x20 мм, два полюсных наконечника размерами 140x140x20 мм. Толщина катушки – 20 мм, высота катушки – 140 мм, межполюсный зазор – 36 мм, толщина стенок каркаса – 5 мм. Напряжение источника питания равно 36,3 В.



Рис.1. Внешний вид испытательного стенда: 1–опытный образец ЭЖ; 2–электронный ключ; 3 –USB осциллограф; 4 – датчик тока; 5– цифровой милливольтметр; 6 – датчик Холла; 7 – источник постоянного напряжения; 8 – персональный компьютер.

Постановка задачи расчета нестационарного магнитного поля в программе ELCUT 6.0 [5,6] показана на рис. 2.

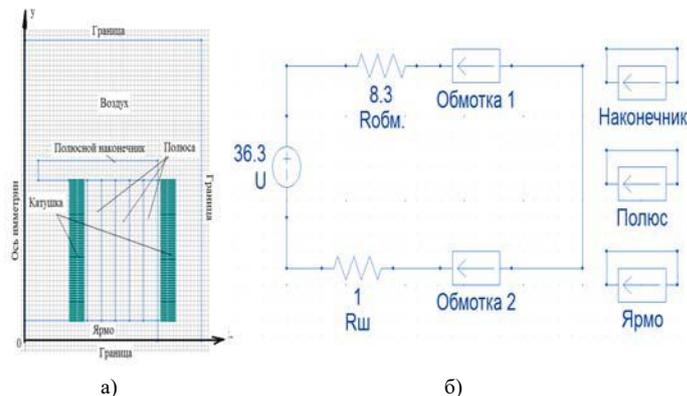


Рис.2. Постановка задачи расчета нестационарного магнитного поля модели подвесного ЭЖ: а – геометрия создания модели, б – присоединенная электрическая цепь.

В геометрии задачи катушка опытного образца ЭЖ моделируется 550 отдельными витками. При этом физические свойства выделенных объектов в модели принимаются следующими: относительная магнитная проницаемость воздуха  $\mu' = 1$ , относительная магнитная

проницаемость стали  $\mu'=2000$ , удельная электропроводность медного обмоточного провода  $5,7 \cdot 10^7$  1/Ом·м, удельная электропроводность стали  $0,8 \cdot 10^7$  1/Ом·м. Магнитная система ЭЖ симметрична, что позволяет выполнить моделирование нестационарного магнитного поля на половине расчетной области.

На рис. 2б. показана присоединенная электрическая цепь в ELCUT, содержащая пассивные элементы, источник постоянного напряжения и стальные массивы магнитопровода, в свою очередь представленные блоками «Ярмо», «Полус» и «Наконечник», замкнутые накоротко. Область моделирования перед решением задачи покрывается сеткой из конечных элементов, состоящей из 12724 узлов. При задании временных параметров интегрирования по времени до 400 мс с шагом 10 мс машинное время решения задачи нестационарного магнитного поля составило 284 с.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 3а. показана картина магнитного поля ЭЖ по истечении 100 мс с момента времени включения обмотки на постоянное напряжение источника питания. Из картины магнитного поля ЭЖ видно, что магнитный поток распределяется неравномерно по поперечному сечению наборного полюса. При этом наибольшая концентрация силовых линий магнитного поля сосредотачивается на поверхности наборного полюса, расположенного ближе к обмотке, причем магнитная индукция в поверхностных слоях полюса превышает значение магнитной индукции в установившемся режиме. В среднем наборном полюсе магнитный поток в активной фазе переходного процесса близок к нулю.

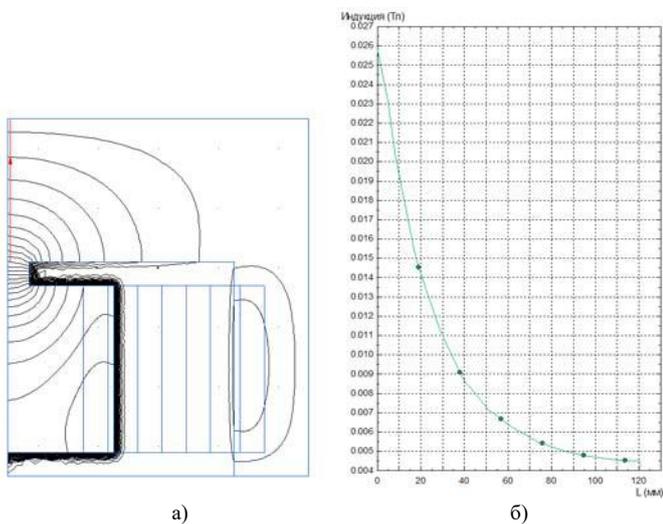


Рис.3. Нестационарное магнитное поле подвешеного ЭЖ в активной фазе переходного процесса: а – картина магнитного поля; б – магнитная индукция на середине межполюсного зазора в момент времени 100 мс.

На рис. 3б показано распределение магнитной индукции на середине межполюсного зазора при удалении искомой точки от поверхности полюсных наконечников. Сопоставление временных зависимостей тока в обмотке с учетом и без учета влияния вихревых токов в стали в расчете и опыте на испытательном стенде приведено на рис. 4. При этом расхождение экспериментальной и расчетной кривых тока в обмотке с учетом влияния

вихревых токов в стали оказывается незначительным. Расчетная кривая тока в обмотке ЭЖ без учета вихревых токов в стали значительно отличается от экспериментальной кривой. Экспериментальное исследование опытного образца ЭЖ заключалось в снятии осциллограммы сигналов с датчика тока 4 и магнитной индукции, измеренной цифровым миллитесламетром 5 с помощью датчика Холла 6 (рис.1).

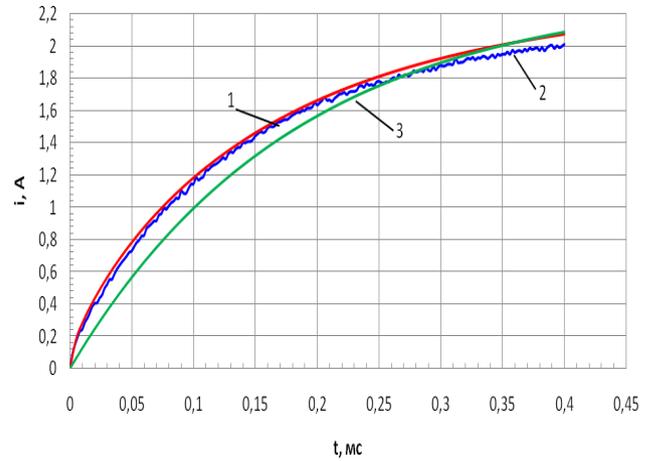


Рис.4. Временные зависимости тока в обмотке подвешеного ЭЖ при переходном процессе: 1 – расчетная кривая тока, полученная с учетом влияния вихревых токов в стали; 3 - расчетная кривая тока, полученная без учета влияния вихревых токов в стали; 2 – экспериментальная кривая тока.

Цветная картина нестационарного магнитного поля подвешеного ЭЖ (рис. 5а) и распределение магнитной индукции на середине межполюсного зазора по мере удаления расчетной точки от поверхности полюсных наконечников к моменту времени достижения токком установившегося значения (рис. 5б) показывает, что переходный процесс в магнитной цепи ЭЖ далек от завершающей фазы.

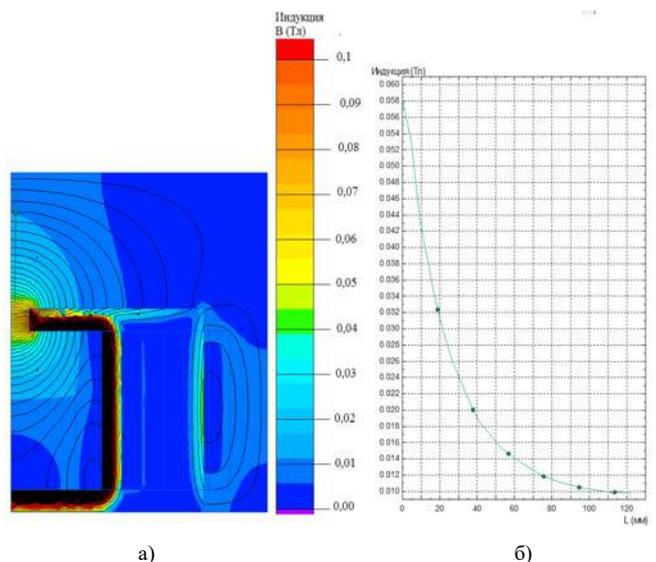


Рис.5. Нестационарное магнитное поле подвешеного ЭЖ по окончании переходного процесса в электрической цепи обмотки (момент времени 400 мс): а – цветная картина магнитного поля; б – магнитная индукция на середине межполюсного зазора

Воздействие вихревых токов в стали существенно ослабляет магнитный поток в сердечнике, делая неэффективным использование стали магнитопровода при существенном снижении значения магнитной силы.

Анализ значений магнитной индукции в межполюсном зазоре, полученных экспериментальным и расчетным путем позволяет определить максимальную магнитную силу  $F_m$ . Величина  $F_m$  не зависит от свойств извлекаемых частиц, создается электромагнитом и служит критерием качества конструкции электромагнита [1,7,8]. Расчет магнитной силы производится по формуле

$$F_m = H \text{grad}H = \frac{F_{m.n.}}{\mu_0 \chi_0 V} \quad (1)$$

где  $H$  – модуль напряженности магнитного поля;  $V$  – объем частицы;  $\chi_0$  – магнитная восприимчивость частицы;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $F_{m.n.}$  – магнитная пондеромоторная сила.

В случае малых размеров намагниченной частицы в объеме  $V$  модуль напряженности магнитного поля  $H$  можно считать одинаковым и выражение для определения магнитной пондеромоторной силы, зависящей от формы, размеров и природы извлекаемого тела [9,10,11] принимает вид

$$F_{m.n.} = -\mu_0 \chi_0 V H \text{grad}H \quad (2)$$

Расчет нестационарного магнитного поля подвешенного ЭЖ в комплексе программ «ELCUT» с учетом и без учета влияния вихревых токов в стали магнитопровода показывает, что в активной фазе переходного процесса наблюдается заметное расхождение постоянных времени нарастания магнитного потока в массивном сердечнике и тока в обмотке, что сказывается на снижении максимальной пондеромоторной силы на 20-25%.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сокращения затрат электроэнергии для подвешенных ЭЖ возможно при использовании их в качестве объектов управления при получении сигнала от металлодетектора на включение. При этом длительный режим работы ЭЖ на постоянном токе следует заменить на кратковременный режим работы, обусловленный переходным процессом.

2. Анализ результатов математического моделирования опытного образца подвешенного ЭЖ с массивным магнитопроводом в программе «ELCUT 6.0» (профессиональная версия) показал существенное снижение максимальных значений пондеромоторных

(магнитных) сил в активной фазе переходного процесса до 20-25% по сравнению с шихтованным магнитопроводом.

3. Сопоставление расчетной и опытной кривой тока в обмотке ЭЖ при переходном процессе дает хорошее совпадение результатов исследования и подтверждает адекватность построенной математической модели с учетом вихревых токов.

4. Экспериментальные исследования и математическое моделирование подтверждают возможность использования шихтованного магнитопровода в конструкции подвешенного ЭЖ в кратковременном режиме.

#### Список литературы

- [1] Сумцов В.Ф. Электромагнитные железоотделители. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
- [2] Буль Б.К., Карташян В.О., Нестеренко А.П. Проектирование оптимальных электромагнитных систем подвешенных железоотделителей // Электротехника. – 1981. – № 4. – С. 54–57.
- [3] Загирняк М.В., Усатюк В.М., Оксанович А.П., Ляшенко В.П., Луценко И.А., Загоруйко В.В. Проектирование электромагнитных систем шкивных сепараторов. Часть 2. Вывод уравнения теплового баланса. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 3/2015 (92). – С. 9–14.
- [4] Программа «ELCUT». Руководство пользователя. - ООО «Тор», Санкт-Петербург.– 2012. – 356 с. URL: [http://www.elcut.ru/free\\_doc\\_r.htm](http://www.elcut.ru/free_doc_r.htm).
- [5] Татевосян А. С. [и др.]. Экспериментальное исследование и расчет магнитного поля электромагнита постоянного тока с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в комплексе программ ELCUT // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 2. С. 133–140.
- [6] Татевосян А.С., Радченко А.В. Исследование нестационарного магнитного поля электромагнита с расщепленными полюсами и полюсными наконечниками в пакете ELCUT// Омский научный вестник. – 2016. - №6. – С. 86-90.
- [7] Ишков А.С., Литвинов Л.Н. Измерительно-вычислительный комплекс для исследования магнитных характеристик электротехнической стали // Датчики и системы. – 2006. - №4. – С. 14-17.
- [8] Бахвалов Ю.А., Горбатенко Н.И., Гречихин В.В. Метод решения обратных задач магнитных измерений // Измерительная техника. – 2015. - №3. – С. 58-60.
- [9] Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. - М.: Энергия, 1968. - 488 с.
- [10] Загирняк М.Ф., Бранспиз Ю.А. Приближенная формула на напряженности магнитного поля над серединой зазора двухполюсного магнитного железоотделителя // Изв. вузов. Электромеханика. – 1992. – № 3. – С. 62–65.
- [11] Карташян В.О., Загирняк М.В., Нестеренко А.П. Уточненные схемы замещения для расчета открытых П-образных и Ш-образных магнитных систем магнитносепарирующих устройств // Изв. вузов. Горный журнал. – 1978. - №2. - С. 137-145.

# ВЫЯВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА СРЕДНИХ НАГРУЗОК ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

П.М. Ревенко, М.В. Жуков, А.И. Гринь

ФГАОУ ВО "Северо-Кавказский федеральный университет", Ставрополь, Россия

E-mail: p.revenko@list.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Наблюдаемый в последние годы рост абсолютных и относительных потерь электроэнергии отчасти связан с недостоверностью полученной информации о нагрузках. Данные контрольных замеров характеризуются неполнотой и низкой достоверностью. Получение такой информации связано с большими трудозатратами, и поэтому задача определения погрешности метода расчета потерь электроэнергии является актуальной.

**Материалы и методы:** При проведении исследования погрешности метода средних нагрузок, применяемого для расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях, использовались методы математического анализа. При выполнении экспериментальной части методом исследования являлось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялся программно-вычислительный комплекс RersPC. Для обработки полученных результатов использовалось программное обеспечение MS Excel.

**Результаты:** Определены погрешности расчета потерь мощности при использовании метода средних нагрузок в распределительных сетях с учетом неточности предоставляемой режимной информации и разброса паспортных характеристик их изменения в процессе эксплуатации. Проведено исследование влияния изменения сопротивлений линий и трансформаторов на конечную погрешность.

**Выводы:** Исходя из полученных значений погрешности можно сделать вывод о том, что метод средних нагрузок необходимо модифицировать. Это позволит более точно определять потери электроэнергии в распределительных сетях.

**Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть; метод расчета потерь электроэнергии; погрешность; математическое ожидание; среднее квадратическое отклонение.

## Detection of error of the method of average loads at determining of power losses in distributive electric networks

P.M. Revenko, M.V. Zhukov, A.I. Grin

North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

E-mail: p.revenko@list.ru

## Abstract

**Background:** The increase in absolute and relative power losses observed in recent years is partly due to the inaccuracy of the information received about the loads. The data of the control measurements are characterized by incompleteness and low reliability. Obtaining such information is associated with high labor costs, and therefore the task of determining the error of the method for calculating energy losses is relevant.

**Materials and Methods:** In the study of the error of the method of average loads used to calculate the energy losses in distribution networks, methods of mathematical analysis were used. At performing the experimental part the method of investigation was mathematical modeling. As a modeling tool, the RersPC software and computing complex was used. To process the results obtained, MS Excel software was used.

**Results:** Errors in calculation of power losses were determined using the method of average loads in distribution networks, taking into account the inaccuracy of the provided regime information and the spread of the passport characteristics of their changes during operation. The influence of changes in the resistance of lines and transformers on the final error is investigated.

**Conclusions:** Based on the obtained error values, it can be concluded that the method of medium loads needs to be modified. This will make it possible to more accurately determine the energy losses in distribution networks.

**Key-words:** distribution electric network; method of calculating power losses; error; expected value; standard deviation.

Наблюдаемый в последние годы рост абсолютных и относительных потерь электроэнергии (ЭЭ) связан с изменением хозяйственного механизма в связи с внедрением рыночных отношений, кризисом в экономике, с незавершенностью реформы электроэнергетики, и недостатками нормирования технологических потерь ЭЭ привел к существенному снижению финансовой стабильности сетевых компаний. В первую очередь это связано с тем, что стоимость потерь ЭЭ в сетевом тарифе оценивается в 6-8% и неизбежно приводит к росту

стоимости ЭЭ и возникновению задолженностей сбытовых компаний на оптовом и розничных рынках ЭЭ.

На долю распределительных сетей (РС) напряжением 6-10 кВ приходится более половины суммарных затрат на распределение ЭЭ по электрическим сетям. Предельные относительные технологические потери ЭЭ в РС составляют порядка 8-10 %, в то время как оптимальным считается уровень в 4-5% по отношению к отпуску ЭЭ в сеть.

Так как в сетевой составляющей тарифа

стоимость потерь ЭЭ оценивается в 6-10%, целью работы является исследование влияния погрешности задания исходной информации на величину потерь ЭЭ.

Объектом исследования выбраны РС напряжением 6-10 кВ филиала МРСК СК «Ставропольэнерго» Ставропольские электрические сети.

Определяющими при расчете потерь ЭЭ являются данные о параметрах схемы сети и информация о нагрузках распределительных трансформаторов (РТ).

Реальной информацией о нагрузках РТ служат данные контрольных замеров характеризующиеся неполнотой и низкой достоверностью, получение такой информации связано с большими трудозатратами.

Исходные данные для расчета потерь мощности в РС можно представить в виде вектора D:

$$D = \begin{pmatrix} Z \\ S \\ J \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где Z - вектор параметров элементов схемы замещения;

S- вектор параметров напряжений в центре питания  $U_{гy}$ , токов на головных участках (ГУ) сети  $I_{гy}$  и косинусов угла нагрузки ГУ  $\cos \varphi$  ;

T- вектор нагрузок РТ.

Параметры режима ГУ  $U_{гy}$ ,  $I_{гy}$ ,  $\cos \varphi$  . являются наиболее достоверной информацией. Погрешности определения этих параметров зависят от точности используемых измерительных приборов и наличия методических погрешностей.

Загрузка РТ характеризуется коэффициентом загрузки  $K_z$ , который определяется эксплуатационным персоналом на основании эмпирических соображений, причем, иногда со значительной погрешностью. Отсутствие достоверной информации о величине реактивной мощности на РТ приводит к росту суммарной погрешности.

Активное сопротивление линий определяется по формуле:

$$R_l = r_0 l. \quad (2)$$

Игнорирование учета действительной температуры провода может приводить к погрешности до 28%. Кроме того, на погрешность задания  $R_l$  оказывает влияние ошибка в определении длины линии  $l$  , оцениваемая в 0,1%. Поверхностный эффект для сталеалюминевых проводов при сечениях до 500 мм<sup>2</sup> и переходные сопротивления контактов можно не учитывать.

Ошибки в определении индуктивного сопротивления линии обусловлены в основном неточностью задания геометрических размеров, а также неучетом влияния удельной проводимости земли.

Величина ошибки, из-за неучета удельной проводимости земли оценивается в диапазоне -3,5÷2,6%.

Учет одновременного подвеса на одной опоре двухцепной линии приводит к повышению индуктивного сопротивления на 4÷8%.

Погрешности в определении параметров РТ определяются разбросом паспортных характеристик их изменениям в процессе эксплуатации, например, при работе ПБВ или после капитального ремонта.

Изменение  $R_T$  в зависимости от температуры обмоток может достигать  $\pm 10-12\%$ . Величина возможной ошибки при работе ПБВ оценивается  $R_T = \pm 16\%$ ,  $X_T = \pm 13\%$ .

Параметры РТ, определенные по каталожным данным, содержат случайные ошибки до  $\pm 10-17\%$ . Параметры силовых трансформаторов имеют разброс относительно своих средних паспортных значений от 10 до 30%.

Анализ возможных ошибок в задании параметров режима РС показал, что коэффициент загрузки изменяется пределах от 0,2 до 1,4, а  $\cos \varphi$  от 0,6 до 0,95.

На основе анализа литературных источников были получены следующие интервалы погрешностей изменения режимных и схемных параметров:

- по току головных участков фидеров  $I_{гy} = \pm 5\%$ ;
- по напряжениям на шинах центров питания  $U_{гy} = \pm 10\%$ ;
- по значению коэффициента мощности  $\cos \varphi = \pm 10\%$ ;
- по активным сопротивлениям линий  $R_l = \pm 16\%$ ;
- по активным сопротивлениям линий  $X_l = \pm 4\%$ ;
- по активным сопротивлениям трансформаторов  $R_T = \pm 12\%$ ;
- по реактивным сопротивлениям трансформаторов  $X_T = \pm 10\%$ .

Рекомендуемым методом расчета нагрузочных потерь ЭЭ является метод средних нагрузок [1]. При использовании данного метода определяющими параметрами являются потери мощности в сети при задании за расчетный период математических ожиданий нагрузок узлов и значения коэффициентов формы графиков нагрузок.

Для определения погрешности расчета потерь мощности выполнена серия расчетов установившихся режимов для каждого фидера при варьировании параметров режима в указанных диапазонах. Это позволяет определить значение математического ожидания (МО) и среднеквадратического отклонения (СКО) погрешности при расчете потерь мощности.

Так как отсутствует достоверная информация о видах закона распределения, то для определения двусторонней доверительной вероятности, в соответствии с требованиями ГОСТ 11.001-73, используется  $P_d = 0,9$ .

поскольку только она для широкого класса наиболее употребительных законов распределения вероятностей имеет однозначное соотношение со СКО в виде  $\Delta_{0,9} = 1,6 \sigma$  вне зависимости от вида закона распределения [2].

В качестве условно-эталонной модели принят расчет установившегося режима по программе RERS PC при задании в узлах средних нагрузок.

Генерация исходных данных в указанных диапазонах проводилась с помощью программы RAND. Форма представления результатов расчета по каждому фидеру представлена на рисунке 1.

```

Обработано 100 расчетов потерь
Эталонное значение потерь в фидере =
12.442 кВт
Математическое ожидание = 0.322
СКО = 1.449
-----T-----
| Расчетные | Отклонение |
| потери   | от эталона |
+-----+-----+
14.412      1.970
12.835      0.393
13.370      0.928
13.516      1.074
11.162     -1.280
...
12.407     -0.035
12.834      0.392
13.948      1.506
14.522      2.080
13.726      1.284

```

Рисунок 1 – Результаты расчета программы RAND

Результаты расчетов МО и СКО представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Выборка с результатами расчета МО и СКО потерь мощности

Фидер	Эталонное значение потерь в кВт	МО, кВт	СКО, кВт
1	2	3	4
ПС Восточная Ф 603	9,42	0,11	0,9
Ф 613	42,86	0,35	3,05
Ф 615	23,31	0,27	1,49
Ф 619	32,23	0,08	2,05
Ф 620	104,09	1,49	6,66
Ф 619 Северная	109,90	0,37	6,95
Ф 620	39,78	0,16	2,87
Ф 626	9,20	0,08	0,96
Ф 663	29,65	0,09	1,95
ПС Западная Ф 664	126,26	0,28	10,12
Ф 670	172,99	-1,18	14,02
ПС Северная Ф 102	11,63	0,22	1,27
Ф 111	1,81	-0,001	0,17
Ф 112	54,45	-0,12	3,88
Ф 113	33,39	-0,15	2,07

Аналогичные расчеты были выполнены для 250 фидеров исследуемой сети.

Средневзвешенное значение СКО погрешности, обусловленной неточным заданием исходных данных равно 8,47 кВт при МО равном 48,1 кВт, следовательно, погрешность определения потерь мощности равна:

$$\Delta_{R_{экс}} = \frac{(8,46 * 1,6) * 100}{48,1} = 28,1\%..$$

Для оценки погрешности метода расчета потерь ЭЭ использованы D-оптимальные планы эксперимента 4<sup>4</sup> [3]. Базовые значения факторов и значения уровней представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Базовые значения факторов и значения уровней

W <sub>a</sub> , МВтч	W <sub>p</sub> , МВарч	R <sub>э</sub> , Ом	K <sub>ф</sub>
1	2	3	4
640053,4	476014,4	0,0303	1,150
647222	490294,8	0,038814	1
637663,9	471254,3	0,027462	1,2
632884,8	461734	0,021786	1,3

Величина погрешности замеров отпуска реактивной ЭЭ принята равной 3 %. Для получения погрешности метода расчета потерь ЭЭ использована матрица планирования, представленная в таблице 3.

Таблица 3 – Матрица планирования экспериментов в именованных единицах

№ п/п	W <sub>a</sub> , МВт ч	W <sub>p</sub> , Мвар ч	R <sub>э</sub> , Ом	K <sub>ф</sub>	ΔW, МВт ч	δΔW? МВт ч
1	2	3	4	5	6	7
1	647222	490294,8	0,038814	1	30990,99	-165,995
2	632884,8	480774,5	0,027462	1	21008,89	9816,111
3	642442,9	461734	0,021786	1	16514,61	14310,39
4	637663,9	471254,3	0,033138	1	25231,23	5593,766
5	637663,9	461734	0,027462	1,2	29684,14	1140,863
6	642442,9	471254,3	0,038814	1,2	42970,53	-12145,5
7	632884,8	490294,8	0,033138	1,2	37040,13	-6215,13
8	647222	480774,5	0,021786	1,2	24697,03	6127,969
9	632884,8	471254,3	0,021786	1,3	27762,22	3062,776
10	647222	461734	0,033138	1,3	42871,31	-12046,3
11	637663,9	480774,5	0,038814	1,3	50664,72	-19839,7
12	647222	480774,5	0,027462	1,3	36536,59	-5711,59
13	642442,9	480774,5	0,033138	1,1	31267,01	-442,005
14	637663,9	490294,8	0,021786	1,1	20655,44	10169,56
15	647222	471254,3	0,027462	1,1	25794,59	5030,408
16	632884,8	461734	0,038814	1,1	34908,64	-4083,64
					МО	-337,38
					СКО	9244,68

На основе выполненных расчетов можно сделать вывод, что величина случайной погрешности расчета потерь ЭЭ составляет:

$$\Delta_{R_{\text{мет}}} = \frac{(0,6745 * 9245) * 100}{30825} = 20,2 \%$$

Применительно к расчету допустимых небалансов это эквивалентно фиксации отпуску ЭЭ 30825 МВт с счетчиком с классом точности 20.

Точность нормирования технических потерь ЭЭ при использовании метода средних нагрузок крайне низка из-за погрешности схемной и режимной информации.

Однако при значительном оснащении сети измерительными системами, такими как АИИС КУЭ, АСДУ и векторными регистраторами точность получаемой информации значительно повысится.

Так рассмотренный в [4] метод позволит определить информацию о реальных сопротивлениях линий, что поможет ей считаться более достоверной и полной. Следовательно, метод расчета технических ПЭ в сетях 6-10 кВ должен использовать ее в качестве основной, а дополнительные сведения, получаемые от средств АИИС КУЭ, АСДУ и РМУ, установленных в сетях 6-10 кВ, следует применять для уточнения результатов расчета.

Основная расчетная формула метода средних нагрузок для распределительных сетей 6-10 кВ имеет вид:

$$\Delta W_n = \frac{(W_{Ga}^2 + W_{Gp}^2) k_{\phi}^2}{U_{\text{эк}}^2 T} R_{\text{эк}}, \quad (3)$$

где  $W_{Ga}$  и  $W_{Gp}$  – активная и реактивная энергии, пропущенные через ГУ распределительной линии (фидера) за время  $T$ ;

$U_{\text{эк}}$  – эквивалентное напряжение, определяемое по формуле

$$U_{\text{эк}} = \sqrt{0,9U_1^2 + 0,1U_2^2}. \quad (4)$$

$U_1$  и  $U_2$  – напряжения на шинах ЦП в режимах максимальных и минимальных нагрузок соответственно;

$k_{\phi}$  – коэффициент формы графика мощности ГУ;

$R_{\text{эк}}$  – эквивалентное активное сопротивление фидера, равное

$$R_{\text{эк}} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i^2 R_i}{h_{\Gamma}^2} \quad (5)$$

Под  $h_i$  и  $h_{\Gamma}$  в [4] понимаются величины, пропорциональные (фактически или по предположению) нагрузке  $i$ -го элемента фидера с сопротивлением  $R_i$  и головного участка соответственно. Рекомендуется в качестве таких величин использовать токи участков, установленные мощности трансформаторов, получающих

питание по  $i$ -му участку и т.п. При этом сумма  $h_i$  для узлов нагрузки (УН) должна быть равна  $h_{\Gamma}$ .

Здесь следует отметить, что поскольку эквивалентное сопротивление  $R_{\text{эк}}$  определяется с целью расчета потерь энергии, то очевидно и определение его как некоего эквивалента должно опираться на потоки энергии по участкам распределительной линии, а не на токи участков.

В выражении (3) все переменные, кроме эквивалентного сопротивления  $R_{\text{эк}}$  определяются по информации, полученной из ЦП и ГУ. Следовательно, именно эквивалентное сопротивление следует уточнить с помощью дополнительных сведений, получаемых от средств АИИС КУЭ, АСДУ и РМУ, установленных в сетях 6-10 кВ. При этом эквивалентирование сети правильной производить по потокам энергии в ветвях схемы замещения с учетом потерь энергии в них. Поскольку сами потери энергии и их распределение по ветвям до конца расчета неизвестно, то, очевидно, что процедура расчета будет иметь итерационный характер постепенного уточнения этого распределения и величины ПЭ в целом.

Таким образом, сведения полученные с устройств векторной регистрации, в частности токи и напряжения, являются еще более точными, чем с выше перечисленных измерительных систем. Также высокая точность синхронизации измерений обеспечивается за счет наличия в измерениях меток абсолютного времени и возможности передачи информации в единый вычислительный центр с минимальной задержкой (100 мс). В связи с этим открывается возможность разработки более точного метода расчета потерь электроэнергии в распределительных сетях.

#### Список используемой литературы

- [1] Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь ЭЭ при ее передаче по электрическим сетям. Утверждено приказом Минэнерго России от 30 декабря 2008 года N 326 [Текст] / 119 с.
- [2] Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л. Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
- [3] Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей (справочное издание). Бродский В.З. и др. М.: Металлургия, 1982. – 752 с.
- [4] Актуальные проблемы электроэнергетики, электроники и нанотехнологий – Ревенко П.М., Костюкова С.С., Сафонов Р.В. стр. 77

# Исследование эффективности системы активной виброзащиты энергетического оборудования на основе линейных двигателей

Д.Г. Рандин<sup>1</sup>, С.С. Володин<sup>2</sup>, И.И. Ашимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Самара, Россия  
em@samgtu.ru

<sup>2</sup>ООО «Тольяттинский трансформатор»  
Тольятти, Россия

*В статье рассматривается система виброзащиты энергетического оборудования на основе электромеханических исполнительных устройств. В качестве исполнительных устройств используются линейные двигатели постоянного тока. Для принятой одномассовой расчетной схемы, включающей в себя неуправляемый (постоянный) и управляемый элемент жесткости, а также постоянное гидравлическое сопротивление составлены уравнения динамики в виде системы дифференциальных уравнений. По составленным выражениям получены передаточные функции для системы виброзащиты с управляемым элементом жесткости по каналу управления и возмущения. С учетом полученных математических моделей разработана структура системы виброзащиты замкнутой по виброускорению защищаемого объекта. В специальных инженерных программах проведено исследование эффективности разработанной системы. Даны рекомендации по использованию разработанных моделей.*

**Ключевые слов** — активная виброзащита; линейный двигатель; динамические характеристики; структурная схема.

## Research of the efficiency of the active vibration protection system of transformers based on linear motors

D.G.Randin, S.S.Volodin, I.I.Ashimov

<sup>1</sup>Samara State Technical University  
Samara, Russia

<sup>2</sup>«Togliatti transformer» LTD  
Тольятти, Россия

*In article the system of vibroprotection of the power equipment on the basis of electromechanical actuation mechanisms is considered. As actuation mechanisms linear engines of a direct current are used. For the accepted one-mass settlement scheme including the uncontrollable (constant) and operated rigidity element, and also constant hydraulic resistance dynamics equations in the form of system of the differential equations are worked out. On the made expressions transfer functions for system of vibroprotection with the operated rigidity element on a control path and indignations are received. In special engineering programs the research of efficiency of the developed system is conducted. Recommendations about use of the developed models are made.*

**Keywords** — active vibration isolation system, linear motor, dynamic characteristics, schematic diagram.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокого качества виброзащиты энергетического оборудования трудно достичь за счёт использования пассивных средств виброзащиты (резиновые виброизоляторы), эффективных в ограниченном частотном диапазоне кинематического возмущения. Существенно повысить качество виброзащиты можно за счет использования электромеханических исполнительных элементов, среди которых одним из перспективных считаются линейные электрические машины. Применение электромеханических исполнительных устройств позволяет повысить быстродействие системы и снизить весогабаритные показатели системы [1,2].

### II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В качестве исполнительного элемента системы виброзащиты статье рассматривается линейный двигатель

постоянного тока (ЛДПТ). В качестве расчетной принята схема с одномассовой колебательной системой (рис. 1). Расчетная схема представлена на рис. 1, содержит виброзащищаемый объект с массой  $m$ , защищенный от возмущения  $Z_0$  со стороны основания упругим элементом с неизменной  $C_0$  и управляемой жесткостью  $C_u$ , элементом гидравлического сопротивления с коэффициентом  $\beta_0$ . [3,4]

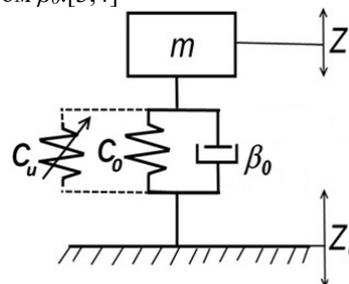


Рис. 1 - Расчетная схема одномассовой колебательной системы

Для расчетной схемы на рис.1 составлены дифференциальные уравнения динамики колебательной системы

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} + \beta_0 \frac{d(Z - Z_0)}{dt} + (C_0 + C_u)(Z - Z_0) = 0. \quad (1)$$

В операторной форме уравнение можно записать в следующем виде:

$$mp^2 Z(p) + \beta_0 p(Z(p) - Z_0(p)) + (C_0 + C_u)(Z(p) - Z_0(p)) = 0. \quad (2)$$

Перенеся в выражении (2) слагаемые относящиеся ко выходной переменной  $Z$  в левую часть, а ко входной  $Z_0$  в правую часть, после преобразований получим передаточную функцию (ПФ) системы виброзащиты по возмущению

$$W_B(p) = \frac{\varepsilon(p)}{\varepsilon_0(p)} = \frac{\beta_0 + C_0 / C_u}{m^2 p^2 + \beta_0 p + C_0 / C_u}. \quad (2)$$

Передаточной функции (2) соответствует структурная схема представленная на рис.2.

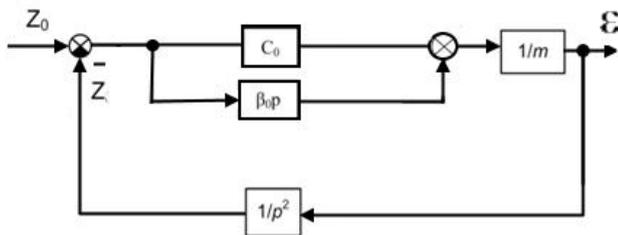


Рис. 2. Структурная схема соответствующая ПФ (2)

Для построения математической модели активной системы виброзащиты с ЛДПТ дополним систему уравнений одномассовой пассивной системы уравнениями движения ЛДПТ:

$$U_{я} = E + I_{я} R_{я} + L_{я} \frac{dI_{я}}{dt}$$

где  $U_{я}$  – напряжение, приложенное к якору, В;  $I_{я}$  – ток якоря, А;  $E$  – наведенная в якоре ЭДС, В;  $L_{я}$  – индуктивность цепи якоря, Гн;  $R_{я}$  – сопротивление якорной цепи двигателя, Ом;

Электромагнитную силу, создаваемую двигателем, можно вычислить по формуле:

$$F_{эм} = k\Phi I_{я}$$

где  $k\Phi$  – коэффициент двигателя, Н/м,  $v$  – скорость перемещения якоря, м/с

$$m \frac{dv}{dt} = F_{эм} = m \frac{d^2 \Delta Z}{dt^2} = m\varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – ускорение якоря двигателя м/с<sup>2</sup>.

Запишем в операторной форме вышеприведенные уравнения:

$$U_{я}(p) = E(p) + \frac{1}{R_{я}}(1 + T_{э}p)I_{я}(p),$$

где  $T_{э} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$  – электромеханическая постоянная.

$$E(p) = k\Phi v(p); F_{эм}(p) = k\Phi I_{я}(p)$$

$$m p v(p) = F_{эм}(p) = m p^2 \Delta Z(p) = m\varepsilon(p)$$

Дополнив структуру одномассовой системы виброзащиты (рис.2), динамической моделью ЛДПТ, получим структурную схему, приведенную на рис. 3.

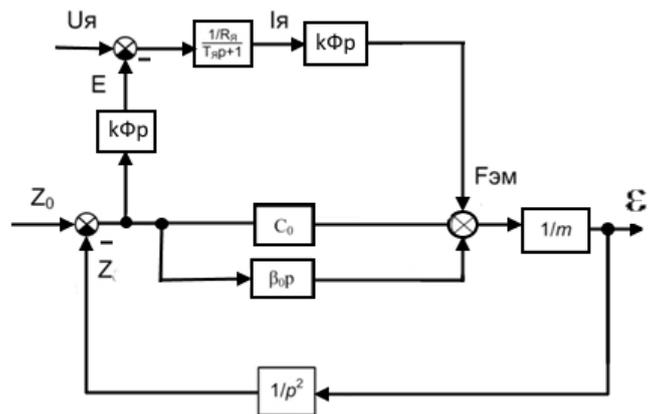


Рис. 3. Структурная схема системы активной виброзащиты.

С учетом структурной схемы на рис. 3 получена передаточная функция системы виброзащиты по каналу управления

$$W_Y(p) = \frac{\varepsilon(p)}{U_{я}(p)} = \frac{k\Phi p}{A p^2 + B p + D}, \quad (3)$$

где  $A = R_{я} m T_{э} \beta_0 + k\Phi p$ ,

$$B = T_{э} (1 + C_0) + \beta_0,$$

$$D = 1 + C_0.$$

**Вывод.** Полученные математические модели и структурная схема системы виброзащиты с управляемой жесткостью на основе линейного двигателя постоянного тока адекватно отражают свойства реальной системы виброзащиты. Передаточная функция по каналу управления может быть использована при разработке замкнутых систем виброзащиты с ЛДПТ. Передаточная функция системы виброзащиты по каналу возмущения может быть использована при исследовании свойств системы [5].

#### Список литературы

- [1] Хоменко А.П. Динамика и управление в задачах виброзащиты и виброизоляции подвижных объектов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2000. — 293 с.
- [2] Чегодаев, Д.Е. Управляемая виброизоляция (Конструктивные варианты и эффективность) [Текст] / Д. Е. Чегодаев, Ю.В. Шатилов. Самара: Самар. аэро-косм. ун-т, 1995. - 143 с.
- [3] Рандин Д.Г. Исследование динамических характеристик управляемого демпфера // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2013. № 2 (38). - С. 64-70.
- [4] Банина Н.В. Математическое моделирование виброзащитных систем с дополнительными активными связями // Вестник БГУ, серия «Математика и информатика». - Вып.3. - Улан-Удэ: БГУ, 2006, - С. 197-204.
- [5] Рандин Д.Г. Электротехническая активная система виброзащиты с магнитоэологическим демпфером: дис. Канд. техн. наук: 05.09.03. – Самара, 2016. – 133 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА РОЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Е.О. Шмакова<sup>1</sup>, В. П. Шойко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Новосибирский государственный технический университет", Новосибирск, Россия  
E-mail: Elena3565618@mail.ru

Размещение устройств компенсации реактивной мощности (КУ) является актуальной задачей в сетях различных классов напряжения, так как данное мероприятие приводит к снижению потерь активной мощности. Однако выбор мощностей КУ на сегодняшний день невозможно выполнить с помощью какого-либо универсального метода. Отсюда вытекает необходимость выбора метода оптимизации, а также проведения оценки результатов, полученных с его помощью. Для проведения исследования был использован стохастический алгоритм оптимизации - алгоритм роя частиц. Для моделирования действия алгоритма применялось программное обеспечение Matlab. При этом расчёты электроэнергетических режимов для работы алгоритма выполнялись посредством RastrWin.

*Ключевые слова* — *потери активной мощности; компенсирующие установки; глубокая компенсация; стохастическая оптимизация; алгоритм роя частиц.*

## OPTIMIZATION OF REACTIVE POWER COMPENSATION USING PARTICLE SWARM ALGORITHM

E. O. Shmakova<sup>1</sup>, V.P. Shoiko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: Elena3565618@mail.ru

Reactive power compensation device (CD) placement for networks of multiple voltage levels is an active task nowadays, because it leads to reduction of active power losses. However, it is impossible today to select CD's capacities using some kind of the universal method. Hence follows the necessity to find such optimization method and to verify the results of its work. For carrying out calculations particle swarm algorithm was used as an example of stochastic optimization algorithm. Matlab program complex was used as a tool of algorithm implementation, RastrWin was used for power grid state calculations.

*Key-words* — *power losses; compensating equipment; comprehensive compensation; stochastic optimization; particle swarm optimization algorithm.*

### I. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа посвящена задаче уменьшения потерь электроэнергии путём размещения в сети устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ). На сегодняшний день не существует универсального метода, позволяющего оптимально разместить УКРМ в электрической сети. Однако ещё в восьмидесятых годах прошлого века начались разработки стохастических алгоритмов для решения задач глобальной оптимизации. В некоторых публикациях их называют популяционными алгоритмами, что в большой степени отражает их суть. Рассмотренный в работе алгоритм роя частиц относится именно к популяционным алгоритмам. Они представляют альтернативу классическим «траекторным» алгоритмам поиска решений, так как подразумевают одновременную проработку нескольких вариантов решения задачи, а не приближение к искомому результату путём изменения единственного претендента на решение задачи.

И не смотря на то, что сходимость популяционных алгоритмов к глобальному решению не доказана, экспериментально установлено, что в большинстве случаев они дают достаточно хорошее решение [1].

Все расчёты электроэнергетических режимов, в целях определения потерь по сети были выполнены посредством программного комплекса RastrWin, что обеспечивает большую точность расчётов, а также даёт возможность применять данный алгоритм для схем любой топологии и размерности.

### II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве объекта для исследования был выбран фидер нефтедобывающего предприятия. Его особенность заключается в том, что основной его нагрузкой являются асинхронные двигатели для насосов на нефтяных скважинах. Как следствие, предприятие потребляет большую величину реактивной мощности. По данным контрольных замеров по ячейкам распределительных устройств подстанций предприятия, потребление реактивной мощности превышает потребление активной.

Рассматриваемый фидер рассчитан на номинальное напряжение 6 кВ. При этом непосредственное потребление электроэнергии происходит от трансформаторных подстанций 6/0,4 кВ, расположенных вблизи нефтяных скважин. Суммарная мощность одного фидера составляет 206 кВт, при этом потребление реактивной мощности составляет 407 квар. При таком

соотношении активной и реактивной мощностей потери активной мощности по фидеру составляют 5,15 кВт.

Также следует отметить особенности топологии исследуемой сети: линии в ней очень короткие и основные потери мощности приходятся на силовые трансформаторы. Поэтому при выборе места размещения компенсирующих устройств были выбраны шины 0,4 кВ трансформаторных подстанций, то есть непосредственно нагрузочные узлы.

Целью снижения потерь в сети, является в первую очередь снижение затрат на оплату потерянной электроэнергии. Однако для того чтобы это сделать, требуются определённые вложения. Именно баланс между затратами предприятия и снижением расходов на потери и определит целесообразность установки УКРМ. В общем случае, данную задачу можно свести к минимизации финансовых затрат. Таким образом, целевая функция примет следующий вид:

$$W_{sum} = \Delta P \cdot 8760 \cdot 4 \cdot \tau + Q_{sum} \cdot C_{кв}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – потери в электрической сети предприятия, кВт;

$\tau$  – тариф на электроэнергию, руб за кВт·ч (принят 2,7 руб за кВт·ч);

$Q_{sum}$  – суммарная установленная мощность УКРМ, квар;

$C_{кв}$  – стоимость установки 1 квар мощности УКРМ, руб (принята как 800 руб за 1 квар).

Для определения снижения целевой функции (1) потери по сети необходимо выгружать из RastrWin, значения величин мощностей УКРМ будут выбираться в Matlab, все остальные величины известны. В качестве расчётного периода было принято 4 года. В качестве допущения при оптимизации учитываются только максимальные нагрузки по узлам.

### III. АЛГОРИТМ РОЯ ЧАСТИЦ

Алгоритм роя частиц, в английской литературе, называемый PSO (particle swarm optimization), был разработан в 1995 году Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом. Его целью служила оптимизация непрерывных нелинейных функций. Разработанный ими алгоритм моделирует многоагентную систему, где агенты-частицы двигаются к оптимальным решениям, обмениваясь при этом информацией с соседями[2].

Нахождение решения в соответствии с каноническим методом PSO, включает в себя следующие этапы:

1. Создание роя частиц. На данном этапе для каждой частицы роя случайным образом выбираются оптимизируемые параметры, а также задаётся вектор скорости их изменения. Также на «нулевом» шаге роя выполняется нахождение оптимального решения для роя в целом и проверяется, снизили ли случайно выбранные параметры величину целевой функции.
2. Изменение оптимизируемых параметров в соответствии с их векторами скоростей.
3. Определение лучшего решения для частицы.
4. Определение лучшего решения для роя.

5. Коррекция скорости по частицам.
6. Повторение пунктов 2-5 до момента выполнения критерия остановки (в нашем случае заданное число итераций).
7. Вывод результатов оптимизации.

Самой важной частью алгоритма, напрямую влияющей на его сходимость, является коррекция скоростей частиц. В классическом варианте PSO, она выглядит следующим образом:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + \varphi_p \cdot r_p \cdot (p_i - x_{i,t}) + \varphi_g \cdot r_g \cdot (g_i - x_{i,t}), \quad (2)$$

где  $V_{i,t}$  – i-я компонента скорости при t-ой итерации алгоритма;

$x_{i,t}$  – i-я координата частицы при t-ой итерации алгоритма;

$p_i$  – i-я координата лучшего решения, найденного частицей;

$g_i$  – i-я координата лучшего решения, найденного всеми частицами;

$r_p, r_g$  – случайные числа в интервале (0, 1);

$\varphi_p, \varphi_g$  – весовые коэффициенты.

Второй компонент коррекции скорости (2) в некоторых источниках называется «когнитивным» компонентом (по социальной аналогии) и формализует тенденцию частицы вернуться в положение с минимальным значением целевой функции. Третий компонент в (2) называется «социальным» компонентом, который отражает влияние на данную частицу ее соседей. Собственно весовые коэффициенты (2) и задают степень ориентированности частиц на собственные лучшие решения, посредством коэффициента  $\varphi_p$ , или же на оптимальные решения всего роя, посредством коэффициента  $\varphi_g$ . Выбор данных коэффициентов сильно влияет на сходимость алгоритма, поэтому были разработаны модификации алгоритма, позволяющие снизить степень их влияния.

### IV. МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА

Наибольшую популярность получила модификация, разработанная в 2002 году Марис Клер и Джеймс Кеннеди, которая получила название канонического алгоритма роя частиц (Canonical PSO). Он вводит нормировку коэффициентов  $\varphi_p$  и  $\varphi_g$ , чтобы сходимость не так сильно зависела от их выбора[5]. В соответствии с данным методом коррекция скорости частиц будет выглядеть следующим образом:

$$V_{i,t+1} = X \cdot [V_{i,t} + \varphi_p \cdot r_p \cdot (p_i - x_{i,t}) + \varphi_g \cdot r_g \cdot (g_i - x_{i,t})], \quad (3)$$

где коэффициент нормировки X определяется как:

$$X = \frac{2 \cdot k}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4 \cdot \varphi}|}, \quad (4)$$

При этом  $\varphi$  является суммой весовых коэффициентов  $\varphi_p$  и  $\varphi_g$ , и не должно превышать 4-х, а коэффициент k должен лежать в интервале (0,1).

Такой подход гарантирует сходимость алгоритма без необходимости явно контролировать скорость частиц.

Также хотелось бы отметить и другую модификацию, которая была учтена в решении поставленной задачи.

Модификация Inertia Weighted PSO была разработана в 1998 году Юхи Ши и Расселом Эберхартом, предложившими, на первый взгляд совсем незначительные изменения в классический алгоритм [6]. В своей статье Ши и Эберхарт отмечали, что одной из главных проблем при решении задач оптимизации является баланс между тщательностью исследованием пространства поиска и скоростью сходимости алгоритма. В зависимости от задачи и характеристик поискового пространства в ней, этот баланс должен быть различным.

С учетом этого было предложено изменение правила обновления векторов скоростей частиц:

$$V_{i,t+1} = \omega \cdot V_{i,t} + \varphi_p \cdot r_p \cdot (p_i - x_{i,t}) + \varphi_g \cdot r_g \cdot (g_i - x_{i,t}), \quad (5)$$

Коэффициент  $\omega$ , названный ими коэффициентом инерции, определяет упомянутый баланс между широтой исследования и вниманием к найденным субоптимальным решениям. В случае, когда скорости частиц увеличиваются, они разлетаются в стороны и исследуют пространство более тщательно. В противном случае, скорости частиц со временем уменьшаются, и скорость сходимости в таком случае зависит от выбора весовых коэффициентов. Помимо того, что коэффициент инерции может быть константой, он также может зависеть от номера итерации  $t$ , например, линейно уменьшаться, начиная от небольшой величины, и до какой-то другой величины, отличной от нуля.

Одна из основных проблем конструирования популяционных алгоритмов, из-за которой и разрабатывается множество модификаций – обеспечение баланса между интенсивностью поиска (скоростью сходимости алгоритма) и широтой поиска (диверсификацией поиска). Интенсификация поиска требует быстрой сходимости алгоритма, что означает быстрое уменьшение разнообразия популяции. Напротив, диверсификация поиска призвана обеспечить более широкий обзор пространства поиска и более высокую вероятность локализации глобального экстремума задачи. Диверсификация требует сохранения разнообразия популяции в течение как можно большего числа поколений популяционного алгоритма [7].

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе экспериментов было налажено взаимодействие таких программ как RastrWin и Matlab посредством COM интерфейса Astra в Matlab. Особенностью вызываемых другой программой расчётов в RastrWin оказалась необходимость подтверждения изменений в рабочей области программы, что является самой затратной по времени частью расчётов. Исходя из этой особенности вычислений, встал вопрос о необходимости быстрой сходимости алгоритма. Поэтому при его реализации были применены модификации, описанные в предыдущем разделе. Осреднённое по шагам роя изменение целевой функции приведено на Рис.1.

При использовании модификаций PSO экспериментально было определено необходимое для решения количество частиц в рое, равное 40, а также количество шагов, которые сделает рой, равное 50. Для такой реализации время, требуемое на вычисление, составило приблизительно 3 минуты. Таким образом, не смотря на тот факт, что данные модификации снижают

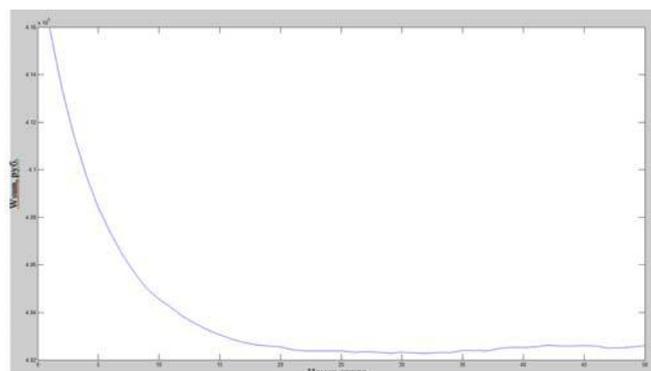


Рис. 1. Осреднённое по частицам значение целевой функции в процессе шагов роя, с учётом нормировки и инерции

обзор пространства поиска (частицы перебирают меньшее количество вариантов решений), отказываться от них в пользу увеличения количества итераций, нецелесообразно.

Так как алгоритм решения стохастический он даёт несколько отличающиеся решения от запуска к запуску. Исходя из чего, набиралась статистика из 10 запусков программы. Подобным образом также исключается проблема малого перебора вариаций из мощностей УКРМ в процессе шагов роя.

После всех запусков минимальное значение целевой функции (суммарные затраты) составляли 395540 руб. При этом, выполнив осреднение оптимальных мощностей УКРМ от различных запусков, значение целевой функции снизилось до 393278 руб. Что доказывает необходимость составления статистики запусков программы, ведь исходные значения мощностей УКРМ каждый раз выбираются случайным образом. При этом стоит отметить, что суммарные затраты для схемы без компенсации составляют 487450 руб, то есть даже единичный запуск программы приводит к относительно неплохому результату.

Также в процессе оптимизации был рассмотрен непосредственный подбор мощностей по каждому из нагрузочных узлов, в результате которого была выявлена зависимость степени компенсации реактивной мощности нагрузки от удалённости узла от питающей шины. Так для наиболее удалённых узлов, большинство частиц выбирало полную компенсацию, в то время как по ближайшему узлу к шине в среднем частицами выбиралась мощность компенсации равная половине нагрузки. График процесса подбора реактивной мощности по наиболее приближённому к питающей шине узлу, приведен на Рис.2. График процесса подбора реактивной мощности наиболее удалённом от питающей шины узле представлен на Рис. 3.

Как отмечалось при описании используемой целевой функции, в процессе оптимизации рассматривались только максимальные нагрузки. Отсюда возник вопрос, будет ли полученное решение целесообразным в действительности, когда часть нагрузки будет отключена, так как для данного потребителя характерно, что график нагрузки практически постоянный, колебания мощности по узлам минимальны, и изменение потребления предприятия происходит исключительно из-за различного состава включённого оборудования. Исходя из выше изложенного, для оценки результатов оптимизации в

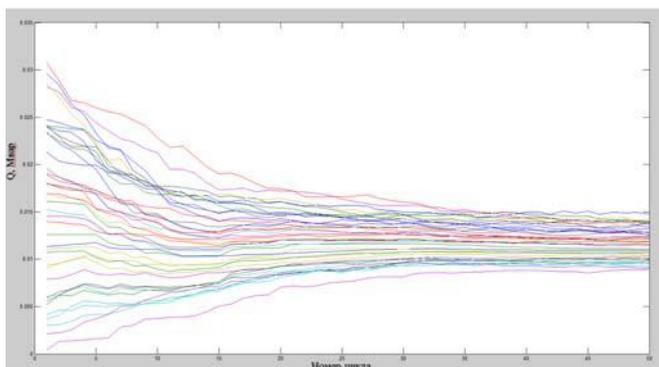


Рис. 2. Процесс подбора мощности УКРМ в ближайшем узле к питающей шине

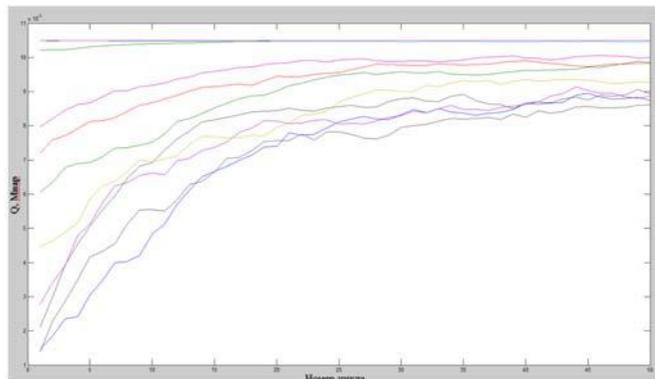


Рис. 3. Процесс подбора мощности УКРМ в наиболее удалённом от питающей шины узле

программном комплексе Matlab была реализована отдельная программа, моделирующая изменение состава включённого электросетевого оборудования, с периодичностью раз в месяц.

При учёте переменного графика потребления по фидеру суммарные затраты в сети без компенсации составляют 422630 руб., а при размещении мощностей УКРМ выбранных в процессе оптимизации 370930 руб. Таким образом, можно сделать вывод, что при оптимизации допустимо учитывать только максимальные величины мощностей нагрузок по узлам.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача оптимизации размещения УКРМ по нагрузочным узлам низковольтной электрической сети. Задача оптимизации была решена с помощью алгоритма роя частиц, реализованного на базе двух программных комплексов Matlab и RastrWin. Эксперименты показали, что размещение выбранных мощностей позволило бы сократить суммарные затраты на потери от передачи электроэнергии с учётом установки УКРМ от 13 до 20 %.

В рассмотренной задаче в силу варианта реализации с задействованием RastrWin упор делался на обеспечение быстрой сходимости алгоритма. Таким образом, с помощью разработанной программы можно проводить оптимизацию абсолютно любой размерности и топологии, так как использованный программный комплекс не имеет ограничений на данные параметры. Однако при этом

стоит учитывать, что из-за необходимости быстрой сходимости, найденные решения могут оказаться не глобально лучшими, хотя и достаточно хорошими.

В процессе работы алгоритма не обязательно рассматривать реальный график нагрузки потребления. Достаточно только максимально возможных значений реактивных мощностей по нагрузочным узлам. При этом выбираемая величина рассчитанная к установке также приводит к снижению суммарных затрат по сети.

## Список литературы

- [1] Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
- [2] Карпенко, А.П. Популяционные алгоритмы глобальной оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов. // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2012. – № 7. – С. 1-32.
- [3] Матренин, П.В., Секаев, В.Г. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта // Программная инженерия. – 2013. – № 12. – С. 39-45.
- [4] Матренин, П.В. Описание и реализация алгоритмов роевого интеллекта с использованием системного подхода // Программная инженерия. – 2015. – № 3. – С. 27-34.
- [5] Kennedy, J., Eberhart, R. C. “Particle swarm optimization” // In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, . – Piscataway, NJ. – 1995. – С. 1942-1948.
- [6] Clerc, M., Kennedy, J. “The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space” // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – № 6 (1). – С. 58–73.
- [7] Shi, Y., Eberhart, R. “A modified particle swarm optimizer” // The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. – 1998. – С. 69–73.

# Влияние несинусоидальности напряжения на учет электрической энергии индуктивным и электронным счетчиками.

А.О. Егоров, А.А. Губарев  
ФГАОУ ВО "УрФУ имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина",  
Екатеринбург, Россия  
E-mail: a.o.egorov@urfu.ru, gubarev.anton96@gmail.com

*Аннотация* — в электроэнергетической системе используются счетчики электроэнергии различного принципа действия, созданные для работы в условиях соблюдения ГОСТ на качество электрической энергии. Однако, в реальных условиях работы энергосистемы качество электроэнергии не всегда соответствует ГОСТ, особенно в части синусоидальности, что приводит к нарушению условий работы счетчиков и, как следствие, к искажениям учтенного счетчиком расхода электроэнергии. Такие искажения могут приводить как к переучету, так и чаще, к недоучету электроэнергии, отпускаемой потребителю. Проведенные эксперименты показывают причинно-следственную связь между несинусоидальностью напряжения и тока и учитываемым расходом электроэнергии на счетчиках электроэнергии различного принципа действия. При проведении исследований работы счетчиков электроэнергии использованы высокодискретные электрические измерения и методы математического анализа. В экспериментах использованы: регистратор-анализатор параметров качества электроэнергии Chauvin Arnoux CA 8335+, однофазные электронный счетчик электроэнергии Барс-1.211 и индукционный (электромеханический) счетчик СА4У. Результаты опытов позволили привести анализ одновременной работы электронного и индукционного счетчиков электроэнергии в условиях одинаковых параметров качества электрической энергии и идентичной нагрузки. Приведена сравнительная характеристика результатов, полученных счетчиками и прибором-регистратором ПКЭ. На основе чего сделан вывод: счетчики электроэнергии различного принципа действия по-разному учитывают объем отпускаемой потребителю электроэнергии как в условиях синусоидальности, так и в условиях несинусоидальности напряжений и токов. Своевременная метрологическая поверка или замена счетчиков приведет к снижению недоучета электроэнергии.

*Ключевые слова* — учёт, счётчик электроэнергии, несинусоидальность напряжений и токов, переучёт и недоучёт электроэнергии.

## Effect of non-sinusoidal voltage on the electrical energy accounting by induction and electronic meters

Alexander Egorov, Anton Gubarev  
Ural Federal University,  
Ekaterinburg, Russian Federation  
E-mail: a.o.egorov@urfu.ru, gubarev.anton96@gmail.com

*Abstract* — In the electric power system used in electricity meters of different principle of operation, designed to work in conditions of compliance with the standard on quality of electrical energy. However, in real conditions of operation of the power system power quality is not always consistent with the standard, especially in terms of THD, which leads to violation of the conditions of the counters and, as a consequence, the distortions taken into account by the counter flow of electricity. Such distortions can lead both to inventory and often to the underestimation of electricity supplied to the consumer. The experiments demonstrate a causal link between the non-sinusoidal voltage and current and take into account the electricity consumption on electricity meters different principle. In studies of the energy meters used highly discrete electrical measurements and methods of mathematical analysis. The experiments used: registrator-parameter analyzer, power quality Chauvin Arnoux CA 8335+, single-phase electronic energy meter bars-1.211 and induction (electro-mechanical) meter CA4U. The results of the experiments enabled an analysis of the simultaneous operation of electronic and induction electricity meters in terms of the same parameters of power and identical load. Comparative characteristic of the results obtained by the counters and the device-Registrar of the SCE. On the basis of which the conclusion is made that electricity meters of different principle of different take into account the volume supplied to the energy consumer in terms of sinusoidal and non-sinusoidal voltages and currents. Timely metrological calibration or replacement of meters will reduce the undercount of electricity.

*Keywords* — accounting, electricity meter, non-sinusoidal voltages and currents, re-registration and underreporting of electricity.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в электроэнергетической системе используются счетчики электроэнергии различного принципа действия. Не смотря на широкий выбор счетчиков, все они имеют определенные недостатки, ведущие к погрешностям при учете электроэнергии. С одной стороны, данные погрешности обусловлены конструкцией и принципом работы непосредственно самого прибора, а с другой качеством электрической энергии в сети. О размерах «собственных» потерь при качестве электроэнергии соответствующей ГОСТу [1] позволяет судить класс точности прибора.

Потери, связанные с несинусоидальностью тока не нормированы и, соответственно, не имеют определенного процентного соотношения с потребленной полезной мощностью. Их размер зависит от постоянно изменяющегося спектра высших гармоник. Появление высших гармоник тока обуславливается, главным образом, наличием нелинейных элементов в цепи нагрузки: дуговые печи, насыщенные магнитопроводы, преобразовательные установки. [2] Количество этих элементов с каждым годом возрастает. Счетчики же электрической энергии согласно ГОСТу, имеют номинальные частоты 50 и 60 Гц. [3] Таким образом, они измеряют расход электроэнергии лишь по первой гармонике. Целью данной работы является количественное определение погрешности измерения приборов энергоучета, связанной с несинусоидальностью токов и напряжений в сети.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

В работе использовался прибор регистратор-анализатор ПКЭ Chauvin Arnoux SA 8335+, однофазный индуктивный счетчик электрической энергии модель СО-У449М2-3 (класс точности 2), однофазный электронный счетчик БАРС – 1.211 (класс точности 1). За эталон приняты значения полученные с помощью SA 8335+, так как погрешность прибора менее 0.1%. Выше перечисленные приборы были соединены последовательно и подключены с одной стороны к бытовой розетке, с другой к нагрузке, в качестве которой использовался холодильник Gorenje RK 6357 E. Проведены 3 опыта, каждый из которых длился 7 дней. Эксперимент 1 – подключение одновременно всех 3 приборов, эксперименты 2,3 попарное включение счетчиков с SA 8335+. Измерения потребленной энергии на SA 8335+ с дискретностью измерений 5 с, обработка результатов проводилась с помощью программного комплекса РАТ2. Проведено сравнение полученных данных с трех приборов по абсолютным величинам. Вычислена зависимость погрешности измерений 2 счетчиков от SA 8335+. После чего с учетом точности счетчиков электроэнергии сделан вывод о размере погрешностей приборов, связанных с несинусоидальностью напряжения и тока в сети.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные полученные в ходе эксперимента приведены в таблице 1.

Опыт показал, что счетчики электрической энергии показывают заниженные значения потребленной

электроэнергии. Средняя арифметическая разница между измерениями регистратор-анализатора и индуктивным счетчиком составляет 6,21 %, а электронным 2,73 %. При том, что классы их точности равны 2 и 1 соответственно. Видно, что погрешность измерения, электронного счетчика меньше, чем индуктивного. От части это связано с более совершенными конструкцией и принципом работы первого. Таким образом, если учесть неточность измерения приборов в соответствии с их классами, то оставшиеся процентные погрешности будут объясняется наличием искажения измерений, внесенных несинусоидальностью токов и напряжений. Эти дополнительные погрешности измерений составляют порядка 3-4 % для индуктивного и 1-2 % для электронного.

Таблица I. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

№ опыта	счетчик	W, кВт	%	delta, %	delta, кВт
1	СА 8335+	9,927	100,00		
	индуктивный	9,34	94,09	5,91	0,59
	электронный	9,66	97,31	2,69	0,27
2	СА 8335+	10,183	100,00		
	индуктивный	9,52	93,49	6,51	0,66
3	СА 8335+	10,212	100,00		
	электронный	9,93	97,24	2,76	0,28

## IV. ВЫВОД

Счетчики показывают заниженные значения потребленной электрической энергии. Погрешность измерения электроэнергии у индуктивного счетчика больше, чем у электронного. Следовательно, низкое качество электроэнергии в части несинусоидальность оказывает большее влияние на индуктивный счетчик, что приводит к значительному отклонению его показателей от истины. Для электронного счетчика данное явление так же имеет место быть, но в меньшей степени.

Стоит отметить значимость этих потерь для потребителей разного уровня. Для учета электроэнергии бытового уровня порядка 250-350 кВт\*ч значения в 3-4 % не являются критичными, в то время как в рамках крупного производства, данные величины могут привести к ощутимым убыткам для энергосбытовых компаний.

## Список литературы

- [1] ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии, 2013
- [2] Минин Г.П. Измерение мощности. М.-Л., «Энергия», 1963
- [3] ГОСТ 31818.11-2012. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Общие требования Испытания и условия испытаний. Часть 11, 2012
- [4] Соколов В.С., Созыкин А.А., Коровкин Р.В. Работа электросчетчиков в условиях пониженного качества электроэнергии // Электронный журнал «Новое в Российской электроэнергетике» -2005 –№3
- [5] Кириллов С.В. Снижение погрешности учета электрической энергии в системах электроснабжения с преобладающей нелинейной нагрузкой / Автореф. дисс. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Саратов, 2006

# Методика расчета электрических нагрузок жилых и общественных зданий по фактическим данным

А.И. Федотов<sup>1</sup>, А.Н. Кривов<sup>2</sup>, А.Р. Ахметшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Россия

<sup>2</sup>АО «Татэлектромонтаж», Казань, Россия

E-mail: ahmetshin.ar@mail.ru

**Аннотация** — проектные организации для расчета мощности, потребляемой жилыми и общественными зданиями, используют нормативные удельные значения нагрузок. Практика строительства и эксплуатации систем городского электроснабжения показала, что в большинстве случаев реальные нагрузки меньше расчетных в 2 – 4 раза. Необходим пересмотр нормативных значений нагрузки на основе экспериментальных замеров профилей мощности. Недавно построенные кабельные сети и трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ по факту оказываются недогруженными. Причем эта недогрузка такая, что трансформаторы редко работают на 50 % от своей мощности в часы максимального электропотребления. Очевидно омертвление инвестиций электросетевых компаний, поскольку после застройки микрорайона редко появляется возможность подключения нового потребителя.

**Ключевые слова** — жилое здание, общественное здание, система электроснабжения, расчетная нагрузка, суточные профили мощности, экспериментальные исследования.

## Method of calculation of electrical loads of residential and social buildings by actual data

A.I. Fedotov<sup>1</sup>, A.N. Krivov<sup>2</sup>, A.R. Akhmetshin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC "Tatelectromontazh"

E-mail: ahmetshin.ar@mail.ru

**Abstract** — project organizations for calculating the power consumed by residential and public buildings use the normative specific values of the loads. The practice of construction and operation of urban electricity supply systems showed that in most cases, real loads are less than estimated in 2 - 4 times. It is necessary to revise the normative values of the load on the basis of experimental measurements of the power profiles. The newly constructed cable networks and 10 / 0.4 kV transformer substations are in fact underloaded. And this underload is such that the transformers rarely operate at 50% of their capacity during the hours of the survey of power consumption. Obviously, the necrosis of investments by power grid companies, since after the construction of the micro district, it is possible to connect a new user.

**Keywords** — residential building, public building, power supply system, design load, daily power profiles, experimental studies.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет электрической нагрузки – основа системы электроснабжения любого объекта капитального строительства. От величины электрической нагрузки зависит структура системы, мощность и, соответственно, стоимость закладываемого электрооборудования. Стоимость технологического подключения к действующим электрическим сетям определяется, главным образом, значением мощности, которую потребитель пишет в своей заявке.

В настоящее время действует два нормативно-технических документа, регламентирующих расчет нагрузок жилых зданий. Это СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» [1] и РД 34.20.185-

94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» [2].

Как показали оценочные расчеты, нормативы, указанные в этих НТД, существенно завышены по сравнению с реальными значениями. За последнее десятилетие электропотребление бытовыми приборами, как и сами приборы изменились. Причем в сторону уменьшения потребления электроэнергии. Современный бытовой прибор, будь то холодильник или стиральная машина, это прибор с обязательно обозначенной категорией энергосбережения. И чем выше класс, тем прибор конкурентоспособнее. И такая тенденция еще долго будет сохраняться среди заводов-изготовителей бытовой техники. Кроме того, для освещения улиц и дворов всё чаще применяются светодиодные светильники, в квартирах применяются энергосберегающие лампы, растет стоимости 1 кВтч, жильцы действительно экономят электроэнергию. Также стоит отметить, что каждый год

вводится большое количество нового жилья, следовательно, уменьшается удельная плотность населения [человек/м<sup>2</sup>].

Указанные выше факторы оказывают влияние на уменьшение действительного значения удельной нагрузки [кВт/м<sup>2</sup>]. Поэтому и создалась такая ситуация, когда нормативы электропотребления, приведенные в действующей нормативно-технической документации, не отражают действительные значения и завышены.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Качественно сопоставляются суточные графики нагрузки городов Зеленодольска (Россия) и Худжанда (Таджикистан), близких по этажности застройки и количеству населения. На рис. 1 представлен суточный профиль токовой нагрузки одного из фидеров Худжандских городских электрических сетей. На рис. 2 представлены усредненные суточные профили мощности для трех пятиэтажных многоквартирных жилых домов (МКД) г. Зеленодольска с газовыми плитами. На рис. 4 представлен суточный график трех дошкольных образовательных учреждений (ДОУ).

Сопоставляя графики рис. 1 и рис. 2, видим, что профили мощности существенно разнятся. Это обстоятельство имеет принципиальное значение при разработке общих норм определения расчетной нагрузки. Очевидно, что разница в графиках не может быть объяснена только различием оснащённости населения бытовыми электроприборами.

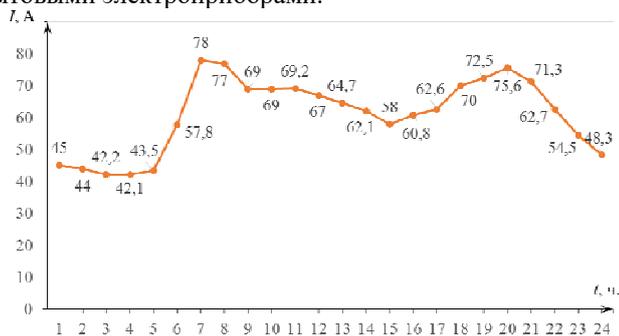


Рис. 1. Суточный график токовых нагрузок.

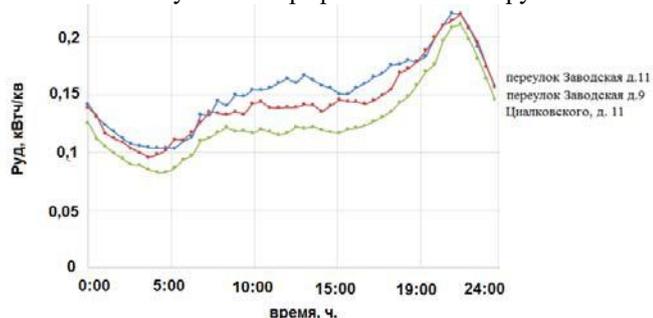


Рис. 2. Суточный график мощности в г. Зеленодольске.

Обращает на себя внимание значительная величина потребления реактивной мощности (рис. 3), что делает актуальным постановку задачи введения в городской подстанции уже на стадии проектирования устройств компенсации реактивной мощности.

Видим, что графики на рис. 2, дают максимальную мощность в несколько раз ниже нормативной, принятой для г. Москвы. На рис. 5 представлен сведенный суточный график ДОУ и МКД, из которого видно, что

часы максимумов для различных категорий потребителей смещены.

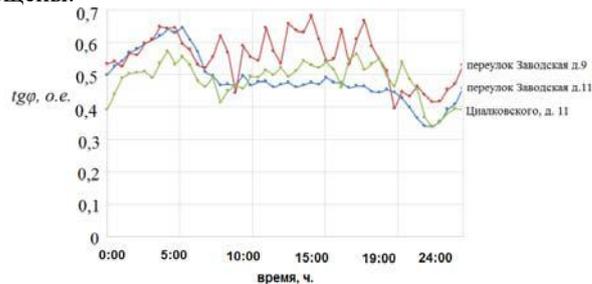


Рис. 3. Профиль коэффициента реактивной мощности для г. Зеленодольска (рис. 2).

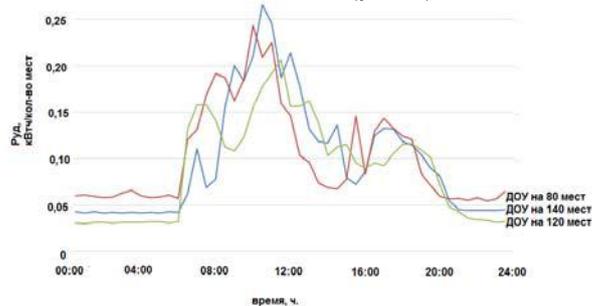


Рис. 4. Суточный график мощности ДОУ.

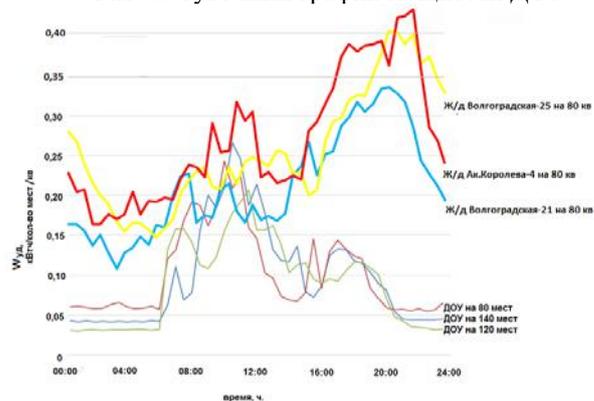


Рис. 5. Суточный график ДОУ и МКД (5 эт.)

## III. ВЫВОДЫ

Во-первых, не следует ожидать, что можно получить универсальные нормы, пригодные для любого региона страны.

Во-вторых, необходимо выполнение исследовательских работ по сбору и статистической обработке электрических нагрузок в различных жилых зданиях различных городов с учетом их географического расположения и занятости населения.

В-третьих, необходимо утверждение на региональных уровнях рекомендаций для проектных институтов по значениям удельных нагрузок.

В-четвертых, необходима разработка методики выбора мощности трансформаторных подстанций распределительной электрической сети по сформированной базе электрических нагрузок.

## Список литературы

- [1] СП 256-1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»
- [2] РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей».

# Интервальная оптимизация различных субъектов распределительных сетей

Н.Д. Мухлынин, А.В. Паздерин  
ФГАОУ ВО "УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина"  
Екатеринбург, Россия  
E-mail: mukhlynin@me.com

*Аннотация* — Тенденция к внедрению в распределительные сети 0.4 кВ, 6-10/35 кВ управляемых источников малой генерации, накопителей электроэнергии, современного коммутационного оборудования и развитие систем учета электроэнергии становится все более устойчивой и направленной главным образом на повышение надежности системы электроснабжения и частичное обеспечение эффективной работы отдельных участников энергообмена. Возможности использования данного оборудования в рамках повышения эффективности работы субъектов сети могут быть значительно расширены за счет использования развитой математической модели связи экономических и технических параметров работы оборудования. В статье приведена математическая модель режима работы сети, а также стратегии использования этой модели для коррекции режимов работы различных субъектов сети. Функционирование такой модели осуществляется на основе системы АИИС КУЭ и существующих механизмов розничного рынка. Выдача управляющих воздействий на устройства управления производится на заданных интервалах времени с учетом регулировочных способностей оборудования.

*Ключевые слова* — потоковая модель режима работы сети, топология сети, распределительная сеть, оптимизация режима работы, участники энергообмена, малая генерация.

## Interval optimization of power exchange participants in the distribution grids

Nikita Mukhlynin, Andrey Pazderin  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
Yekaterinburg, Russia  
E-mail: mukhlynin@me.com

*Abstract* — The trend to introducing controllable distributed generators, energy storages, modern switching equipment to the grids of 0.4-10 kV and 6-10/35 kV and development of energy metering systems is becoming more stable and aimed mainly at increasing the reliability of the power supply system and partial increasing the efficiency of operating the energy exchange participants. The possibilities of using this equipment within increasing the efficiency of the grid agents can be significantly extended by means of using the developed mathematical model of linking economic and technical parameters of the equipment operating. This paper describes strategies of using the optimization model for various power exchange participants based on estimating their operating mode. Operating of such a model should be carried out with an orientation to AMR and AMI measuring systems and existing mechanisms of the retail energy market. The results of control commands to the flexible devices able to correct the operation mode of the subject of the distribution grid is carried out at the certain time intervals.

*Key words* — energy flow model, grid topology, distribution grid, operation mode optimization, energy exchange participants, distributed generators.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных правил функционирования розничного рынка, повышение эффективности работы потребителей (юридических лиц) становится возможным путем усложнения организации их отчетности за потребленную электроэнергию [1]. Переходы от низкой ценовой категории к более высокой должны приводить к снижению затрат на электроэнергию (ЭЭ), но только при выполнении заданных конкретной ценовой категорией условий. Экономическая выгода от перехода на более «сложную» ценовую категорию может быть достигнута путем гибкой коррекции своего режима работы.

Управление своим режимом работы редко представляется возможным, особенно на малых предприятиях. Одним из способов коррекции своего графика нагрузки является использование источников малой и распределенной генерации (в том числе и возобновляемую энергетику), а также накопителей электроэнергии. Поэтому сегодня, малая энергетика, ввиду появления высокоманевренных устройств, начинает играть ключевую роль в решении задачи коррекции режима работы различных субъектов распределительных сетей 0.4-35 кВ [2].

Контроль над выполнением условий выбранной ценовой категории может осуществляться на месячных,

суточных, часовых и минутных интервалах времени. Такие интервалы времени принято называть коммерческими интервалами. Коррекция режима работы потребителей в пределах коммерческого интервала может происходить за счет дискретного изменения уставки, например, выдачи мощности генерирующих устройств. Интервал времени, на котором осуществляется управление является диспетчерских интервалом. Как правило, диспетчерский интервал меньше коммерческого, либо может быть равен ему. В зависимости от маневренности выбранного устройства управления, диспетчерский интервал для него может быть определен пятью минутами [3]. В таких условиях, когда информация об объемах электропотребления и средней мощности на интервале времени используется для финансовых расчетов и управления режимами работы различных субъектов сети, становится важным разработка алгоритма для автоматизированного устройства управления потоками мощности и энергии в микросетях (УУпМиЭ).

## II. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УУПМИЭ

Основной задачей, которая ставится перед автоматизированным устройством управления потоками мощности и энергии, является управление потребительской системой электроснабжения за счет воздействия на коммутационную аппаратуру, источники малой генерации и реактивной мощности, накопители ЭЭ с учетом внешних ценовых сигналов, а также технических и технологических ограничений оборудования с целью снижения общих затрат на обеспечение процесса электроснабжения того субъекта сети, где оно установлено. Данная задача может решаться сетевыми компаниями, крупными потребителями, а также внутри потребительских энергосистем. Развертывание данной системы в рамках некоторого субъекта сети, возможно в первую очередь, при наличии у него устройств, позволяющих корректировать его режим работы. Другим обязательным условием, является наличие функционирующей системы АИИС КУЭ с двухсторонними каналами связи и микропроцессорными счетчиками ЭЭ. При этом становится возможным установка системы управления на территории субъекта сети с подключением ее к уже имеющейся информационно-измерительной системе. Также система управления потоками мощности и энергии может быть гибко сконфигурирована в зависимости от имеющихся устройств управления, финансовых условий взаимоотношения участников энергообмена и др.

## III. ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМА РАБОТЫ СЕТИ

Для расчета потоков электроэнергии в сети предлагается использование потоковой модели режима работы распределительной сети [4]. Основу данной математической модели образуют уравнения балансов ЭЭ, которые можно записать для всех  $N$  узлов и всех  $M$  ветвей схемы замещения электрической сети. Каждое уравнение узлового баланса по активной ЭЭ определяет, что нулю равна сумма втекающих в узел и вытекающих из узла потоков ЭЭ, т.е. сумма потоков ЭЭ  $W_{ij}$  по всем ветвям, смежным с узлом  $i$  (принадлежат множеству  $\omega_i$ ), узлового потока ЭЭ  $W_i$  и технических потерь ЭЭ  $\Delta W_i$  в узле  $i$ :

$$\sum_{j \in \omega_i} W_{ij} + W_i + \Delta W_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Вторая группа балансовых уравнений, определяющих систему уравнений состояния для потоковой модели режима работы сети, это уравнения балансов ЭЭ в ветвях схемы сети. Для всех  $M$  ветвей схемы сети сумма потоков ЭЭ в начале ветви  $W_{ij}$ , в конце ветви  $W_{ji}$  и технических потерь ЭЭ в данной ветви  $\Delta W_{ij}$  равна нулю:

$$W_{ij} + W_{ji} + \Delta W_{ij} = 0, \quad ij = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

Система, состоящая из уравнений (1) и (2) записывается для единого расчетного интервала времени  $T$ , в течение которого могут происходить топологические и режимные изменения. В следствие этого, направления перетоков мощности на участках сети могут изменяться на противоположные. Поэтому все потоки ЭЭ в указанных уравнениях должны быть представлены в сальдированном исчислении. Знаки этих потоков записаны по отношению к узловым инъекциям, то есть вытекающий из узла поток ЭЭ отрицателен (нагрузка), а втекающий в узел поток ЭЭ положителен (генерация). Сальдированное значение определяется путем суммирования одноименных потоков ЭЭ с учетом их знаков. При этом уместно отметить, что современные счетчики ЭЭ позволяют производить измерения электроэнергии с учетом направлений.

В уравнениях баланса ЭЭ для узлов и для ветвей присутствуют величины технических потерь ЭЭ  $\Delta W_i$  и  $\Delta W_{ij}$ , и система из уравнений (1)-(2) должна быть дополнена уравнениями для расчета технических потерь ЭЭ. При этом необходимо так сформировать наиболее точную расчетную схему замещения электрической сети, чтобы она корректно учитывала потери ЭЭ в продольных и поперечных элементах схемы.

## IV. МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ СЕТИ

Модель оптимизации режима работы распределительной сети основывается на балансовых уравнениях потоковой модели. Поэтому по аналогии с ней, все критерии оптимизации также должны быть выражены через потоки активной и реактивной энергии/мощности, т.е. через единый вектор состояния. С учетом последнего, целевая функция задачи оптимизации  $F_{\text{опт}}$  может быть записана следующим образом:

$$F_{\text{опт}}(W_{Pij}, W_{Qij}, U_i) = w_P[P] + w_C[C] + w_S[S] + w_R[R] + w_E[E] \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $U_i$  – среднее значения узлового напряжения. Используется в качестве дополнительного параметра в векторе состояния потоковой модели.

Минимум представленной функции может быть найден с использованием итерационного метода Ньютона. В зависимости от рассматриваемого участника сети, целевая функция задачи оптимизации может содержать различный набор подкритериев. Если критерий не используется, его значение в выражении (3) равно 0. Весовые коэффициенты  $w_i$  определяют приоритет выбранных подкритериев. Для сетевых компаний, главным критерием является потери энергии  $[P]$  а значит весовой коэффициент перед этим критерием будет высоким. Потери энергии в рамках данной критерия могут быть записаны через стандартное выражение с использованием переменных вектора состояния  $(W_{Pij}, W_{Qij},$

$U_i$ ). Вторым критерием оптимизации режимов работы сетевых компаний является подкритерий выполнения заданного графика [S] определяющий объемы отпущенной потребителям электроэнергии. Коэффициент при этом критерии может иметь меньший весовой коэффициент. Подкритерий [S] можно записать как:

$$[S] = \sum_{m=1}^N c_{шт,м}^s \int_0^T (P_m^{план}(t) - P_m^{факт}(t)) dt \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $c_{шт,м}^s$  – стоимость удорожания электроэнергии.

Таким образом, для сетевых компаний для оптимизации своего режима работы в целевой функции необходимо учитывать только два подкритерия [P] и [S]. Если потребитель имеет в своем распоряжении источники генерации и использует их для коррекции своего режима работы, то такой потребитель может называться активным. Для него, целевая функция (3) может содержать четыре подкритерия ([C], [R], [S], [E]). Баланс между покупкой ЭЭ из сети общего пользования по цене  $c_{pp}$  и стоимости выработки ЭЭ своими генерирующими источниками  $c_{pg}$  для минимизации затрат на ЭЭ определяется выражением:

$$[C] = \sum_{j=1}^N \left( c_{pp,j} \int_0^T (P_j^{нагр}(t) - P_j^{pg}(t)) dt + c_{pg,j} \int_0^T P_j^{pg}(t) dt \right) \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $W_{нагр}^{нагр}$ ,  $W_{pg}^{pg}$  – активная энергия нагрузки и генерации каждого узла.

Эффективное использование источника распределенной генерации, с точки зрения затрат на топливо, должно описываться квадратичным полиномом расходной характеристики в подкритерии [R]:

$$[R] = \sum_{l=1}^N c_{топ,l} (a_l P_l^2(x) + b_l P_l(x) + c_l) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $a_l$ ,  $b_l$ ,  $c_l$  – коэффициенты полинома расходной характеристики каждого источника распределенной генерации;  $c_{топ}$  – удельная стоимость топлива.

Последний подкритерий [E], отвечающий за соблюдение экологических, далее в статье не будет рассматриваться. В перечисленных выше подкритериях переход от потоков мощности к потокам энергии за период времени  $T$  происходит путем их ступенчатого интегрирования. Время интегрирования тесно связано с возможностями устройств управления. Таким образом, чтобы управлять вакуумной коммутационной аппаратурой, период интегрирования должен составлять не менее 8 часов, т.к. он ограничен коммутационным ресурсом. В то же время, управление распределенными источниками может выполняться с меньшими временными интервалами. Кроме того, целевая функция оптимизационной модели  $F_{опт}$  (3) может быть дополнена различными технико-экономическими ограничениями на обслуживание генераторов, ограничениями по скорости набора и сброса нагрузки и т.д. [5]

Основная идея предлагаемой математической модели заключается в ее гибкости к построению целевой функции для любого субъекта распределительной сети в зависимости от его интересов и минимизация этой функции на разных интервалах времени в зависимости от характеристик маневренности устройств управления.

## V. ПРИМЕР ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Тестовая распределительная сеть 10 кВ топологически представлена одним кольцом (рисунок 1), выполненным кабельными линиями и подключена двумя питающими фидерами к одному центру питания. Такая замкнутая конфигурация сети наиболее полно подходит для сетей с распределенной генерацией [6]. В этой сети можно выделить двух участников энергообмена. Первый представлен активным потребителем, имеющим дизель-генераторную установку (ДГУ) фирмы Cummins мощностью  $P_e=1600$  кВт и подключенным к КТП-1 (узел 6). Вторым субъектом сети является сетевая компания, которой принадлежит участок распределительной сети с коммутационной аппаратурой, позволяющей менять топологию сети для снижения потерь электроэнергии.

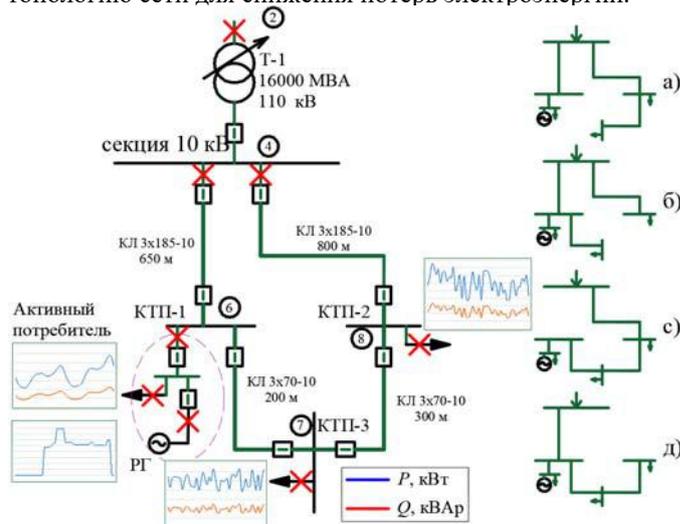


Рис. 1. Исходная схема и варианты топологии тестовой сети 10 кВ

Эффективность работы потребительской ДГУ будет определяться стоимостью ЭЭ в сети общего пользования и стоимостью выработки ЭЭ его установкой. На рисунке 2 показано, что в период дорогой сетевой ЭЭ, основная нагрузка потребителя покрывается его дизель-генераторной установкой в соответствии с подкритериями [C] и [R]. С другой стороны, в периоды дешевой сетевой ЭЭ, вся ЭЭ покупается из внешней сети. В этом примере, управление ДГУ осуществляется на часовых интервалах времени. Более точно управлять генерацией, можно применяя модели опережающего управления [7], использующие уравнения и вектор состояния потоковой модели режима работы распределительной сети.

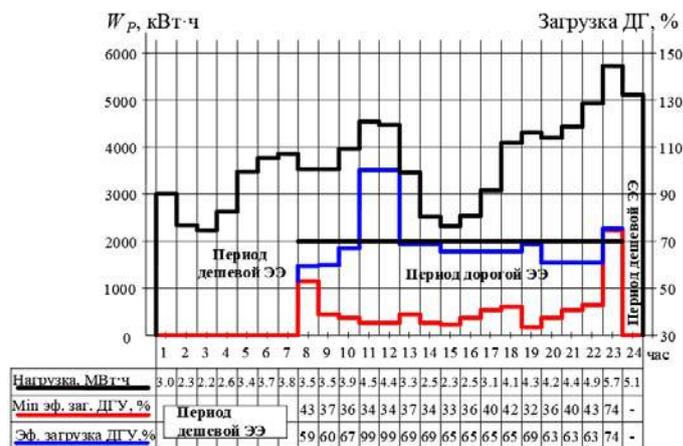


Рис. 2. Суточный план работы потребительской ДГУ

Таблица 1. ПОТЕРЬ ЭЭ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПОЛОГИЯХ СЕТИ

Вариант топологии участка сети	Исходная кольцевая конфигурация	Радиальная, разрыв по связи 6-7 (а)	Радиальная, разрыв по связи 7-8 (б)	Радиальная, разрыв по связи 4-6 (с)	Радиальная, разрыв по связи 4-8 (д)
Потери активной ЭЭ $\Delta W_p$ на интервале времени с 1 по 7 час, кВт·ч	259.668	265.718	345.038	746.982	469.641
Потери активной ЭЭ $\Delta W_p$ на интервале времени с 8 по 23 час, кВт·ч	446.940	475.166	610.155	1278.135	801.301
Потери активной ЭЭ $\Delta W_p$ на интервале времени 1 час (24:00), кВт·ч	81.191	87.618	117.014	241.477	140.069
<b>Всего <math>\Delta W_p</math> за сутки, кВт·ч</b>	<b>787.799</b>	<b>828.501</b>	<b>1072.207</b>	<b>2266.595</b>	<b>1411.011</b>
Отпуск ЭЭ в сеть, кВт·ч/24 ч.	108 856.554	108 897.256	109 140.962	110 335.349	109 479.765
<b>Потери активной ЭЭ, выраженные в % от отпуска ЭЭ в сеть</b>	<b>0.724 %</b>	<b>0.761 %</b>	<b>0.982 %</b>	<b>2.054 %</b>	<b>1.289 %</b>

В соответствии с выражением (3) основным подкритерием для сетевой компании является  $[P]$ , определяющий потери ЭЭ в ее сети. Для исходной замкнутой схемы сети (рисунок 1), рассматривались различные варианты по изменения ее топологии (а, б, с, д). В течении суток, на основе измерений ЭЭ от счетчиков, показанных красными крестами, рассчитывались потери ЭЭ. Исходной информацией для расчета служили прогнозы нагрузки и планы по генерации. Расчет производился для трех промежутков времени, определяющих работу ДГУ в узле 6 (рисунок 2).

Первый семичасовой период (с 1 по 7 час) и третий период (24 час) определяют время, когда ДГУ была отключена. В течение второго шестнадцатичасового периода времени (с 8 по 23 час) ДГУ находилась в работе в соответствии с ее планом работы. Результаты расчета потерь ЭЭ для 5 различных конфигураций сети показаны в таблице 1. Значения относительных потерь ЭЭ за сутки показывают, что наиболее эффективным вариантом является исходная замкнутая конфигурация сети. Смена топологии сети возможна до 3 раз в сутки путем выдачи управляющих воздействий на выключатели от системы управления потоками мощности и энергии.

## VI. Выводы

В статье продемонстрировано то, как основные направления развития распределительных сетей используются для повышения надежности и управляемости различных участников энергообмена. Ключевой особенностью предлагаемого в статье подхода к оптимизации является управление генерирующими установками, коммутационной аппаратурой, системами хранения электроэнергии и другими устройствами управления на заданных интервалах времени, определяемых их маневренностью и существующими механизмами розничного рынка. Решение такой оптимизационной постановки задачи должно осуществляться в полуавтоматическом режиме с контролем изменения внешних ценовых показателей на электроэнергию и топливо. Основные выводы по статье:

1. Задача оптимизации режимов работы различных субъектов распределительных сетей не должна

решаться в режиме on-line, а должна основываться на планировании работы устройств управления режимом работы субъектов сети.

2. Решение задачи оптимизации на различных интервалах времени обусловлено их спецификой информационного развития, механизмами розничного рынка и регулировочными возможностями оборудования.
3. В качестве модели режима работы сети рекомендуется использование потоковой модели, как обладающей с учетом необходимости решения задачи оптимизации на различных интервалах времени.
4. Описанный подход к оптимизации распределительных сетей позволяет обеспечить баланс интересов всех участников энергообмена. Эффективность работы каждого субъекта сети может быть улучшена не только за счет правильного выбора стратегии финансовых взаимоотношений между субъектами, но и с помощью оптимизации своего графика нагрузки и режимов работы установленного оборудования.

## Список литературы

- [1] J. Kumar and A. Jayantilal, "Models of Distributed Energy Resources markets in distribution grid operations," 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, 2011, pp. 1-6.
- [2] T. Hammons, L. L. Lai and K. P. Wong, "International practices in distributed generation," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1-7.
- [3] The ENTSO-E Settlement process. Version 1.2. 2010-10-08.
- [4] Мухлынин Н.Д. Потоковая модель оценивания состояния и оптимизации режимов работы распределительных сетей / Н.Д. Мухлынин, А.В. Паздерин // Известия вузов. Проблемы энергетики. № 9-10/2016, с. 3-15.
- [5] F. Valencia, D. Sáez, J. Collado, F. Ávila, A. Marquez and J. J. Espinosa, "Robust Energy Management System Based on Interval Fuzzy Models," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, no. 1, pp. 140-157, Jan. 2016.
- [6] Мухлынин Н.Д. Перспективные топологии и информационное обеспечение в распределительных сетях / Н.Д. Мухлынин, А.В. Паздерин // Вестник науки Сибири Изд-во Томский политехнический университет. 2015. № 15. С. 72-76.
- [7] T. Broomhead, C. Manzie, P. Hield, R. Shekhar and M. Brear, "Economic Model Predictive Control and Applications for Diesel Generators," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 25, no. 2, pp. 388-400, March 2017.

# Изучение питания дуг в ДСП от независимых источников

С.В.Казаков<sup>1</sup>, Т.Ю.Дунаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.",

Саратов, Россия

E-mail: [foxbee@mail.ru](mailto:foxbee@mail.ru)

**Аннотация** — Состояние вопроса: В трехфазных ДСП на дуги действуют две электромагнитные силы - осевая и отклоняющая. Осевая электромагнитная сила оказывает положительное влияние на технико-экономические показатели работы печей. Отклоняющая электромагнитная сила оказывает отрицательное влияние на их показатели. Под ее воздействием дуга выбрасывается из углубления в металле и шлаке, ее излучение на стены, свод, газ, заполняющий свободное пространство, увеличивается, а полезная мощность, усваиваемая металлом, уменьшается. Одним из способов, позволяющих уменьшить влияние отклоняющей силы на дуги, может быть питание дуг от трех независимых источников.

**Материалы и методы:** При исследовании предложенной схемы питания печного агрегата использовались методы математического моделирования. Для моделирования поведения системы использовался прикладной пакет MathCAD.

**Результаты:** Изучено влияние новой схемы питания дуг ДСП на ее технико-экономические показатели. Показано, как при изменении заглубления дуги в шлак меняется ее мощность и КПД. Доказано, что при предложенном построении системы электропитания печи отклоняющая электромагнитная сила и выдувание дуг в этих печах отсутствуют, что повышает энергетическую эффективность работы печи.

**Выводы:** Изученное техническое решение может быть предложено к промышленной реализации. Внедрение предложенной системы питания ДСП позволит увеличить технико-экономическую эффективность процесса выплавки стали.

**Ключевые слова** — дуговая сталеплавильная печь; электрическая дуга; печной трансформатор; независимое питание дуг; отклоняющая электромагнитная сила

## Studying the Arc Power in an Electric Arc Furnace from Independent Sources

S.V.Kazakov<sup>1</sup>, T.Yu. Dunaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saratov State Technical University,

Saratov, Russian Federation

E-mail: [foxbee@mail.ru](mailto:foxbee@mail.ru)

**Abstract** — Background: In three-phase EAF, two electromagnetic forces act on the arcs: axial and deflecting. The axial electromagnetic force has a positive effect on the furnaces technical and economic performance. The deflecting electromagnetic force has a negative effect on the technical and economic results. Under its influence, the arc is thrown out of the groove in the metal and slag, its radiation to the walls, the vault, the gas filling the free space, increases. The useful power absorbed by the metal decreases. One way to reduce the deflection effect arcs can be powered by three independent sources.

**Materials and Methods:** Methods of numerical simulation were used to study the proposed scheme of power supply of the furnace unit. As a modeling tool, MathCAD software was used.

**Results:** The influence of the new scheme of EAF arc power supply on its technical and economic indicators has been studied. It is shown how, as the arc penetration into the slag varies, its power and efficiency changes. It is proved that with the proposed power supply system of the furnace, the deflecting electromagnetic force and blowing of the arcs in these furnaces are reduced. Energy efficiency of the furnace increases.

**Conclusions:** The studied technical solution can be proposed for industrial realization. The introduction of the proposed EAF feed system will increase the technical and economic efficiency of the steel production process.

**Keywords** — Electric arc furnace; electric arc; furnace transformer; independent power supply of arcs; deflecting electromagnetic force

### I. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Дуговые сталеплавильные печи являются чрезвычайно энергоемкими установками. Они работают на трехфазном

токе частотой 50 Гц. Электроды зажаты в бронзовых или стальных электрододержателях, рукава которых закреплены на стойках, могущих перемещаться вверх и вниз в направляющих при помощи электродвигателей или

гидравлических механизмов. Ток подводится к электрододержателям от специального трехфазного понижающего трансформатора с помощью медных шин, трубошин и гибких кабелей. Дуги горят между концами электродов и металлом ванны, который электрически является нулем трехфазной звезды нагрузки.

Под действием высокой температуры электрической дуги шихта плавится сначала под электродами, жидкий металл стекает вниз и накапливается в центральной части подины. Постепенно происходит полное расплавление шихты. Для ускорения плавления куски переплавленной шихты с отковок печи сталкивают в зону электрических дуг.

В столбе дуги напряжение пропорционально длине дуги, градиент потенциала постоянен по длине дуги. Для токов свыше 300 А напряжение на дуге  $U_d$  определяется по выражению:

$$U_d = \frac{\gamma + \delta \cdot l_d}{I_d} \quad (1)$$

где  $l_d$  -длина дуги, мм;  $\gamma$ ,  $\delta$  – определяемые экспериментально постоянные, зависящие от состава газа, электродов.

При преобразовании электрической энергии в тепловую в дугах сталеплавильной печи присутствуют все три фактора, вызывающие интенсивное излучение дуг: 1) высокие плотности тока при силе тока в дугах в десятки килоампер; 2) дуги горят в парах металлов; 3) при протекании переменных токов в десятки кА столб дуги испытывает значительные электромагнитные давления. В дугах сталеплавильных печей имеет место приближение распределения излучения по спектру к распределению энергии в черном теле. По данным [1], в печной дуге только 10-15 % мощности выделяется в приэлектродных областях, а 85-90 % электрической мощности преобразуется в столбе в поток излучения. Дуга излучает тепло по всей поверхности ванны, на поверхности футеровки и водоохлаждаемых панелей стен и свода.

В трехфазных ДСП на дуги действуют две электромагнитные силы - осевая и отклоняющая [1]. Осевая электромагнитная сила оказывает положительное влияние на технико-экономические показатели работы печей. Под ее воздействием дуга углубляется в металл и шлак и полезная мощность дуги увеличивается. Отклоняющая электромагнитная сила оказывает отрицательное влияние на технико-экономические показатели. Под ее воздействием дуга выбрасывается из углубления в металле и шлаке, ее излучение на стены, свод, газ, заполняющий свободное пространство, увеличивается, а полезная мощность, усваиваемая металлом, уменьшается. Таким образом, влияние отклоняющей электромагнитной силы оказывает отрицательное влияние на эффективность работы печи. Для уменьшения отклоняющей электромагнитной силы и сохранения осевой электромагнитной силы возможно использование независимого питания дуг [2, 3].

## II. СХЕМА РАЗДЕЛЬНОГО ПИТАНИЯ ДУГ В ДСП

В этом случае схема электропитания печи будет выглядеть следующим образом (рис.1). Здесь изображена схема электропечной установки (ЭПУ) с независимым

питанием дуг от трех независимых источников. Отличие схемы дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока с независимым током дуг (ДСПНТ) от стандартной схемы дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока в том, что в такой печи вторичные обмотки трансформатора не соединены по схеме «треугольник на шинном мосту» (или треугольник на гибких кабелях; треугольник на электродах и др.) и создают не трехфазную систему, а три независимых однофазных системы питания дуг.

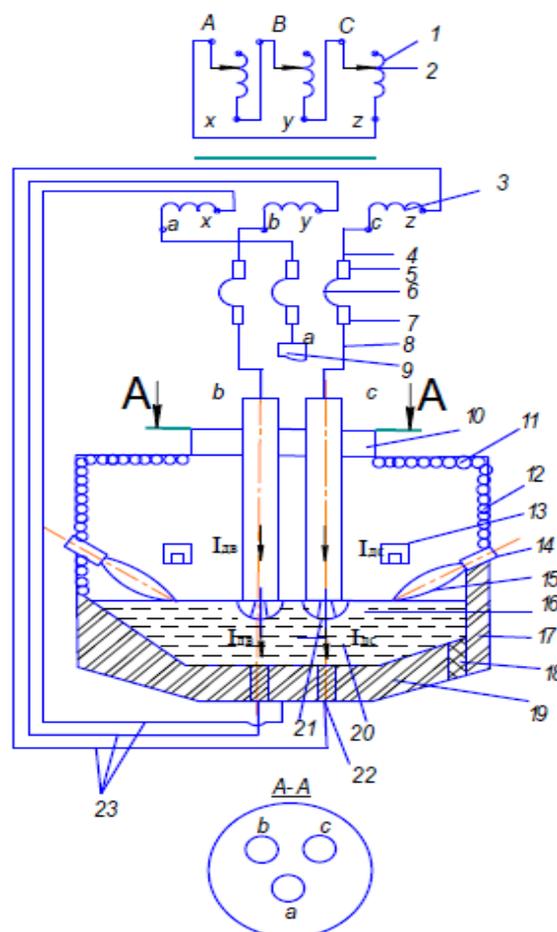


Рис.1. Схема ДСП с независимым питанием дуг: 1-первичные обмотки ЭПТ, 2 переключатель ступеней напряжения, 3-вторичные обмотки ЭПТ ,4-шинный мост, 5-неподвижные башмаки ,6-гибкие кабели , 7-подвижные башмаки , 8-трубошины, 9-электроды ,10-свод печи,11,12-водоохлаждаемые панели ,13- инжекционные устройства, 14-топливно-кислородные горелки, 15-высокотемпературный факел , 16-стены печи,17- донный выпуск ,18- футерованной под , 19- жидкий металл ,20- подовый электрод , 21-электрическая дуга, 22- подовый токоподвод

Начала вторичных фазных обмоток трансформатора а, b, с соединены через короткую сеть с дугами соответственно фаз а, b, с, концы вторичных фазных обмоток трансформатора соответственно х, у, z соединены через подовый токоподвод с соответствующими подовыми электродами. Такая схема соединений вторичных обмоток трехфазного трансформатора с дугами равносильна питанию трех дуг от трех независимых однофазных трансформаторов. Ток от вывода начала фазной вторичной обмотки b трансформатора идет по шинному мосту, неподвижным башмакам, гибким кабелям, подвижным башмакам, трубошинам, электроду фазы b, дуге фазы b, вертикально по ванне металла, проходит подовый электрод 22 фазы b,

идет по подовому токоподводу 23 своей фазы на вывод конца фазной вторичной обмотки у трансформатора, создавая замкнутую цепь. Другого пути на другие фазы у тока фазы b нет. Аналогично протекают токи других двух фаз - a, c. Подовые электроды могут быть выполнены из токопроводящих огнеупоров или стержневого типа со стальной верхней и медной нижней водоохлаждаемой частями [2].

Таким образом, ток каждой фазы, протекая по ванне металла, сохраняет свое вертикальное направление, условий для возникновения отклоняющей электромагнитной силы нет, и она в ДСПНТ отсутствует. Осевая сила, действующая на зеркало жидкометаллической ванны, сохраняется, и дуга погружается в углубление в ванне, ее излучение в внутриванное пространство, заполненное газом, и на водоохлаждаемые панели стен и свода, потери мощности уменьшаются, КПД дуги увеличивается.

Для доказательства эффективности работы дуговой сталеплавильной печи с независимым током дуг, в [1,3] были проанализированы схемы замещения электропечных установок ДСПТТ и ДСПНТ (рис. 2). При питании дуг от трех независимых источников по схеме, изображенной на рис. 2, токи дуг каждой фазы протекают по проводникам и нагрузке только своей фазы. Таким образом каждая фаза, дуга работают автономно, независимо друг от друга, ток от одной фазы к другой по ванне металла горизонтально не проходит, отсутствуют отклоняющая сила и электромагнитное выдувание дуги.

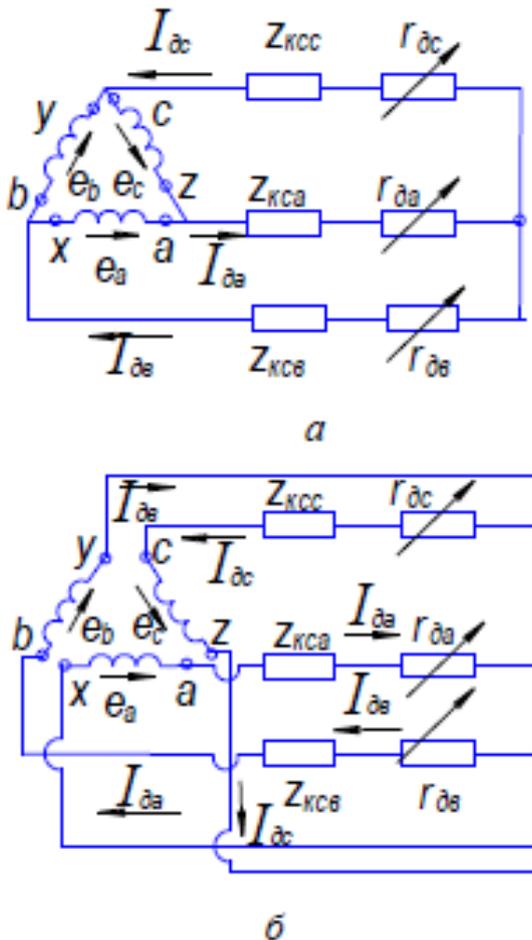


Рис.3. Схема замещения дуговой сталеплавильной печи: а- трехфазного тока стандартная , б- с независимым током дуг.

В момент времени  $t_1$  через дугу фазы a  $r_{да}$  протекают токи фаз a, b, c; через дугу фазы b  $r_{дв}$  протекают токи фаз a, b; через дугу фазы c протекает ток фазы c. Аналогично для момента времени  $t_2$  через дугу фазы b  $r_{дв}$  будут протекать токи фаз b, c, a; через дугу фазы c протекают токи фаз b, c; через дугу фазы a протечет ток фазы a. Таким образом, ток дуги каждой фазы зависит от сопротивления дуг двух других фаз, что подтверждается работой автоматического регулятора дуги в период расплавления шихты: при обрыве или коротком замыкании дуги в одной из фаз в вертикальное перемещение переходят все три электрода, несмотря на то что в двух других фазах нарушений электрического режима не было. В схеме рис. 3, а токи дуг между фазами a, b, c проходят по ванне металла, т.е. их направление с вертикального меняется на горизонтальное, возникает отклоняющая сила  $F_2$  и электромагнитное выдувание, снижающее КПД дуги.

При питании дуг от трех независимых источников по схеме, изображенной на рис. 3,б, токи дуг каждой фазы протекают по проводникам и нагрузке только своей фазы. В момент времени  $t_1$  ток от выводов ЭПТ (начало фазы a) протекает по короткой сети  $Z_{кса}$  фазы a, дуге  $r_{да}$ , вертикально по ванне металла, подовому электроду, подовому токоподводу фазы a и замыкается на выводах ЭПТ (конец фазы x). Так как потенциалы выводов ЭПТ концов фаз y, z больше потенциалов выводов ЭПТ начала фаз b, c, то ток в фазе b течет по пути: подовый токоподвод фазы b, подовый электрод фазы b, вертикально по ванне металла, дуга  $r_{дв}$ , короткая сеть  $Z_{кcb}$  фазы b, выводы ЭПТ начало фазы b. В фазе c ток протекает по пути: подовый токоподвод фазы c, подовый электрод фазы c, вертикально по ванне металла, дуга  $r_{дс}$ , короткая сеть  $Z_{кcs}$ , выводы ЭПТ начало фазы c. Ток каждой фазы протекает по короткой сети своей фазы, дуге, вертикально по ванне металла, подовому электроду, подовому токоподводу своей фазы. Таким образом, каждая фаза дуги работают автономно, независимо друг от друга, ток от одной фазы к другой по ванне металла горизонтально не проходит, отсутствуют отклоняющая сила и электромагнитное выдувание дуги.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ КПД ДСПНТ

Было исследовано изменение КПД горения дуги при предложенной схеме питания. Расчеты проводились на примере печи ДСП-100 со следующими параметрами [4,5]: мощность ЭПТ S = 80 МВА, вторичное напряжение  $U_{2л} = 830$  В,  $I_d = 50$  кА,  $U_d = 520$  В,  $l_d = 500$  мм,  $\theta = 45^\circ$ ,  $h_m = 150$  мм,  $h_{ш} = 350$  мм,  $h_3 = 500$  мм, диаметр электрода  $d_3 = 610$  мм, диаметр распада электродов  $d_p = 1400$  мм, диаметр ванны на уровне откосов  $D_m = 5400$  мм. В результате расчетов были получены данные по среднему угловому коэффициенту излучения дуги на металл и КПД дуги:  $\varphi_{дм} = 0,66$ ,  $\eta_d = 0,67$ .

Расчеты показали, что при полностью погруженной в металл и шлак дуге  $h_3 = l_d$  вследствие электромагнитного выдувания 33% мощности дуги излучается в свободное пространство и поглощается внутриваночными газами и водой стеновых и сводовых панелей и уносится из печи в виде потерь. Расчеты показали, что при увеличении высоты шлака на 28% до  $h_{ш} = 450$  мм, при которой  $h_3/l_d = 1,2$  и торец электрода находится на 100 мм ниже уровня шлака, КПД дуги увеличивается на 6%,  $\eta_d = 0,73$ . При  $h_{ш} =$

550 мм  $h_3/l_d = 1,4$ ,  $\eta_d = 0,76$ , при  $h_{ш} = 100$  мм  $h_3/l_d = 0,5$ ,  $\eta_d = 0,51$ . При отсутствии шлака  $h_{ш} = 0$ ,  $h_3/l_d = 0,3$ ,  $\eta_d = 0,47$ .

Результаты расчетов представлены в табл.1

Таблица 1 - Зависимость КПД дуги от высоты слоя шлака в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока

$l_d$ , мм	$h_{ш}$ , мм	$h_3$	$l_3/l_d$	$\eta_d$
500	100	250	0,5	0,51
500	350	500	1,0	0,67
500	450	600	1,2	0,72
500	550	700	1,4	0,76

При отсутствии шлака КПД дуги низкий  $\eta_d = 0,47$ , с ростом высоты шлака КПД дуги увеличивается и принимает предельное значение  $\eta_d = 0,76$  при высоте шлака  $h_{ш} = 550$  мм, оставаясь практически неизменным при дальнейшем увеличении высоты шлака. Таким образом, вследствие выдувания дуги в высокоомощных ДСПТТ достичь КПД дуги выше 0,73–0,76 практически невозможно так как дуга выбрасывает из углубления шлак, металл и выходит в конце полупериода протекания тока на поверхность жидкометаллической ванны, излучая 24–27% своей мощности в объем печи, заполненный газом и на водоохлаждаемые панели стен и свода.

Таким образом, под действием отклоняющей электромагнитной силы дуга выдувается из-под электрода в сторону водоохлаждаемых панелей стен, экранирующее действие углубления в металле и шлаке снижается, увеличиваются тепловые потери излучения дуги, поглощаемые и уносимые из печи газом и охлаждающей водой.

При высоте шлака в высокоомощных дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока  $h_{ш} = 450-550$  мм можно достичь предельного КПД дуги  $\eta_d = 0,73-0,76$  дальнейшее увеличение высоты шлака не приводит к увеличению КПД дуги и снижению удельного расхода электроэнергии. Большую часть жидкого периода плавки высокоомощные ДСП работают с КПД дуги  $\eta_d = 0,57-0,69$ .

Были рассчитаны КПД дуг для разной высоты заглубления при конструкции печи с независимым питанием дуг.

Для расчета были приняты следующие параметры ДСПНТ:  $S = 80$  МВА,  $U_{2л} = 830$  В,  $I_d = 50$  кА,  $U_d = 520$ В,  $l_d = 500$  мм,  $\theta = 0^\circ$ ,  $h_m = 150$  мм,  $h_{ш} = 0-400$ мм,  $h_3 = h_{ш} + h_m$ .

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Зависимость КПД дуги от высоты слоя шлака в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока

$l_d$ , мм	$h_{ш}$ , мм	$h_3$	$l_3/l_d$	$\eta_d$
500	100	250	0,5	0,74
500	350	500	1,0	0,82
500	450	600	1,2	0,94
500	550	700	1,4	0,97

Результаты расчетов показаны на графиках зависимости КПД дуги от высоты слоя шлака (рис для сравнения КПД дуг типовой ДСП и ДСП с независимым питанием дуг (рис.3).

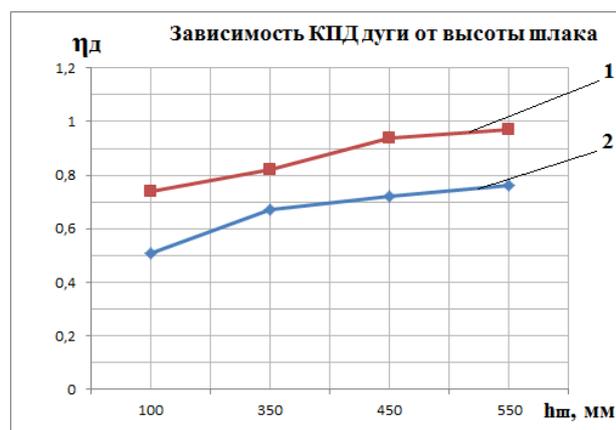


Рис.3. Зависимость КПД дуги от высоты шлака: 1 - КПД дуги дуговой сталеплавильной печи с независимым питанием дуг, 2- КПД дуги дуговой сталеплавильной печи.

Как можно видеть, КПД дуги при независимом питании выше, чем КПД дуги сталеплавильной печи классического типа.

#### IV. ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате моделирования работы ДСП классической конструкции и ДСП с независимым питанием дуг доказано следующее. В ДСП классической конструкции токи дуг каждой фазы проходят по поверхности ванны металла, их направление меняется с вертикального на горизонтальное, вследствие чего возникает отклоняющая электромагнитная сила и выдувание дуги из-под электрода и из углубления в ванне металла. В ДСП с независимым питанием дуг токи дуг не меняют своего направления, протекая вертикально по дугам, ванне металла, подовому электроду, вследствие чего отклоняющая электромагнитная сила и выдувание дуг в этих печах отсутствуют.

Доказано, что независимое питание дуг в ДСП позволяет повысить КПД горения дуг и, следовательно, общую эффективность процесса выплавки металла в печах подобного типа.

#### Список литературы

- [1] Макаров, А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров; Тверь: ТвГТУ, 2012. - 164 с.
- [2] Дуговая сталеплавильная печь трехфазного тока. Электронный ресурс. Точка доступа URL : <http://www.freepatent.ru/patents/2333438>.
- [3] Зацепин, Е. П., Шурыгин Ю. А. Влияние излучения электрической дуги на футеровку стен и свода сталеплавильной печи. / Е.П.Зацепин, Ю.А.Шурыгин // Металлургия, - № 2(16). - 2009. - С.76-81.
- [4] Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей: Справочник / Л. С. Кацевич [и др.]; Под ред. Я. Б. Данциса. - М.: Металлургия, 1974. - 312 с.

Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учеб. пособие / А. Д. Свенчанский [и др.]; Под ред. А. Д. Свенчанского. - М.: Энергоиздат, 1981. - 296 с.

## Установки гарантированного питания статического типа в специальном исполнении

А.Е. Ольховский, И.В. Колесник, Э.Н. Фоминич  
Военный институт (инженерно-технический)  
Санкт-Петербург

*Аннотация* - В докладе рассмотрены особенности систем электроснабжения специальных объектов МО РФ и сформулированы основные требования к надежности и живучести систем автономного электроснабжения современных объектов, оснащенных высокочувствительной микропроцессорной техникой, предъявляющей повышенные требования качеству электроэнергии.

**Результаты:** Проанализированы различные схемные решения и технические характеристики установок гарантированного питания (УГП), позволяющих обеспечивать питание электрооборудования первой категории по надежности электроснабжения. Показано, что, учитывая особенности специальных объектов МО РФ, наиболее перспективными являются установки гарантированного питания статического типа с аккумуляторными источниками питания.

**Выводы:** Рассмотрены принцип действия, схемные и конструктивные решения установки гарантированного питания статического типа в сейсмостойком исполнении, разработанной для специальных объектов МО РФ. Рассмотрены технические решения по электромагнитной совместимости и защите УГП от электромагнитных излучений современного электромагнитного оружия.

*Ключевые слов* - установка гарантированного питания; система автономного электроснабжения; качество электроэнергии, электромагнитная совместимость.

## The static type uninterruptible power supply systems, special version

A.E. Olkhovski<sup>1</sup>, I.V. Kolesnik, E.N. Fominich  
Military Engineering-Technical University  
St Petersburg, Russian Federation

*Annotation* - The report describes features of the systems of power supply of special objects of MOD of RF and main requirements for reliability and survivability of modern facilities of autonomous power systems, equipped with highly sensitive microprocessors, which in turn demand higher electric power quality.

**Results:** In this work different schematics and technical specifications of uninterruptible power supply units (UPS) were analyzed, such UPS allow to provide electrical power of the first category of power supply reliability. It is shown that, taking into consideration the special MOD of RF facilities requirements, the most promising is uninterruptible supply of the static type with battery power sources.

**Conclusions:** The operation principle, schematics and designs of the static type UPS systems in earthquake-resistant design, developed for special objects of the MOD RF, were considered, as well as, technical solutions for electromagnetic compatibility and UPS systems protection modern electromagnetic weapons.

*Key-words* - uninterruptible power supply system; autonomous power supply system; electric power quality, electromagnetic compatibility.

Большинство ответственных потребителей специальных объектов МО для своей нормальной работы требуют не только высокой надежности и бесперебойности электроснабжения, но и высокого качества электроэнергии во всех режимах работы, другими словами гарантированного электроснабжения, гарантирующего высокую надежность, отсутствие перерывов в питании, высокое качество электроэнергии. Гарантированное электроснабжение ответственных потребителей не может быть обеспечено с помощью обычных энергетических средств и требует применения

специальных установок, которые получили название установок гарантированного питания (УГП).

Под установкой гарантированного питания понимают комплексную автоматизированную энергетическую установку, предназначенную для непрерывного питания ответственных потребителей электроэнергией высокого качества во всех возможных режимах, включая перерывы в подаче электроэнергии от основных источников.

Следует подчеркнуть, что для специальных объектов МО характерна тенденция непрерывного повышения доли электроприемников категории IA в общем составе потребителей электроэнергии. Это приводит к

обострению проблемы гарантированного электроснабжения ответственных потребителей, интенсивному развитию систем гарантированного электроснабжения, повышению их установленной и единичной мощности УГП.

В соответствии с требованиями МО РФ для специальных объектов разработана установка гарантированного питания статического типа в сейсмостойком исполнении (УГП СТ СИ). Она предназначена для бесперебойного питания потребителей трехфазным напряжением 380 В (линейное значение) с глухозаземлённой нейтралью, частотой 50 Гц (вторичная сеть) и поддержания параметров напряжения вторичной сети в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.301-98 при параллельной работе с резервными УГП этого типа, подключенным ко вторичной сети. Она обеспечивает контроль параметров на входе при обеспечении питания от внешней сети и в режиме питания от батарей, контролирует выходное напряжение и уровень нагрузки.

Основным отличием данной установки гарантированного питания является двойное преобразование энергии для обеспечения более высокого качества выдаваемой энергии. Питающее переменное напряжение на первом этапе преобразуется в постоянное с амплитудой 200 В. На втором этапе осуществляется увеличение зарядного напряжения до 400 В. Это необходимо для обеспечения отсутствия провала в случае обратного преобразования постоянного напряжения в переменное в момент провалов или пропадания питающего напряжения.

Техническое задание на разработку данной УГП СТ СИ разработано в Военном институте (инженерно-техническом) военной академии материально-технического обеспечения. Специалистами института осуществлялось военно-научное сопровождение ОКР, были разработаны программы и методики проведения испытаний опытных образцов на электромагнитную совместимость, стойкость к сейсмическому действию ядерного взрыва и электромагнитным импульсам современного оружия. На стендах института проведены государственные испытания опытных образцов УГС СТ СИ на сейсмостойкость и электромагнитную совместимость.

В отчете представлены материалы по разработке УГП СТ СИ, в которых автор принимал участие в качестве исполнителя при написании отдельных разделов или соисполнителя при проведении экспериментальных работ, при научном руководстве специалистов кафедры электроснабжения, электрооборудования и автоматики.

Основными требованиями к УГП являются:

- непрерывность электроснабжения ответственных потребителей во всех режимах работы;
- высокая надежность электроснабжения;
- обеспечение высокого качества электроэнергии в нормальных и переходных режимах.

Дополнительным, но принципиально важным требованием, предъявляемым к установкам гарантированного питания, используемым в специальных фортификационных сооружениях, является требование высокой живучести УГП при воздействии современного оружия вероятного противника, в частности стойкость к электромагнитным

излучениям современного оружия и механическому действию ядерных взрывов.

Несмотря на обилие различных конструктивных и схемных решений, сложились некоторые типовые схемы построения источников гарантированного питания. Наиболее перспективными являются УГП переменного тока статического типа с аккумуляторными источниками энергии, выполненные по схеме on-line с двойным преобразованием электроэнергии, которые обеспечивают на питаемых потребителях электроэнергию бесперебойное высококачественное синусоидальное напряжение.

На рис. 1 приведена структурная схема источника гарантированного питания аккумуляторного типа с двойным преобразователем напряжения (on-line).



Рис. 1. Источники гарантированного питания с двойным преобразователем напряжения (on-line)

По данной схеме аккумуляторная батарея постоянно подключена к входу выпрямителя и инвертора и питает последний при аварийном режиме. Диапазон мощностей для данного типа УГП лежит в области 10...100 кВт.

Данная схема построения установки гарантированного питания позволяет обеспечить практически идеальное питание нагрузки при любых неполадках в сети (включая фильтрацию высоковольтных импульсных и электромагнитных помех) и характеризуется нулевым временем переключения в аварийный режим без возникновения переходных процессов на выходе устройства. При этом источник гарантированного питания использует энергию аккумуляторных батарей и выполняет следующие функции:

- поглощение сравнительно малых и кратковременных выбросов напряжения;
- фильтрация питающего напряжения, снижение уровня шумов;
- обеспечение резервного электропитания нагрузки в течение некоторого времени после попадания напряжения сети;
- защита от перегрузок и короткого замыкания.

Для решения задачи обеспечения гарантированного питания в настоящее время представлен широкий спектр устройств с различными параметрами выдаваемой мощности, временем резервирования, быстродействием и надежностью. По эксплуатационным, конструкторским и другим параметрам серийные УГП не удовлетворяют требованиям к условиям функционирования, выдаваемой мощности и быстродействию, предъявляемым к УГП специальных объектов МО. В этом случае появляется необходимость разработки новых устройств, удовлетворяющих предъявляемым высоким требованиям. Наиболее перспективными в настоящее время являются аккумуляторные установки гарантированного питания.

В соответствии с Государственным оборонным заказом на ОКР «Гарант» по техническому заданию МО РФ разработана установка гарантированного питания статического типа в сейсмостойком исполнении (УГП СТ СИ) для обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей первой категории. Технические условия на УГП СТ СИ - ЕИЛВ.656443.001 ТУ.

В соответствии с данными техническими условиями промышленность приступила к выпуску установок гарантированного питания статического типа в специальном исполнении «УГП СТ СИ» на мощности 10 кВт, 20 кВт, 50 кВт и 100 кВт для применения в системах автономного электроснабжения с повышенными требованиями по надежности электроснабжения и качеству вырабатываемой электроэнергии.

Данные УГП СТ СИ предназначены для питания ответственных потребителей трехфазным синусоидальным напряжением 380 В, 50 Гц с глухозаземленной нейтралью и поддержания параметров напряжения вторичной сети с требованиями ГОСТ 27699-88, ГОСТ РВ 20.39. 309-98 для класса аппаратуры 1 по ГОСТ РВ 20.39.304.

Электрическая схема установки приведена на рис. 2. УГП СТ СИ предназначена для обеспечения электроэнергией трехфазных потребителей номинальным напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Она обеспечивает контроль параметров на входе при обеспечении питания от внешней сети и в режиме питания от батарей, контролирует выходное напряжение и уровень нагрузки.

Контроль параметров сети позволяет своевременно реагировать на исчезновение напряжения или отход его величины от установленных границ. УГП СТ СИ обеспечивает время резервного питания, во время которого необходимо выполнить переход на более энергоемкий источник (ДЭС) при 100% нагрузке не менее 15 мин.

Режимы работы УГП:

Основной режим работы УГП СТ СИ – «On-line», который подразделяется на два подрежима:

- нормальный и автономный.

Регламентный режим-ручной «by-pass»

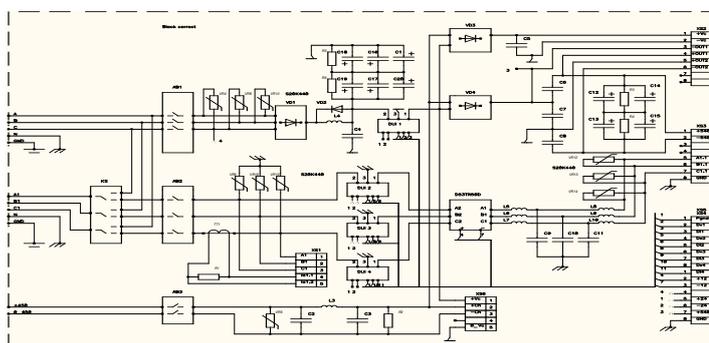


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема установки гарантированного питания УГП СТ СИ

На рис. 3 представлена функциональная схема УГП СТ СИ, где показаны все основные элементы установки.

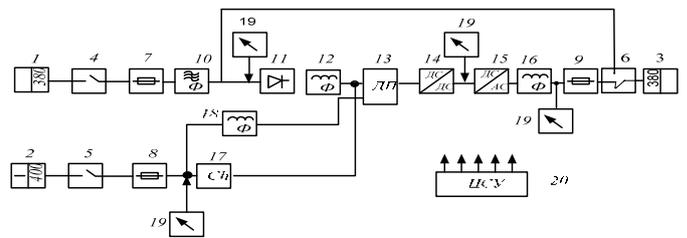


Рис. 3. Функциональная схема УГП СТ СИ:

1 - клеммы входа 380 В 50 Гц 3х фазным напряжением; 2 – клеммы входа-выхода 360... 450 В постоянного напряжения с АБ; 3 – клеммы выхода 380В 50 Гц 3х фазным напряжением; 4 – автоматический выключатель 380 В 50 Гц 3х-фазного напряжения, током 63 А.; 5 – автоматический выключатель 400 В постоянного напряжения током 45 А; 6 - автоматический переключатель 380 В 50 Гц 3х-фазного напряжения; 7, 8, 9, - блоки предохранителей на соответствующее напряжение и токи; 10 – фильтр высокочастотных радиопомех, трехфазный (ФРП); 11 – диодный трехфазный выпрямитель; 12,18 – низкочастотный сглаживающий фильтр; 13 – диодный переключатель; 14 – преобразователи DC/DC; 15 – преобразователи DC/AC; 16 – высокочастотный сглаживающий фильтр; 17 – зарядное устройство; 19 – датчики напряжения и тока; 20 – центральная система управления. Напряжение с выхода внешнего аккумулятора поступает через автоматический выключатель АВЗ на вход дросселя L3, служащего для устранения бросков тока при потреблении энергии от аккумулятора в автономном режиме работы. Входы и выходы дросселя шунтированы емкостями C2 и C3, служащими для устранения выбросов напряжений при коммутации АВЗ. Выход дросселя L3 подключен к первым входам диодного переключателя.

С выхода диодного переключателя VD3 напряжение поступает на вход преобразователя DC/DC. Напряжение с выхода диодного переключателя VD4 поступает на емкостной фильтр C6-C8 и C2-C15, где емкости C6-C8 металлопленочные, работающие в цепи пульсаций входного напряжения, а емкости C12-C15 работающие в цепи постоянного тока. Суммарное значение коэффициента пульсаций с учетом номинального значения выходного сопротивления составляет  $KП = 20$ . Напряжение с выхода фильтра поступает на вход преобразователя DC/AC. Если напряжение на входе модуля выпрямления является номинальным, равным 380В 20%, то ток от аккумуляторной батареи не потребляется, так как выпрямленное напряжение равно 540В, а напряжение максимально заряженной батареи составляет 450В.

Если напряжение на входе модуля выпрямления уменьшается плавно до напряжения менее 280В или скачком до нуля, тогда вторые входы диодного переключателя закрываются, а первые входы открыты потребление энергии происходит от аккумуляторной батареи. Соответственно, в не зависимости от открытия первых или вторых входов диодного переключателя напряжение на преобразователях DC/DC и DC/AC присутствует.

Выходная трехфазная схема работает следующим образом: на вход разъема XS3 поступает трехфазное

напряжение от преобразователя DC/AC. На входе трехфазной схемы установлены «Т» образные «тяжелые» фильтры. Коэффициент сглаживания напряжения составляет около 20. С выхода фильтров напряжение поступает на вход измерения, через твердотельное реле D53. Измерители DUI2, DUI3 и DUI4 измеряют ток и напряжение в соответствующих линиях линейный ток и фазное напряжение в фазах a1, v1 и c1. С выхода напряжения поступает на автомат АВ2 и bypass KS. Автомат осуществляет отключение тока при перегрузках коротких замыканиях и недопустимых снижениях напряжения. Номинальный ток 40А. Bypass KS позволяет осуществлять обход напряжения минуя преобразователь при регламентных работ или выходе из строя УГП. В линии трехфазного напряжения включены трансформаторы тока ТТ1, ТТ2 и ТТ3 для контроля линейного тока и передачи его в блок измерений через разъем XS1. Через данный разъем осуществляется также передача контроля линейного напряжения в линии a1, v1 и c1.

Особенностью данной установки гарантированного питания является двойное преобразование энергии для обеспечения более высокого качества выдаваемой энергии. Питающее переменное напряжение на первом этапе преобразуется в постоянное с амплитудой 200 В. На втором этапе осуществляется увеличение зарядного напряжения до 400 В. Это необходимо для обеспечения отсутствия провала в случае обратного преобразования постоянного напряжения в переменное в момент провалов или пропадания питающего напряжения.



Рис. 4 Общий вид шкафа установки гарантированного питания

УГП СТ СИ работает следующим образом: входное напряжение поступает через автомат 4 и плавкие предохранители на ФРП, который обеспечивает подавление выбросов сетевого напряжения и не позволяет высокочастотной помехе проникнуть в сеть и УГП СТ СИ. Подавление помех не менее 40 dB. Переменное 3х фазное напряжение преобразуется в постоянное, диодным неуправляемым выпрямителем 11. Выходное напряжение с блока 11, образуемое суммой двух составляющих: -

постоянной и переменной сглаживаются LC фильтром 12, через диодный переключатель поступает на преобразователь DC/DC, блок 14.

Конструктивно УГП СТ СИ выполняется в виде шкафов. На рис.4 показан внешний вид шкафа УГП СТ СИ. Шкаф УГП СТ СИ состоит из четырех основных частей:

- блока защиты;
- блока выпрямления и коммутации;
- блока преобразователей;
- блока измерений и индикации.

Шкафы УГП на мощности 10 кВт, 20 кВт, 50 кВт и 100 кВт комплектуется одним типом блоков защиты, блоков выпрямления и коммутации, модулей преобразований и управляющими контроллерами.

Увеличение мощности свыше 50 кВт осуществляется за счет параллельного подключения нескольких шкафов УГП СТ СИ одного типа.

В данном типе УГП СТ СИ предусмотрена защита от мощных токов и напряжений, наводимых электромагнитными импульсами ядерных взрывов. Стойкость, прочность и устойчивость к сейсмоударному воздействию соответствует требованиям, предъявляемым к аппаратуре группы 1.2 по ГОСТ РВ 20.39.304-98. УГП СТ СИ устойчива к сейсмоударному воздействию с амплитудой ударного ускорения 100 (10) м/с<sup>2</sup> (g) при длительности полуволн от 30 мс до 50 мс.

Результаты проведенных предварительных и государственных испытаний на стойкость опытных образцов установки гарантированного питания статического типа в специальном исполнении ЕИЛВ. 301243.001.2 с блоком защиты от воздействия электромагнитных полей, токов и напряжений естественного и искусственного происхождения показали что блок защиты УГП СТ СИ, выполненный на базе разрядника РНВ-0,5Н У1, двух ступеней защиты на базе варисторов Epcos AG В80К440 и помехозащитных фильтров обеспечивают защиту установки гарантированного питания на действие импульсного тока ЭМИ ядерных взрывов и токов молнии с амплитудными значениями тока, установленным техническим заданием.

#### Список литературы

- [1] Коптев А.А «Устойчивость систем электроснабжения в аварийных и чрезвычайных ситуациях: Учебное пособие для ВУЗов», 1994 год, Москва.
- [2] Михайлова А.К. «Установки гарантированного питания статического типа» ВИТУ, СПб, 2003 год.
- [3] Фоминич Э.Н, Ольховский А.Е. Установки гарантированного питания статического типа в специальном исполнении. Научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб, 2016, с. 227- 293.
- [4] Фоминич Э.Н, Ольховский А.Е. Защита установок гарантированного питания статического типа от мощных электромагнитных воздействий источников естественного и искусственного происхождения. Научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях». СПб, 2016, с. 267-272.

# Исследование способа нанесения медного покрытия на подложки с помощью высокоскоростной плазменной струи

Ю.Н. Половинкина, Ю.Л. Шаненкова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Томск, Россия

E-mail: ynp2@tpu.ru

*Аннотация – Проблема совмещения разнородных материалов всегда являлась актуальной. Существует огромное количество способов ее решения, однако все они имеют ряд недостатков: высокая дороговизна, небезопасность и т.д. Плазмодинамический метод – новейшее решение данного рода проблем. Благодаря данной разработке, возможно, совмещать разнородные материалы, например, медь и алюминий, которые наиболее часто применяются в энергетике, для уменьшения потерь электроэнергии в переходных контактных соединениях, путем нанесения меди на алюминиевые контактные поверхности с помощью коаксиального магнетоплазменного ускорителя. В процессе работы ускоритель генерирует высокоскоростную импульсную струю медной электроэрозионной плазмы, которая при высоких скоростях воздействует на поверхность алюминиевой подложки. Была спроектирована и подготовлена установка для определения и расчета удельного переходного контактного сопротивления полученных контактных пар. Представлены результаты, свидетельствующие о возможности совмещения меди и алюминия путем нанесения медного покрытия на алюминиевые подложки плазмодинамическим методом. Предложенный в работе метод позволяет не только совместить медь и алюминий, но снизить переходное контактное сопротивление, тем самым, уменьшая потери электроэнергии в переходных контактах.*

*Ключевые слова — медное покрытие; алюминиевая подложка; коаксиальный магнетоплазменный ускоритель; переходное контактное сопротивление; адгезия.*

## Research of method about the application of the copper coating deposition on the surface using the high-speed plasma jet

Yuliya Polovinkina, Yuliya Shanenkova

Tomsk polytechnic university

Tomsk, Russian Federation

E-mail: ynp2@tpu.ru

*Abstract — The problem of coupling the heterogeneous materials has always been urgent. There are a lot of ways to solve this problem, but all of them have a number of disadvantages such as high costs, insecurity, etc. The plasma dynamic method is considered as the one of up-to-date solutions. This method allows coupling the heterogeneous materials (for example copper and aluminum, which are the most widely-used material in power engineering), in order to reduce energy losses in the transient contact resistance, by depositing copper on the aluminum contact surface using a coaxial magneto plasma accelerator. In process the accelerator generates a high-speed pulse jet of copper electric erosion plasma, which at high speeds affects the surface of aluminum substrate. A special setup was designed and constructed to determine and calculate the specific transient contact resistance of the obtained contact pairs. The obtained results show the possibility of combining copper and aluminum by depositing a copper coating on aluminum substrate using the plasma dynamic method. The proposed method allows not only coupling copper and aluminum, but also reducing the contact resistance, thereby reducing the energy losses in the transient contacts.*

*Keywords — copper coating, aluminum substrate; coaxial magneto plasma accelerator; transient contact resistance; high adhesion.*

### I. ВВЕДЕНИЕ

Электрическим контактом называют такое соединение двух проводников, при котором обеспечивается надежное прохождение электрического тока. Контактные соединения в электрических цепях имеют существенно

важное значение. Электрический контакт должен передавать энергию электрического тока от одного аппарата или прибора к другому без заметных потерь. Контактные присоединения токопроводящей ошиновки к выводам электрооборудования выполняют неразъемными или разъемными и таким образом, чтобы в местах присоединений шины свободно и без напряжения примыкали к контактным выводам [1]. Неразъемные контактные соединения могут осуществляться такими способами, как сварка, литье, пайка, опрессование, обжатие и волочение соединяемых проводников. Такие соединения являются надежными только у проводников из однородных металлов: медь-медь, алюминий-алюминий, сталь-сталь. Неразъемные же соединения медных шин с алюминиевыми осуществляются при помощи медно-алюминиевых переходных пластин.

Величина переходного сопротивления контакта зависит от степени окисления соединяемых контактных поверхностей проводников. Металл контактов взаимодействует с окружающей средой, кислородом, влагой и пр. – в результате образуется пленка окиси, обладающая большим электрическим сопротивлением. К тому же, в соединениях разнородных металлов, к примеру, медь – алюминий, помимо обычного окисления металлов, происходит электрохимическое окисление [2]. В процессе электрохимической коррозии соединяемые друг с другом разнородные металлы в свою очередь образуют пару, в которой возникает электрический ток по законам гальванического элемента. Причем коррозия металла возрастает при наличии влаги или агрессивной окружающей среды.

Существует огромное количество способов совмещения разнородных металлов, таких как медь-алюминий, однако все они имеют ряд недостатков. (высокая дороговизна, небезопасность и т.д.) К примеру, применение биметаллических прокладок ведет к тому, что происходит увеличение числа контактных переходов, что приводит к росту величины переходного контактного сопротивления, ввиду чего возрастают потери электроэнергии. Электропроводящие смазки просты в применении, позволяют увеличить площадь

контактирования материалов и токопередачу, однако не пригодны для многократного использования ввиду резкого ухудшения качества смазки с последующим использованием. Также совмещают разнородные материалы путем нанесения покрытий – наиболее часто используемым в данной области является газодинамический метод. У этого способа есть немало преимуществ, что обуславливает его широкое применение, однако обладает серьезным недостатком – плохой адгезией.

Плазодинамический метод – новейшее решение данного рода проблемы. Благодаря данной разработке, возможно совмещать разнородные материалы, например, медь и алюминий, которые наиболее часто применяются в энергетике, для уменьшения потерь электроэнергии в переходных контактных соединениях, путем нанесения меди на алюминиевые контактные поверхности с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя.

## II. ПРИНЦИП РАБОТЫ КМПУ

Нанесение медных покрытий на алюминиевые поверхности осуществлялось в системе, базовым элементом которого является импульсный высокотокковый коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (рис. 1) [3]. Данное устройство основано на классическом Z-пинч ускорителе (1-5, 7), помещенном во внешнюю индукционную систему (6). Электропитание ускорителя осуществляется от емкостного накопителя энергии со следующими рабочими параметрами зарядное напряжение до  $U_{зар}=5,0$  кВ и емкость конденсаторных батарей до  $C_{зар}=28,8$  мФ. Z-пинч ускоритель состоит из таких частей, как центральный немагнитный металлический электрод (1) с медной вставкой на конце (4), медный электрод-ствол (7), медные токовые проводники (5), изолятор центрального электрода (2) и силовые элементы, которые удерживают эту сборку (3). Z-пинч ускоритель помещается во внешнюю индукционную систему (6), которое необходимо для выравнивания электроэрозионного износа по длине электрода-ствола.

Принцип работы заключается в следующем. В момент

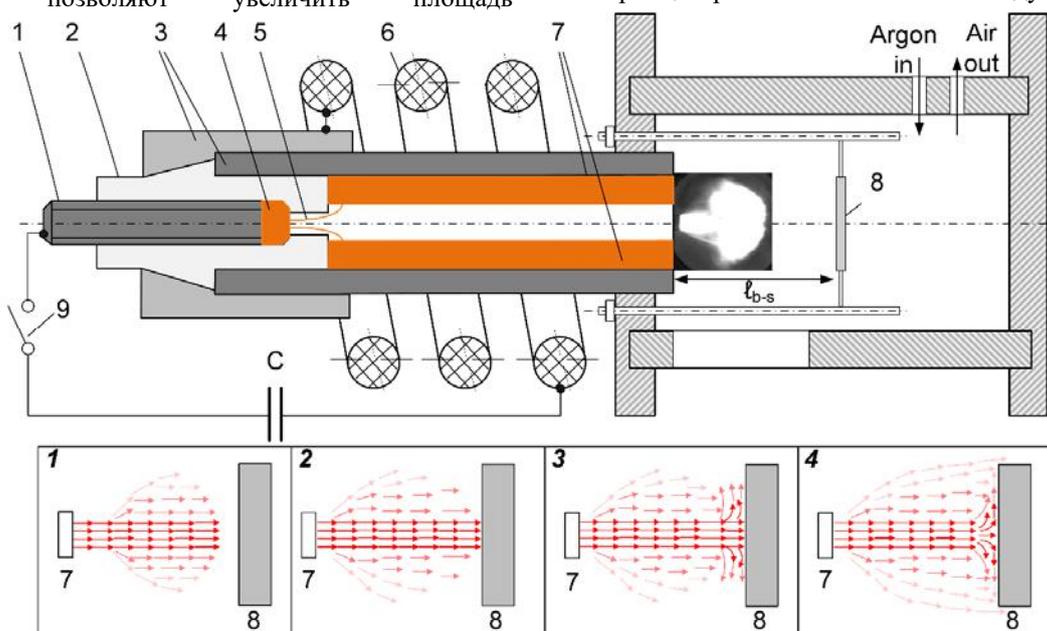


Рис. 1. Схема КМПУ и принцип его работы

замыкания силовых ключей (9) емкостной накопитель энергии С разряжается, ввиду этого в контуре мгновенно возрастает ток, и при достижении некоторого его критического значения  $I_{кр}$  происходит электровзрыв медных проводников (5) с образованием дугового разряда. Образовавшийся дуговой разряд благодаря магнитному полю соленоида (6) вытягивается вдоль электродного ствола (7). При распространении разряда происходит взаимодействие плазменной струи со стенками ускорительного канала, и тем самым осуществляется наработка меди за счет электроэрозионного износа. Затем плазма вылетает из ускорительного канала, попадая в камеру-реактор, в которой предварительно закачан аргон для предотвращения образования оксидов и других соединений. На некотором расстоянии от конца ствола ускорителя устанавливается алюминиевая подложка (8). Поток медь-содержащей плазмы после выхода из ствола взаимодействует с подложкой, образуя на ее поверхности покрытие. На картинках 1-4 (рис.1) показано, как распространяется плазма при выходе из ускорительно канала. Видно, что она имеет форму гриба. Также здесь показан процесс формирования покрытия на подложке. Наибольшее взаимодействие плазмы с подложкой происходит в центре подложки, поэтому покрытие здесь более плотное, и уменьшается при удалении его к границам «мишени».

### III. ПОЛУЧЕНИЕ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Была проведена серия опытов по нанесению медных покрытий на различные алюминиевые поверхности с помощью высокоскоростной импульсной силовоточной плазменной медной струи. Типичные фотографии полученных медных покрытий на алюминиевых подложках представлены на рис. 2. Как видно, покрытия получились достаточно однородными, высококачественными – отсутствуют области без покрытий (что свидетельствует о высокой плотности меди на алюминии), а также места прогаров. Также выяснилось, что данным методом можно получать покрытия с площадью до 200 см<sup>2</sup>.



Рис. 2. Фотографии полученных медных покрытий на алюминиевых подложках и электротехнических изделиях

### IV. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ

Толщина покрытий исследовалась методом оптической металлографической микроскопии, при помощи микроскопа Olympus GX-71. Было установлено, что для всех образцов толщина покрытия варьируется от 50 до 100 мкм. Как видно из рис.3, покрытия, получаемые данным способом, достаточно равномерные, полностью повторяют неровности и изгибы алюминиевой подложки. Это приводит к тому, что видимая граница раздела

отсутствует полностью и таким образом обеспечивается плотное прилегание покрытия.

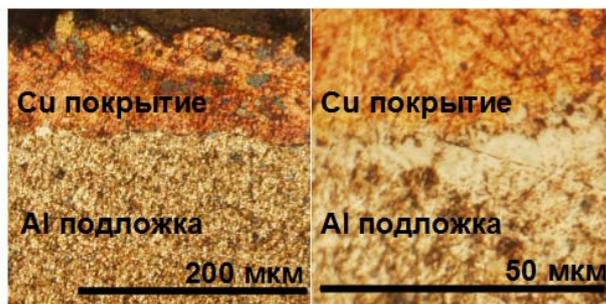


Рис.3. Микрофотографии шлифов поперечного среза образца, полученного при расстоянии до мишени 225 мм

Стоит отметить, что в области соединения покрытия с подложкой, обнаруживается присутствие как частиц меди в подложке, так и частиц алюминия в покрытии. Это подтверждает предположение о взаимном перемешивании материалов в жидкой фазе. Такой механизм формирования покрытий должен положительным образом сказаться на адгезии покрытия и переходном контактом сопротивлении.

### V. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для того чтобы оценить качество полученных покрытий, была подготовлена установка для измерения величин переходных контактных сопротивлений [4] таких пар, как Cu-Cu, Cu-Al, Cu-Al<sub>Cu</sub>, полученных описанным выше методом. Результаты данного исследования представлены на рис. 3. Как установлено, что переходное контактное сопротивление уменьшается при увеличении усилия сжатия. Это происходит вследствие увеличения площади касания контактов за счет смятия выступов, присутствующих на поверхности контактных пар [5].

Также проведенные исследования показали, что при непосредственном соединении меди с алюминием переходное контактное сопротивление приблизительно в 7 раз превышает величину сопротивления, получаемого при соединении меди с медью. Такое соотношение наблюдается при всех исследованных усилиях сжатия.

Стоит отметить, что исследование полученных контактных пар медь-алюминий с медным покрытием показало возможность уменьшения переходного сопротивления вплоть до ~ 2.8 раз относительно непосредственного соединения меди с алюминием при максимальном усилии сжатия.

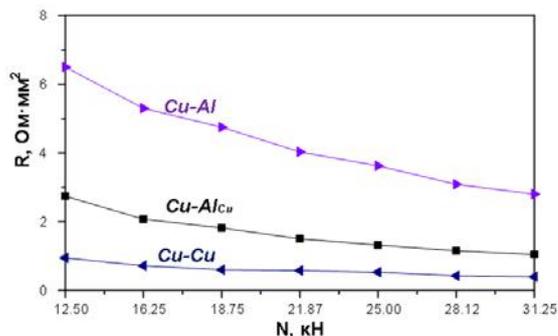


Рис. 4. Зависимость удельного переходного контактного сопротивления от усилия сжатия

Дальнейшее увеличение усилия сжатия может привести к деформации поверхности контактной пары медь-алюминий ввиду того, что данные материалы относятся к мягким и при соединении с большим значением усилия сжатия, данный вид материала деформируется – как следствие, произойдет увеличение переходного сопротивления и ухудшение качества контакта.

## VI. АДГЕЗИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

Адгезия является одним из главных факторов, которые определяют качество полученных покрытий. Этот параметр становится главным для образцов, работающих в условиях с непостоянными нагрузками, в данном случае зависящими от величины протекающего тока. Поэтому полученные образцы должны обладать высокой прочностью сцепления во избежание аварийных ситуаций, которые могут произойти за счет отслаивания покрытия от поверхности.

На рис. 5 показаны кривые изменения параметров при проведении скретч-теста, также SEM-снимок царапины, по которому определялось место, где покрытие отслоилось от подложки.

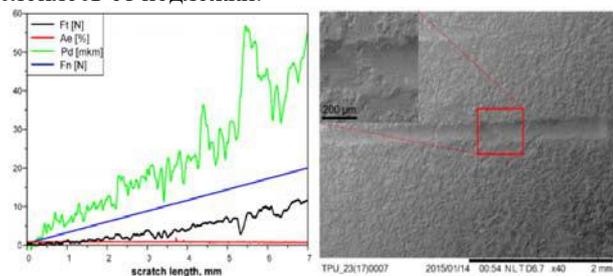


Рис. 5. Результаты скретч-теста: а) полученные кривые; б) SEM снимок царапины

Для определения величины прочности сцепления регистрировались такие параметры, как сила нагрузки на индентор  $F_n$ , сила трения  $F_t$ , глубина проникновения  $P_d$  и акустическая эмиссия  $A_e$  в зависимости от перемещения индентора. Был произведен сравнительный анализ данных о прочности сцепления, полученных при определении ширины царапины по микроснимку и данных о ширине царапины, полученных из расчета регистрируемых характеристик, для оценки возможности определения адгезии без использования микроснимков. Для определения ширины царапины в случае с использованием только результатов, полученных в процессе скретч-теста, необходимо учитывать данные о глубине проникновения индентора и его геометрических параметрах [6].

Для образца первоначально прочность сцепления определялась по микроснимку царапины. Используя SEM-изображение, было определено место, в котором покрытие отошло от подложки. Принимая во внимание ширину царапины 224 мкм и скорость движения индентора 1 мм/мин, была найдена величина плотности сцепления, которая равнялась 2430 МПа. Величина плотности сцепления, найденная по графику проникновения индентора в этой точке, оказалось приблизительно равной 2480 МПа. Как видно из полученных результатов, оба метода дают

приблизительно одинаковые величины и данный метод расчета может рассматриваться как приемлемый для оценки прочности сцепления при проведении скретч-теста. Тем не менее, чтобы уточнить результаты прочности сцепления была рассчитана для 10 произвольных точек графика проникновения. Полученная усредненная величина равнялась 2516 МПа. Небольшие расхождения в оценке результатов скретч-теста предложенными способами, можно объяснить, как погрешностью при определении ширины царапины по микроснимку, так и некоторой математической ошибкой, которая может присутствовать при расчетах. Тем не менее, оба результата имеют приблизительно одинаковый порядок величин. Стоит отметить, что получающиеся величины прочности сцепления значительно превышают прочность сцепления, достигаемую другими методами напыления меди на алюминий. Так для способа холодного газодинамического напыления эта величина составляет 700 МПа, что значительно меньше результата, полученного в ходе нашего исследования.

## VII. ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В конце хотелось бы отметить, что в работе представлены результаты по совмещению разнородных материалов при помощи установки коаксиального магнитоплазменного ускорителя. Предложенный в работе способ позволяет совместить разнородные материалы и получить покрытия с высоким качеством.

Также было выяснено, что выше описанным способом возможность уменьшить величину удельного переходного контактного сопротивления, что очень важно но и получить покрытия достаточно высокого качества, что подтверждено микроснимками и результатами измерения переходного контактного сопротивления.

## Список литературы

- [1] Масанов, Б.М. Присоединение проводников к контактным выводам электрооборудования. – Москва: Энергия, 1969. – 26 с.
- [2] Комаров А.А., Яковлев В.Н. Электрические контакты. Учебно-методическое пособие по дисциплине “Тяговые и трансформаторные подстанции для студентов специализаций: 101801–“Электроснабжение железных дорог” и 101802–“Компьютерные технологии в электроснабжении”.–Самара: СамИИТ, 2001.-51 с.
- [3] Половинкина Ю. Н., Шаненкова Ю. Л., Сайгаш А.С. Нанесение медного покрытия на алюминиевые поверхности с высокой прочностью сцепления // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 26-29 апреля 2016 г.: в 7 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1: Физика. — С. 229-231.
- [4] Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С., Сивков А.А. Использование коаксиального магнитоплазменного ускорителя для нанесения медного покрытия на алюминиевую поверхность // Приборы. – 2005. – № 6. – С. 33.
- [5] Сивков А.А., Сайгаш А.С., Колганова Ю.Л. Влияние свойств медного покрытия на алюминиевой контактной поверхности на переходное сопротивление // Электротехника. — 2013. — № 8. — С. 11-14.
- [6] Лотков А.И., Мейснер Л.Л., Сергеев В.П., Прозорова Г.В., Нейман А.А., Дементьева М.Г. Адгезионная прочность и физико-химические свойства покрытий из молибдена и тантала для никелида титана // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 5. – С. 26-31.

# Устройство мониторинга нагрузки и интеллектуального контроля «УМНИК»

С.А. Ложкин, Д.И.Близнюк, П.Ю. Банных, В.О. Самойленко, А.В. Паздерин  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
Екатеринбург, Россия  
E-mail: SemLozhkin@gmail.com

*Аннотация* — В настоящее время в мире существует ряд систем и сервисов, осуществляющих мониторинг и управление нагрузкой бытовых потребителей. Их применение актуально для решения задач уменьшения потерь в сети, повышения энергоэффективности потребителей и снижения их затрат на электроэнергию. Однако не существует системы, эффективно работающей в реалиях отечественного рынка электроэнергии и мощности. Авторами разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять интеллектуальное управление нагрузкой и предоставлять информацию по энергопотреблению. Разработанный комплекс, обладает функционалом «умного дома», а также промышленной стойкостью, надежностью и ресурсом. На основании статистики энергопотребления комплекс позволяет выработать рекомендации по выбору оптимальной ценовой категории. Кроме того, комплекс позволяет оптимизировать режимы работы потребителей под текущую ценовую категорию. Внедрение систем интеллектуального управления нагрузкой является выгодным как для потребителя, так и для сетевой компании.

*Ключевые слова* — Умный дом, управление нагрузкой, оптимизация потребления электроэнергии.

## Device for monitoring loading and intellectual control "UMNIK"

S.A. Lozhkin<sup>1</sup>, D.I. Bliznyuk<sup>1</sup>, P.Y. Bannykh<sup>1</sup>, V.O. Samoylenko<sup>1</sup>, A.V. Pazderin<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
E-mail: SemLozhkin@gmail.com

*Abstract* — Nowadays there are a number of system and services in the world that that give the opportunity to demand-side management. Their application is actual for solving the problems of reducing losses in the network, increasing the energy efficiency of consumers and reducing their energy costs. However, there is no system that effectively operates in the realities of the Russian electricity and capacity market. A software and hardware complex was developed that allows for demand-side management and information on energy consumption. The developed complex possesses the functionality of the "smart house", as well as the industrial stability, reliability and resource. Based on the energy consumption statistics, the complex makes it possible to develop recommendations for choosing the optimal price category. In addition, the complex allows to optimize the operating modes of consumers under the current price category. The adoption of demand-side management systems is beneficial both for the consumer and for the grid company.

*Keywords* — Smart House, demand-side management, electricity consumption optimization

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество систем и сервисов, целью которых является снижение издержек потребителя на оплату электроэнергии. Можно выделить следующие категории систем:

- системы, осуществляющие мониторинг и визуализацию данных об электропотреблении [1]. Это системы, устанавливаемые в доме на вводном щитке, и предоставляющие информацию потребителю с помощью веб-интерфейса или мобильного приложения;
- системы, которые помимо мониторинга могут осуществлять и управление нагрузкой путём интеграции в систему «умный дом», реализуя оптимальную стратегию энергопотребления, минимизирующую издержки на оплату электроэнергии [2,3];
- веб-сервисы, позволяющие получать статистику потребления с сайтов энергетических компаний (или принадлежащие энергетическим компаниям) и позволяющие анализировать электропотребление пользователя, выработать советы по его снижению и, в ряде случаев, уведомлять его о переходе в зону повышенных тарифов [4,5];

- информационные интернет-ресурсы предоставляющие в различном виде информацию о способах снижения издержек потребителя на электроэнергию [6].

Цель многочисленных иностранных проектов - прежде всего, энергосбережение, т.е. абсолютное снижение электропотребления, а не энергоэффективность, предполагающую рациональный уровень энергопотребления при обоснованном уровне затрат. Многочисленные иностранные проекты не учитывают интересы сетевых компаний. Для преодоления этих недостатков было разработано устройство мониторинга нагрузки и интеллектуального контроля «УМНИК».

Разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет объединять в себе ряд функциональных возможностей зарубежных систем, о которых будет написано далее. Помимо этого, важным отличием от аналогов является адаптация системы под отечественный розничный рынок электроэнергии.

«УМНИК» необходим для создания возможности подключения потребителя к интеллектуальной электроэнергетической системе, для преобразования «обычного» потребителя в «умного» потребителя – активного элемента сетей нового поколения. «УМНИК» предназначен для интеллектуального управления электропотреблением, информационного взаимодействия между электросетевой компанией и потребителем, сбора и анализа статистики потребления, представления в наглядном виде показателей работы электрооборудования потребителя, повышения его осведомлённости в части возможностей эффективного использования электроэнергии и снижения затрат.

## II. ОПИСАНИЕ «УМНИКА»

### A. Функции

В результате анализа существующих разработок и потребностей российского рынка электроэнергетики были выделены основные функции комплекса, реализация которых наиболее актуальна:

- измерение текущих электрических параметров на отдельных группах нагрузок и на вводе;
- сбор и накопление технологических показателей потребителя, в частности статистики его энергопотребления;
- расчет финансовых обязательств перед энергосбытовой компанией в суточной (месячной) ретроспективе(динамике) на основе действующей тарифной системы;
- выработка рекомендаций по выбору оптимальной для данного потребителя ценовой категории и сбытовой компании на основе анализа поведения его нагрузки;
- выработка рекомендаций по оптимальной, с точки зрения энергоэффективности, стратегии использования электрических устройств потребителем;
- управление производительностью и коммутация электрических устройств потребителя с целью

реализации оптимальной стратегии потребления электроэнергии, а также при аварийных ситуациях в энергосистеме, требующих отключения наименее ответственных нагрузок;

- представление потребителю в наглядном виде всей получаемой в «УМНИКе» информации, а также предоставление интерфейса для ручного управления нагрузкой.

*Нижний уровень «УМНИКА»* предназначен для реализации измерений электрических параметров и осуществления управляющих воздействий на нагрузку потребителя. Данный уровень образован:

- измерительными преобразователями, осуществляющими измерение текущих электрических параметров отдельных нагрузок;
- счётчиком электрической энергии, выполняющим базовые измерительные функции и функции коммерческого учёта электроэнергии;
- устройствами управления нагрузкой (выключатели, управляемые розетки, блоки управления производительностью различных устройств);
- другими измерительными устройствами (анализаторы качества электроэнергии и т. п.).

*Средний уровень «УМНИКА»* предназначен для сбора измерительной информации с устройств нижнего уровня, передачи собранной информации на верхний уровень, обработки полученной информации с целью реализации управляющих воздействий на нагрузку потребителя, визуализации данных, а также, в первом варианте, анализа данных. Данный уровень образован головным контроллером, устанавливаемым на вводном распределительном устройстве потребителя и состоит из следующих функциональных блоков.

#### 1) Блок сбора данных

Блок сбора данных предназначен для получения информации с измерительных устройств: счётчика электрической энергии, измерительных преобразователей, устанавливаемых на цепи нагрузки и других измерительных устройств. Полученные данные передаются в блок накопления данных, блок человеко-машинного интерфейса (ЧМИ) и блок обработки данных.

#### 2) Блок накопления данных

Блок накопления данных предназначен для буферизации данных перед их отправкой на верхний уровень. Накопленные данные передаются на верхний уровень с заявленной частотой, либо, в случае отсутствия связи, при первой возможности. В первом варианте блок также отвечает за хранение информации, необходимой для работы блока анализа данных.

#### 3) Блок обработки данных

Блок обработки данных на основе измерений, текущих ценовых показателей применяемого тарифа и пользовательских настроек реализует управляющие воздействия на нагрузку, позволяющие снизить затраты потребителя на электроэнергию. В случае наличия собственных источников энергии у потребителя (установки малой генерации, аккумуляторные батареи) блок позволяет выполнить переключения нагрузки с сети на собственные источники.

#### 4) Блок выработки и реализации управляющих воздействий (УВ)

Блок выработки УВ предназначен для формирования и передачи команд, в соответствующем формате, нагрузкам и переключателям источников питания. Команды инициируются либо блоком обработки данных, либо командами пользователя, отданными с помощью ЧМИ.

#### 5) Блок человеко-машинного интерфейса (ЧМИ)

Блок ЧМИ предназначен для представления собранной в «УМНИКе» информации пользователю в наглядном виде, предоставлении к ней удалённого доступа, заданию пользователем параметров работы комплекса и предоставления интерфейса ручного управления нагрузкой.

#### 6) Модуль связи

Модуль связи предназначен для реализации обмена данными между головным контроллером «УМНИКа», центральным сервером системы и серверами смежных систем. Также через данный модуль осуществляется удалённое взаимодействие пользователя и «УМНИКа» с помощью web-интерфейса.

*Верхний уровень* предназначен для концентрации и архивирования данных с головного контроллера «УМНИКа», а также, во втором варианте, анализа статистики поведения нагрузки потребителя. Данный уровень образован центральным сервером «УМНИКа» и состоит из следующих функциональных блоков.

#### 7) Блок хранения данных

Блок хранения данных агрегирует данные с головных контроллеров, установленных у потребителей. Данная информация используется в дальнейшем для анализа поведения нагрузки потребителя, прогнозирования нагрузки, представления ретроспективных данных пользователю, отправки отчётов в электроснабжающие компании.

#### 8) Блок анализа данных

В данном блоке осуществляется анализ статистики электропотребления различных нагрузок потребителя. Целью этого анализа является выработка рекомендаций о выборе оптимального для данного потребителя тарифа, рекомендаций по выработке оптимальной стратегии поведения потребителя, а также рекомендаций по выбору сбытовой компании. Полученные рекомендации выдаются пользователю через ЧМИ.

### В. Архитектура

В центре архитектуры «УМНИКа» (рисунок 1) – головной контроллер. Он осуществляет сбор информации с измерительных устройств, осуществляет её первичную обработку, реализовывает управляющие воздействия на объекты управления, обменивается данными с центральным сервером.

Источниками измерительной информации являются: счётчик электрической энергии (коммерческий учёт), измерительный преобразователь (технический учёт), климатический датчик и другие устройства, которые могут предоставить значимую для работы «УМНИКа» информацию. Они подключаются по интерфейсу RS-485 (либо CAN или Z-Wave) и могут обмениваться данными по протоколам Modbus RTU, Милур, Меркурий и др.



Рис. 1. Архитектура «УМНИКа»

Таким образом, возможно подключение достаточно широкого круга устройств, поддерживающих стандартные протоколы обмена данными.

«УМНИК» также может осуществлять ручное или автоматическое управление нагрузкой. Существует несколько основных объектов управления. Во-первых, «УМНИК» может выполнить отключение вводного автомата. Во-вторых, при помощи контакторов головной контроллер может осуществлять коммутацию различных цепей нагрузок. Управление контактором и расцепителем вводного автомата осуществляется с помощью специального релейного модуля, подключенного к головному контроллеру по интерфейсу I2C. Отдельные нагрузки, которыми необходимо управлять, могут быть подключены через «умные розетки», коммутируемые дистанционно по протоколам Z-Wave, Noolite и др.

Центральный сервер служит для получения и хранения измерительных данных, их обработки и анализа, реализации пользовательского интерфейса (web-сайта). Он подключен к глобальной сети Интернет, обеспечивая таким образом связь как с пользователем, так и с головным контроллером. Головной контроллер может быть интегрирован в сеть Интернет (таким образом, обеспечив свою связь с центральным сервером)

Преимуществом разработанной архитектуры также является модульность. Все устройства подключены по стандартным интерфейсам и используют стандартные протоколы обмена данными. Головной контроллер поддерживает широкий спектр интерфейсов и протоколов, причём поддержка дополнительных протоколов, при необходимости, может быть реализована программно. Поэтому система может быть легко модернизирована, расширена, компоненты могут быстро заменяться.

### С. Графический интерфейс пользователя

Доступ к графическому интерфейсу осуществляется путем подключения к web-сайту. Web-сайт организован в виде шести функциональных вкладок, эскиз ленты для навигации по вкладкам представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Лента Web-сайта «УМНИКА»

Web-сайт предоставляет пользователю всю информацию об объекте, а так же позволяет осуществлять управление потребителями электроэнергии. Web-сайт структурирован на 6 вкладок, которые соответствуют различным функциональным возможностям, которые будут описаны далее.

На интерактивном плане представлено изображение помещений, которые находятся под контролем «УМНИКА». На плане, эскиз которого представлен на рисунке 3, размещаются интерактивные элементы, которые соответствуют технике, под управлением программно-аппаратного комплекса. С помощью интерактивных элементов осуществляется их управление, а также настройка возможности их автоматического управления.

На интерактивной схеме представлена в графическом виде электрическая схема, которой управляет ПАК. На рисунке 4 представлен эскиз интерактивной схемы, выполненный в прототипе устройства. На схему наносятся источник электрической энергии, потребители в порядке удаления от источника, устройства управления и измерения, а также (условно) соединительные провода. В случае с трехфазными сетями на интерактивную схему соединительные провода наносятся в соответствии с общепринятыми обозначениями: фаза «А» - желтым цветом, фаза «В» - зелёным цветом, фаза «С» - красным цветом. Некоторые элементы схемы являются интерактивными. Иконки автоматов и умные розетки, позволяют осуществлять непосредственное управление потребителями электрической энергии, подключенными к соответствующим коммутационным аппаратам. На иконках счетчиков можно видеть измерения от счетчика и измерительных преобразователей, кроме того есть возможность отображения параметров качества электроэнергии, которые дорассчитываются на основании измерений.



Рис. 3. Интерактивный план

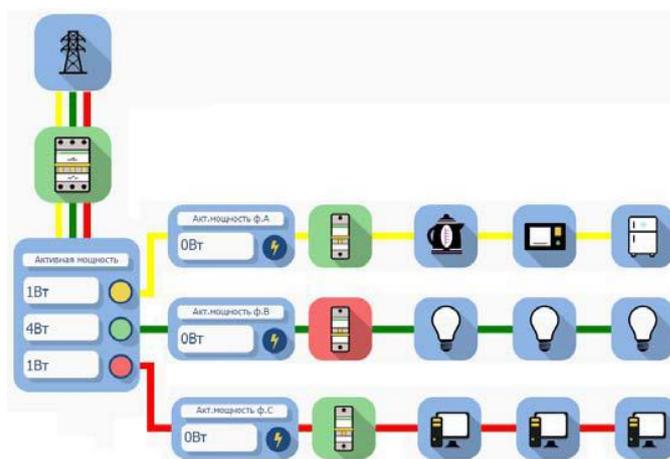


Рис. 4. Интерактивная схема

На вкладке по тарифам представлена информация по текущему тарифу, а также рекомендуемый тариф, который определяет «УМНИК» на основании собранных статистических данных. На вкладке по защитами и автоматике представлена информация по защитами, реализованным в устройстве (защита от снижения и повышения напряжения, защита от перегрузки), а также представлен графический интерфейс для их настройки. Вкладка режим предоставляет информацию по оптимизации режима энергопотребления в рамках текущего тарифа. Советы по оптимизации режима выдаются на основании собранных статистических данных, важности потребителя и текущего тарифа. Вкладка архив предоставляет доступ ко всем данным за желаемый промежуток времени.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять интеллектуальное управление нагрузкой и предоставлять информацию по энергопотреблению. Зарубежные аналоги для домашних систем в отличии от разработанного программно-аппаратного комплекса не обладают промышленной стойкостью, надежностью и ресурсом. На основании статистики энергопотребления комплекс позволяет выработать рекомендации по выбору оптимальной ценовой категории для розничного рынка электроэнергии. Кроме того, комплекс позволяет оптимизировать режимы работы потребителей под текущую ценовую категорию.

### Список литературы

- [1] Neurio. Режим доступа: <http://neur.io/>
- [2] Energy@home Technical Specification. Режим доступа: [http://www.energy-home.it/Documents/Technical%20Specifications/E@h\\_Specification\\_2\\_1.pdf](http://www.energy-home.it/Documents/Technical%20Specifications/E@h_Specification_2_1.pdf)
- [3] Energy@home Use Cases. Режим доступа: [http://www.energy-home.it/Documents/Technical%20Specifications/Energy@home%20Use%20Cases\\_v3\\_0.pdf](http://www.energy-home.it/Documents/Technical%20Specifications/Energy@home%20Use%20Cases_v3_0.pdf)
- [4] MyEnergy. Режим доступа: <https://www.myenergy.com/>
- [5] Save energy and money – веб-сайт PG&E. Режим доступа: <http://www.pge.com/en/myhome/saveenergymoney/index.page?>
- [6] Energy Control. Режим доступа: <http://www.energycontrol.co.uk/>

# Анализ производства тепловой и электрической энергии энергетическими предприятиями Самарской области

Л.А. Сагитова, А.Г. Салов  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Самара, Россия  
E-mail: 10410@mail.ru

*Аннотация* — после 1990 г. энергоэффективность производства тепловой и электрической энергии энергосистемы Самарской области снизилась более чем на 40%. Это объясняется тем, что снизилось промышленное производство в области, и тем, что постоянная во времени промышленная паровая нагрузка энергетических предприятий заместилась сезонной тепловой нагрузкой в виде горячей воды на отопление и горячее водоснабжение. Проведенный анализ выработки энергии предприятиями области за период с 1990 по 2015гг. показал, что оборудование работает в нерасчетных режимах с пониженными показателями эффективности и с повышенными затратами на собственные нужды вспомогательного оборудования.

*Ключевые слова* — комбинированная выработка энергии, собственные нужды, эффективность выработки, регулируемый привод.

## Analysis of the heat and electrical energy production by power enterprises in the Samara Region

L.A Sagitova, A.G. Salov  
Samara State Technical University  
Samara, Russian Federation  
E-mail: 10410@mail.ru

*Abstract* — After 1990 energy efficiency of the heat and electrical energy production in the energy system of the Samara region decreased by more than 40%. This is due to the fact that the industrial production in the region has decreased and the fact that the constant industrial steam load of energy enterprises has been replaced by a seasonal heat load in the form of hot water for heating and hot water supply. The conducted analysis of energy production by the regional enterprises for the period from 1990 to 2015 showed that the equipment operates in off-design modes with reduced efficiency indicators and with increased costs for own needs of support hardware.

*Keywords* — combined heat and power, auxiliaries, efficiency of energy generation, adjustable speed drive.

### I. ВВЕДЕНИЕ

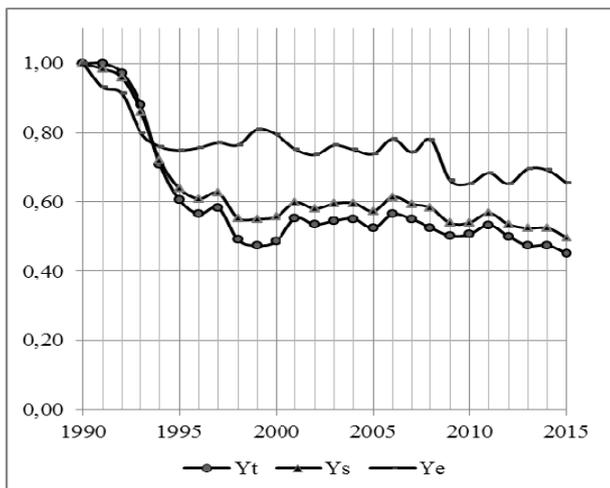
Переход экономики Российской Федерации на рыночные отношения, начавшийся после 1990 года, привел к значительному снижению эффективности производства и транспорта тепловой и электрической энергии не только в целом по стране, но и в одной из промышленно развитых областей – Самарской.

С целью выявления основных причин снижения эффективности производства тепловой и электрической энергии, проведём анализ деятельности энергосистемы в период с 1990 по 2015 годы и сформулируем возможные направления снижения энергетических затрат на их производство.

### II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Перестройка началась с отмены государственных заказов всем отраслям промышленности. Это привело к резкому ухудшению экономического состояния многих предприятий целевого назначения – военно-промышленного, космического, машиностроительного и т.д. Таких предприятий на 1990 год в Самарском регионе насчитывалось достаточное количество.

За четыре года после начала перестройки потребление тепловой и электрической энергии в регионе снизилось более чем на 20% (рис. 1).



Энергосистема 1990-2015 гг.: Yt – отпуск тепловой энергии, Ye – отпуск электроэнергии (млн ГДж)

Рис. 1. Графики изменения производства энергосистемой суммарной тепловой энергии, тепловой и электрической энергии с момента начала перестройки до конца 2015 года.

Часть крупных промышленных предприятий, являвшихся основными потребителями Самарской энергосистемы, прекратили свое существование.

Другая часть предприятий в процессе перехода на выпуск товаров народного потребления уменьшило свое производство в несколько раз.

Третья часть предприятий, принадлежащих нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленностям отказалось от услуг энергосистемы области, построив свои тепловые источники.

Это были предприятия, потребляющие большое количество тепловой энергии на свои технологические нужды.

В таблице 1 приведены статистические данные по производству суммарной энергии в 1990 году и после 1996 года.

Анализ приведённых результатов показывает, что производство тепловой и электрической энергии после 1996 года в целом снизилось на 44%.

Таблица 1. СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭНЕРГОСИСТЕМОЙ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

Наименование	1990 г.	После 1996-г.
Суммарная нагрузка, %	100	56
Потери %	2	2
Горячая вода %	32,5	42,1
Технологический пар %	43,5	25,9
Электроэнергия %	16	18
Собственные нужды %	6	13

Соотношение между выработкой тепловой и электрической энергией в 1990 году составляло – 76% тепловой энергии и 22% электрической, включая 6% затраты на собственные нужды, плюс 2% внутростанционных потерь.

Соотношения между выработкой тепловой и электрической энергией составляли: 76% -тепловая и 22% - электрическая. На тот период это соотношение было оптимальным с точки зрения затрат топливных ресурсов на производство тепловой и электрической энергии.

Теплоэлектроцентральный может производить тепловую энергию в виде промышленного пара, идущего на технологические нужды промышленных предприятий, и в виде горячей воды, идущей на нужды отопления и горячего водоснабжения жилого сектора и объектов коммунального хозяйства.

С точки зрения экономичности производства для ТЭЦ предпочтительной является производство тепловой энергии в виде промышленного пара, поскольку эта нагрузка является постоянной в течение года.

В 1990 году из 76% производимой тепловой энергии 43,5% составляла тепловая нагрузка промышленных предприятий и 32,5% тепловая нагрузка, идущая на отопление и горячее водоснабжение.

Такие пропорции в производстве тепловой и электрической энергии, а также в выработке тепловой энергии в виде промышленного пара и тепла, идущего на отопление, на 1990 год соответствовали расчетным, и предприятия энергетики работали на нагрузках, близких к оптимальным. В целом они и проектировались для покрытия таких нагрузок.

С началом перестройки всё изменилось.

За четыре года производство тепловой и электрической энергии в целом по региону снизилось на 44%.

При таком снижении произошли принципиальные изменения как в соотношениях вырабатываемых тепловой и электрической энергии, так и в структуре выработки тепловой энергии.

Выработка тепловой энергии предприятиями энергетики снизилась до 68%, а электрической возросла до 30% [1]

Теплоэлектроцентрали, осуществляющие комбинированную выработку тепловой и электрической энергии, имеют наивысшие экономические показатели только тогда, когда они работают по вынужденному тепловому графику и свободному электрическому.

Как только меняется проектное соотношение в выработке тепловой и электрической энергии в сторону увеличения выработки электрической энергии, так оборудование начинает работать в нерасчетных режимах.

Если при расчётных режимах коэффициент использования топлива (аналог к.п.д. конденсационной станции) на ТЭЦ колеблется в диапазоне 0,55- 0,7 [2], то при работе турбинного оборудования в летнем режиме при конденсационной выработке электрической энергии к.п.д. оборудования не превышает 24%.

Обозначенная ранее причина является существенной, но не главной, поскольку при отказе от конденсационной выработки электрической энергии и переходе на закупку её на ФОРЕМ, проблема не решается.

Принципиальным является то, что произошли существенные изменения в соотношении выработки тепловой и электрической энергии.

Постоянная в течение года тепловая нагрузка в виде промышленного пара, потребляемого предприятиями на свои технологические нужды, в 1990 году составляла 43,5% из 68% всей выработки и только 32, % составляла сезонная тепловая нагрузка в виде горячей воды, идущей на отопление и горячее водоснабжение.

К концу 2010 года постоянная нагрузка в виде промышленного пара уже составляла 25,9%, а сезонная возросла до 42,1% [3].

Это свидетельствует о том, что постоянная тепловая нагрузка энергосистемы заместилась временной.

Нарушение соотношения в выработке двух видов тепловой энергии, которое было заложено при проектировании энергетических предприятий области, привело к необходимости работы энергетического оборудования на нерасчетных режимах.

Отсутствие сбалансированности в производстве тепловой энергии и на её базе электрической или, как говорят в энергетике, снижение комбинированной выработки тепловой и электрической энергии теплоэлектростанциями резко снижают их экономические показатели по выработке энергии.

Эти изменения привели к необходимости работы генерирующего и вспомогательного оборудования в нерасчетных режимах. Анализ режимов работы котельного оборудования в течение года показал, что оно работает с нагрузкой от 80% до 60%.

Исследуем характер изменения основных показателей деятельности энергосистемы в течение года – произведённых тепловой  $Y_t$ , электрической  $Y_e$  энергий представленным на рисунках 2 и 3.

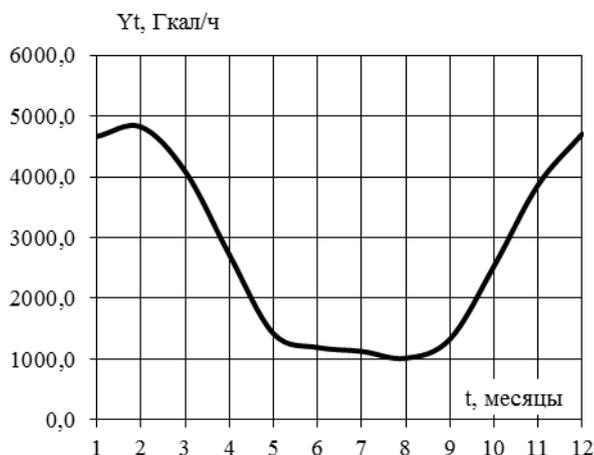


Рис. 2. – Динамика изменения тепловой мощности  $Y_t$ , Гкал/ч;

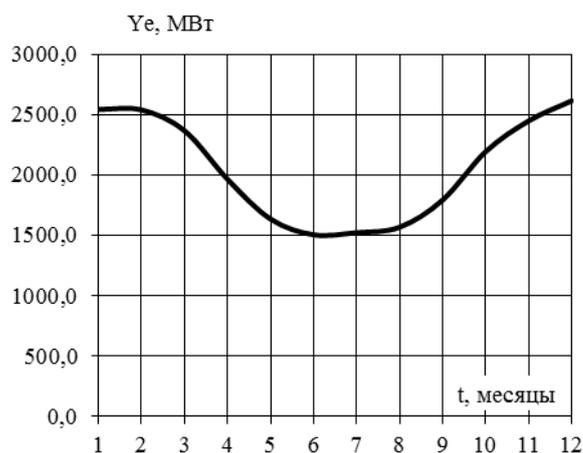


Рис. 3. – Динамика изменения электрической мощности  $Y_e$ , МВт;

Следует отметить идентичность изменения всех показателей. Наибольшие изменения присущи тепловой нагрузке (рисунок 2).

Такой характер изменения объясняется тем, что в структуре тепловой нагрузки практически постоянная в течение года тепловая нагрузка в виде промышленного пара заместилась сезонной отопительной нагрузкой. Поэтому в зимний период наблюдается максимум тепловой нагрузки, а в летний, когда отопительная нагрузка падает до обеспечения потребителей только горячей водой, что составляет около 10% от всей отопительной нагрузки, суммарное производство тепловой энергии снижается до 21% от своего максимума.

При теплофикационной выработке электрической энергии падение производства тепловой энергии приводит к снижению выработки электрической энергии, однако, снижение выработки электрической нагрузки значительно меньше – минимум её производства составляет 43,04 % от максимума.

Падение производства электрической энергии на меньшую величину объясняется тем, что энергосистема является дефицитной по электрической энергии, поэтому ТЭЦ в летний период вырабатывают электрическую энергию в нерасчетных режимах отпуска тепловой энергии или конденсационных режимах. Работа теплофикационного оборудования в конденсационном режиме осуществляется при коэффициентах полезного действия 23-24 %, что приводит к весьма низким экономическим показателям деятельности энергосистемы.

Рациональная загрузка энергетического оборудования позволяет эксплуатировать его с наивысшим, при данной нагрузке, коэффициентом полезного действия, что способствует повышению экономичности производства энергии.

Из-за работы оборудования на переменных режимах работы его надежность снижается, ухудшаются экономические характеристики работы энергетического оборудования, растут затраты энергии на собственные нужды, в целом снижается эффективность выработки тепловой и электрической энергии.

Это обстоятельство подтверждается и постоянным ростом тарифов на тепловую и электрическую энергии.

Изменения в режимах работы основного оборудования существенно сказались на величине собственных нужд энергетических предприятий.

С 1990 года по 2015 затраты на собственные нужды возросли более, чем в 2 раза с 6% [3] до 12%.

На рисунке 2 приведены графики изменения величины собственных нужд энергетических установок от нагрузки конденсационных электростанций, построенные по данным [4]

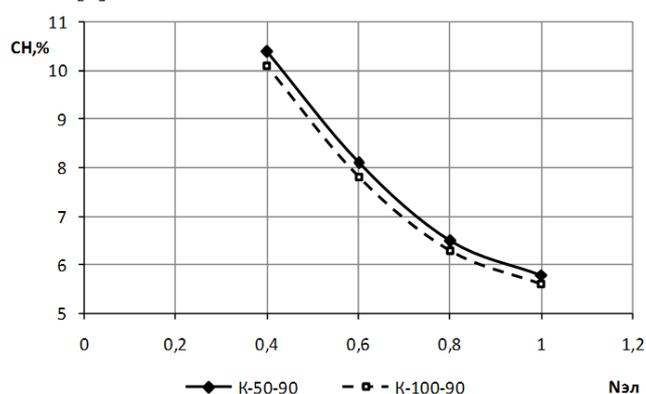


Рис. 4. Динамика изменения величины собственных нужд с изменением мощности работающего оборудования

Мощность основного оборудования этих станций близка к мощности установок ТЭЦ региональной энергосистемы. Приведённые зависимости показывают, что понижение производительности основного оборудования конденсационных станций до 40% повышает относительную величину расхода электрической энергии на собственные нужды почти в два раза.

На рисунке 3 приведена динамика величины собственных нужд одной из ТЭЦ Самарской области.

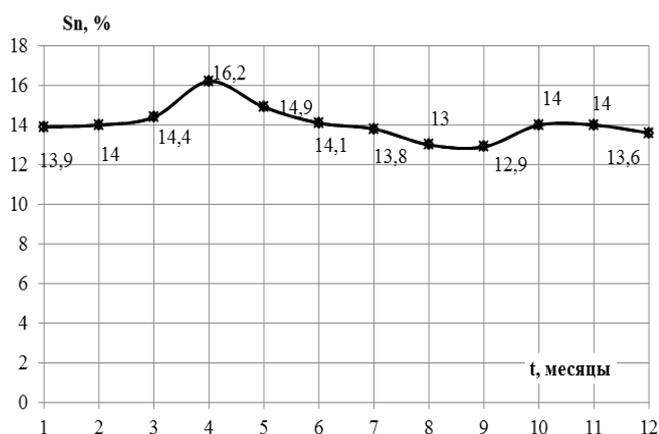


Рис. 5. – Расход электрической энергии на собственные нужды в течение года

Анализ зависимости показывает, что относительная величина расхода электрической энергии на собственные нужды в течение года колеблется в пределах от 16,6 до 12,9% [4].

Характер изменения величины собственных нужд в течение года не соответствует изменениям количества произведенной тепловой, электрической и суммарной энергий.

В работе [5] показано, что при существующих методах регулирования производительности вспомогательных механизмов затраты на собственные нужды с уменьшением нагрузки основного оборудования снижаются не пропорционально снижению его производительности.

Проведенный выше анализ позволяет сформулировать возможные направления повышения энергоэффективности производства тепловой и электрической энергии в Самарской области.

### III. ВЫВОДЫ

1. Оборудование энергетических предприятий имеет физический и моральный износ более 85%.

При замене оборудования предприятий энергетики необходимо учитывать сложившиеся на настоящий момент тепловые и электрические нагрузки и перспективы их роста на ближайшие 20-40 лет.

2. Администрация области должна принимать активное участие в создании промышленных потребителей тепловой энергии, стимулируя промышленные предприятия, создаваемые в регионе на потребление тепловой энергии существующей предприятий, а не на строительство собственных источников энергии.

3. Для повышения энергоэффективности производства энергии необходимо снижать затраты на собственные нужды, внедряя регулируемый электропривод.

### Список литературы

- [1] Дилигенский Н.В., Салов А.Г., Гаврилова А.А., Гаврилов В.К. Модельный анализ эффективности совместного производства тепловой и электрической энергии региональной энергосистемой. Известия вузов. Северокавказский регион. Технические науки, 2008, №5, с.37-40.
- [2] Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции, – М. Энергоатомиздат. 1987. – 328 с.
- [3] Дилигенский Н.В., Абакумов А.М., Салов А.Г., Гаврилова А.А. Комплексный анализ режимов работы энергетического оборудования и затрат электрической энергии на собственные нужды. //В сб.: Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики и пути их решения: Труды международной научной конференции. / Саратовский научный центр РАН; СГТУ. – Саратов., 2008 – с.14-20.
- [4] Теплотехнический справочник / под ред. В.Н.Юренева и П.Д. Лебедева в 2-х т. Т.1 М.: Энергия, 1975. - 744 с.
- [5] Дилигенский Н.В., Салов А.Г., Гаврилова А.А., Гаврилов В.К. Комплексный анализ режимов работы основного оборудования генерирующих предприятий и расходов электрической энергии на собственные нужды. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2008 – №2 (22). – с.186-195.

# Перспективы развития ферросплавных печей

М.С. Балабанов<sup>1,2</sup> Р.Н. Хамитов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Международная Энергосберегающая Корпорация»  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»  
Омск, Россия

<sup>1</sup>e-mail balabanovms@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail apple\_27@mail.ru

**Аннотация** — В условиях жесткой конкуренции на мировом рынке металлургической промышленности актуальны задачи снижения расхода электроэнергии на тонну продукции, сокращения времени расплава, повышения качества продукции, сокращения экологической нагрузки и приведения показателей качества электроэнергии к нормируемым величинам. Все это требует внедрения академических достижений и новых активно-адаптивных элементов в электрические сети предприятий. Результаты данной работы базируются на имитационном моделировании, а так же результатах замеров качества электроэнергии в узловых точках сети предприятий энерготестерами класса точности А. В качестве инструмента моделирования применялось программное обеспечение DIGSILENT (Германия). Предложены методы повышения КПД ферросплавных печей (кВтч/т) изменением схемы включения потребителей и использованием FACTS-устройств.

**Ключевые слова** — ферросплавные печи, FACTS-устройства, имитационное моделирование.

## Prospects for the development of ferro-plane ovens

Mikhail Balabanov<sup>1,2</sup>, Rustam Khamitov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC "International Energy Saving Corporation"  
Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Omsk State Technical University  
Omsk, Russian Federation

**Abstract** — In the conditions of severe competition in the world market of the metallurgical industry, the problems of reducing the energy consumption per ton of products are actual; Reduction of technological time; Improving the quality of products; Reduction of environmental burden; And bringing the quality of electricity to normalized values. These circumstances require the introduction of academic achievements and new actively-adaptive elements in the electrical networks of enterprises. The results of the work are based on simulation and measurements of the quality of electric power, at the hub points of the enterprise network, energy class A accuracy meters. The DIGSILENT software (Germany) was used as a modeling tool. Methods for increasing the efficiency of ferroalloy furnaces (kWh / t) by changing the scheme of consumers' inclusion, and the use of FACTS devices are suggested.

**Keywords** — ferroalloy furnaces, FACTS-devices, math modeling

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Рудотермические печи (РТП) сегодня находят широкое распространение на производствах металлургических предприятий. Особую группу РТП образуют ферросплавные печи (ФСП), которые в России подразделяются на печи открытого исполнения (РКО) и закрытого (РКЗ).

До 1990 года, одним из основных мировых вкладчиков в базовые знания производства ферросплавов был институт Mintek (ЮАР), который сделал огромную работу по описанию основ процесса. Последние 25 лет

наблюдается значительный вклад в части прикладных исследований University of Missouri Rolla (США), University of New South Wales (Австралия), и совместными усилиями Norwegian industry and SINTEF/NTNU (Норвегия). Кроме того, теория термодинамических процессов была описана в программах от фирм Thermocalc и Factsage. [1]

Открытия последних 25 лет, могут быть сгруппированы по нескольким областям. Во-первых, резко возросло понимание теоретических основ. Сегодня можно моделировать, вычислять, и интерпретировать процесс плавки в ФСП. Далее, возросли качество и

доступность систем управления, а следовательно можно осуществлять контроль на новом уровне. В-третьих, в части факторов HSE (Health - здоровье, Safety - безопасность, Environment - окружающая среда) подходы к эксплуатации и проектированию находятся на совершенно другом уровне, по сравнению с 1990-ми. [1]

Современный вектор развития ферросплавного производства, направленный в сторону более технологически и энергетически оснащенных, с меньшими удельными затратами и низкой экологической нагрузкой на окружающую среду РТП, вскрывает немало нерешенных задач, среди которых:

- неполное использование руды, 40% которой уходит в шлаки, пыль, возгоны;
- неполное использование отходящих газов, состоящих на 80% из CO;
- большое количество твердых жидких и газообразных отходов, образующихся в процессе производства.

Актуальной является задача создания электротермических агрегатов, решающих проблему получения стали и ферросплавов из руды, без многостадийности процесса, при этом с улучшенными техническими и экологическими характеристиками, за счет полного использования запасенной в компонентах энергии, с полезным извлечением до 98%. Но совместное решение противоречивых задач делает их реализацию крайне сложной.

## II. EPOS-PROCESS

Ведущие технологические фирмы мира в области металлургии развивают исследования по созданию процессов и установок, способных осуществлять восстановление металлов из руд, с проведением металлургических процессов в печи. Наиболее известные из них: процесс Oxicar (Германия) в печи шахтного типа и работой с брикетами с применением газовых горелок; Midrex-процесс (США) - восстановление в открытой или закрытой электродуговой рудно-термической печи; Hyl (Мексика), Corex (Австрия), Romelt (Россия), ITmk3 (Япония) - позволяющие снизить энергозатраты и отказаться от кокса. Процессы Midrex и Hyl используют природный газ, подвергая его конверсии, требуют предварительной подготовки рудного сырья и переплава получаемого губчатого железа в электропечах. Процессы Corex и Romelt, для получения чугуна, все еще достаточно энергоемкие. Использование печей с вращающимся подом (ITmk3) существенно усложняет конструкцию и обслуживание восстановительных агрегатов. [2, 3]

НПП ЭПОС выбрало одним из направлений, существенно расширяющим технологические возможности процессов обработки материалов, использование концентрированных потоков энергии – плазменных разрядов. Развивая преимущества процессов Midrex и Oxicar, российская технология “EPOS-process”-реализует восстановление металлов из руды и промышленных отходов с применением нового поколения рудовосстановительных электропечей шахтного типа с плазменными нагревателями-горелками специальной конструкции (ПШП, см. рис. 1). [4]

В России уже существуют установки, в которых применяются разные виды нагрева: плазмой; дугой; электронным пучком; нагрев плазмой, которой присущи также свойства электронного пучка. Технология EPOS-process, по заявлению разработчиков, должна достичь такого сочетания свойств разряда, которые дали бы необходимый эффект – по плотности мощности, неравновесности, давлению, составу газов, кинематическому воздействию на объект, способности к рафинированию от примесей. [4]



Рис. 1. Модель плазменной шахтной печи для технологии «EPOS-process» и вид крепления плазматрона [5].

При установке плазматрона в крышке печи появляется возможность подогрева шлака до температуры, требуемой для проведения металлургических процессов на границе металл-газовая фаза-шлак. Таким образом, плазматрон повышает мощность установки в период расплавления с подрезом шихты верхних слоев и повышает температуру шлака в период проведения металлургических операций. [5]

По заявлению разработчиков химизм процесса в плазменной шахтной печи существенно отличается и от доменной плавки, и от процессов в классических РТП. Он обеспечивает полное использование в процессе плавки химической и тепловой энергии восстановителя, малые выбросы газа и пыли в систему газоочистки, что позволяет проводить металлургические процессы в полном масштабе (удаление серы, фосфора и др.), недостижимых в РТП традиционного типа; снижается воздействие шлака на футеровку тигля электропечи. При этом должны появиться дополнительные возможности экономии энергии путем регенерации тепла отходящих газов при подогреве подаваемого сырья. Плазма, работающая в точно выбранной зоне печи, должна была позволить увеличить степень извлечения полезных компонентов из руды до 90-95% исходного. [2, 5]

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПШП

В июле 2009 года был произведен пуск первой в мире ПШП на ООО «ЗСЭМЗ» (г. Новокузнецк). При совместной работе трех плазматронов мощность печи составляла 1,5 МВт. Планировалось подобрать режим, позволяющий снизить общие энергозатраты в 2-2,5 раза. ПШП должна была обеспечить выход продукта с содержанием фосфора 0,06% и менее, вместо 0,33% в окисленной и 0,42% в карбонатной руде, получаемых традиционным путем. [5]

Расчеты НПП ЭПОС применения «EPOS-process» для переработки феррохрома, феррованадия, ферротитана и иных ферросплавов показали возможность существенной экономии энергозатрат, повышение коэффициента использования восстановителя до двух раз, резкое снижение материалоемкости проекта, затрат на инфраструктуру, а также многократное снижение пылегазовых выбросов. При этом прогнозировалось, что проект будет реализован при втрое меньшей установленной мощности оборудования, а расходуемой мощности - вдвое меньшей, чем традиционно. [5]

К сожалению, на данной печи не удалось в полной мере реализовать все заявленные преимущества «EPOS-process». По факту расход электроэнергии ПШП составил в 4 раза выше, чем классических РКО эксплуатируемых на «ЗСЭМЗ». После непродолжительного периода эксплуатации плазменная печь была утилизирована из-за ее убыточности.

Тем не менее, в 2012 году Институтом металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН на основании разработанной математической модели расчета печи и полученных расчетных и экспериментальных данных, характеризующих термодинамические и физические параметры процесса, выданы рекомендации по составлению технического задания на проектирование опытно-промышленной многоцелевой плазменно-дуговой печи мощностью 3 – 5 МВт для прямого получения железа из дисперсных руд, концентратов и техногенных отходов. ОАО АХК ВНИИМЕТМАШ рассматривал возможность разработки и изготовления опытной печи для выполнения совместных с ИМЕТ РАН коммерческих проектов по переработке рудного сырья, техногенных отходов и производства ферросплавов для завода в г. Ярцево. [3]

По состоянию на 2017 год успешно эксплуатируемых промышленных ПШП нет. Это связано с тем, что как отмечают разработчики в технологии «EPOS-process» нет мелочей и незначимых аспектов, в частности, проблема плазменных печей может заключаться в неправильной схеме, недостаточном ресурсе, технической сложности и сравнительно низком КПД металлургических плазмотронов прежних схем. Также для успешного ведения технологического процесса в требуется качественная подготовка шихтовых материалов. Не проработанность технологии свела процесс в ПШП к неконкурентоспособному.

#### IV. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ДАЛЬНЕЙШЕМУ РАЗВИТИЮ ТЕХНОЛОГИИ

С 1940-х годов в мировой практике производства и эксплуатации рудно-восстановительных печей сложилась определенная традиция, в соответствии с которой для производства ферросплавов применяется электротермический метод и, кроме того, для получения каждого сплава предназначена печь специальной конструкции. Не смотря на то, что классический подход значительно сужает возможность использования одной и той же электропечи для выплавки различных сплавов применение плазменных печей в настоящее время технико-экономически не обоснованно. [7]

Тем не менее, варианты по улучшению технико-экономических показателей есть. Так расчеты автора, в

ходе реализации ряда НИОКР по внедрению FACTS-устройств в составе ФСП, показывают, что производительность отдельных эксплуатируемых РКО-9 (9 МВА) можно увеличить до 2 раз. Объем выплавляемых ими сплавов увеличивается за счет увеличения подводимой мощности и стабилизации горения дуги. Помимо FACTS-устройств на КПД печей влияет геометрия «короткой сети». [8]

Основной показатель эффективности работы ФСП –  $\text{tg}\varphi$  до внедрения FACTS-устройств, как показывает практика, составляет около 0,8. По факту ввода в эксплуатацию FACTS-устройств значение  $\text{tg}\varphi$  в среднем составляет 0,1. Теоретически возможно достижение значения  $\text{tg}\varphi = 0$ , но при этом ощутимо увеличивается срок окупаемости FACTS-устройств.

Следует особо отметить, что на срок окупаемости проектов по внедрению FACTS-устройств влияет использование источников реактивной мощности задействованных в технологии производства – синхронных двигателей (СД). В 99,9% случаев они не задействованы в схеме компенсации, а для наиболее распространенных отечественных ФСП марок РКО-9 вся электродвигательная нагрузка может компенсировать до 50% всей необходимой реактивной мощности.

Отечественная промышленность может изготавливать СД мощностью свыше 125 кВт по требованиям Заказчика, т.е. в строгом соблюдении присоединительных и посадочных размеров. Следовательно, на действующих предприятиях возможно замена АД на СД без останова производства. Синхронные компенсаторы (СК) внедренные даже только в системы воздухоочистки и водооборота ФСП могут покрыть до 35% требуемой реактивной мощности.

Конструктивно попытки достичь ФСП наименьшей величины – кВтч/т, можно разделить на две группы:

- печи постоянного тока – плазменные и постоянного тока;
- печи переменного тока – однофазные; трехфазные, как стационарные, так и с вращающейся подиной, открытые и закрытые.

Любые печи выдают в сеть свой спектр высших гармонических составляющих (ВГС) и уровень реактивной мощности. ВГС оказывают негативное влияние на батареи статических конденсаторов (БСК) и на кабельные линии 6/10 кВ, снижая надежность их работы. Поэтому отсутствие в составе конструкции БСК антирезонансных дросселей является грубым нарушением норм проектирования FACTS-устройств.

Залогом успеха является моделирование процессов в специализированных программных комплексах, например DIgSILENT, ANSYS MECHANICAL и специально разработанных автором.

Автор предлагает следующий концептуальный подход к модернизации старых и проектированию новых ФСП.

#### A. Ферросплавные печи в составе специализированных предприятий выпускающих ферросплавы.

В сетях ферросплавных предприятий наиболее часто встречаются отклонения по 6-й гармонике, составляющие 15-20% от нормируемых величин. Реже фиксировалось

превышение сразу по 4-й и 6-й гармонике, с отклонениями до 250%.

Для данной группы предприятий эффективно внедрение FACTS-устройств на базе фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) не управляемых и управляемых (УФКУ). Антирезонансные фильтры в составе ФКУ настраиваются на самую характерную величину одной гармоники, при этом немного снижая остальные. Данное решение успешно работает в схемах, где отклонения фиксируются до 3-х ВГС.

Таким образом рекомендуется следующая мощность FACTS-устройств в составе ФСП:

- 35-50% компенсировать СК;
- оставшиеся 65-50% компенсировать ФКУ/УФКУ.

#### *В. Ферросплавные печи в составе металлургических комплексов полного цикла.*

Там где представлен полный цикл металлургического производства в рабочих токах ФСП помимо характерных ВГС присутствуют канонические гармоники – 20-е и 30-е, что объясняется нагрузкой потребителей (прокатные станы). Также широкий спектр ВГС дают преобразователи тока для печей постоянного тока и ПШП. Таким образом для данных узлов сети (с ФСП) актуальна задача не только блокирования собственных источников искажения, но и максимальная защита БСК от внешних возмущающих факторов. Для реализации этой задачи необходимо распределить мощность FACTS-устройств в составе ФСП следующим образом:

- 35-50% компенсировать СК;
- оставшиеся 65-50% компенсировать динамической компенсацией с широким спектром ВГС – активный фильтр (АФ).

Для удешевления внедрения АФ рекомендуется компоновать технический комплекс из БСК и АФ с минимальными требованиями по спектру ВГС - только для защиты БСК от резонанса.

На основании изложенного автор считает использование технологических двигателей в качестве СК с включением в параллельную работу с другими FACTS-устройствами перспективным направлением решения поставленной задачи по сокращению показателя - кВтч/т.

#### **Список литературы**

- [1] Tangstad, Merete. Developments in manganese ferroalloy research and production in the last 25 years/ Tangstad Merete, Tronstad Ragnar // Extraction and Processing Division Symposium on Pyrometallurgy in Honor of David G.C. Robertson, held at the 143rd TMS Annual Meeting & Exhibition. San Diego, CA. FEB. 16-20, 2014. – P. 121-128.
- [2] Павлов, В.В. Плазменная шахтная рудно-термическая печь нового поколения/ В.В. Павлов, А.Г. Помещиков, И.А. Безруков, С.Н. Малышев// Электromеталлургия. – №1. – 2010. – С. 13-17.
- [3] Кирпичев, Д.Е. Энергофизические и физико-химические характеристики плазменно-дугового реактора для прямого жидкофазного восстановления железа из дисперсного оксидного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.08/ Дмитрий Евгеньевич Кирпичев. – Москва, 2012. – 24 с.
- [4] Арещенко, О.А. Вакуумная плазменная электротехнология для обработки порошковых материалов / О. А. Арещенко // Наука.– №4. – 2007. – С. 7.
- [5] <http://www.epos-nsk.ru> /Официальный сайт НПП «ЭПОС»/
- [6] Безруков И.А. Полупроводниковые источники питания для электротермических установок / И.А. Безруков, М.П. Гусев, А.П. Кузнецов, А.И. Алиферов, С.Н. Малышев// Силовая Интеллектуальная Электроника. – №3 (5). – 2006. – С. 33-34.
- [7] Безруков, И.А. Новые разработки НПП «ЭПОС» / И.А. Безруков, А.Г. Помещиков //Электromеталлургия. – №7. – 2008. – С. 46.
- [8] Корченова, Т. А. Повышение эффективности электроснабжения ферросплавных производств путем построения электротехнологических связей: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03/ Татьяна Александровна Корченова. – Липецк, 2009. – 245 с.

# СВЧ ЭТУ периодического действия для сушки растительного сырья и плодовоовощной продукции

И.С.Николаев<sup>1</sup>, Т.Ю.Дунаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет",  
Саратов, Россия  
E-mail: [d\\_t\\_y@mail.ru](mailto:d_t_y@mail.ru)

**Аннотация** - Состояние вопроса: В настоящее время на рынке достаточно востребованными являются высушенные пищевые продукты (плодовоовощная продукция, орехи, семена и семечки) и растительное сырье (травяные чаи, пряные травы, приправы и лекарственное сырье). К качеству этих продуктов, их внешнему виду и органолептическим свойствам предъявляются повышенные требования. Поэтому установки, позволяющие быстро и качественно высушить продукцию без потери ее ценных свойств, представляются перспективными с точки зрения разработки и внедрения.

**Материалы и методы:** При проектировании СВЧ установки основными элементами являются методы математического моделирования и синтеза. При выполнении исследований поведения объекта в рабочей камере использовалось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялось программное обеспечение MathCAD.

**Результаты:** Изучен процесс сушки плодовоовощной продукции в камере лучевого типа периодического действия. Рассчитаны размеры рабочей камеры, выбрана частота СВЧ установки, мощность магнетронов. Разработан эскиз установки.

**Выводы:** Разработанная установка может быть предложена к промышленной реализации. Выпуск на рынок установок подобного типа позволит увеличить производство качественно высушенной плодовоовощной продукции и растительного сырья.

**Ключевые слова:** СВЧ установка; камера лучевого типа; рупорный излучатель; сушка пищевых продуктов; магнетрон.

## Periodic microwave facility for drying vegetable and herbal raw products

I.S.Nikolaev<sup>1</sup>, T.Yu.Dunaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saratov State Technical University,  
Saratov, Russian Federation  
E-mail: [d\\_t\\_y@mail.ru](mailto:d_t_y@mail.ru)

**Abstract** - Background: At present, dried food products (fruit and vegetable products, nuts, seeds and seeds) and vegetable raw materials (herbal teas, herbs, spices and medicinal raw materials) are in demand on the market. Higher requirements are imposed on the quality of these products, their appearance and organoleptic properties. Therefore, facilities allowing to quickly and efficiently drying these products without losing their valuable properties seem to be promising for development and implementation.

**Materials and Methods:** The methods of mathematical simulation and synthesis are the main for designing a microwave facility. Mathematical simulation was used to perform studies of the behavior of an object in a microwave chamber. As a modeling tool, MathCAD software was used.

**Results:** The process of drying fruit and vegetable products in a periodic beam chamber has been studied. The dimensions of the working chamber are calculated, the microwave frequency of the facility and the power of the magnetrons are selected. The sketch of the facility was designed.

**Conclusions:** The developed facility can be proposed for industrial implementation. The launch of this type of equipment on the market will increase the production of high-quality dried fruit and vegetable products and herbal raw materials.

**Keywords:** microwave facility; beam type camera; horn radiator; dried food products; magnetron.

### 1. АКТУАЛЬНОСТЬ СВЧ СУШКИ

В настоящее время высушенная плодовоовощная продукция широко используется при производстве пищевых концентратов для первых и вторых блюд, соусов и специй; производстве продуктов быстрого питания; детского и диетического питания; производстве продуктов для разных групп потребителей [1]. Наиболее распространенными являются следующие высушенные пищевые продукты: картофель, морковь, свекла, сельдерей, лук, тыква, виноград, папайя, орехи, перец, душица, мята, паприка, чеснок, специи [2].

Как известно, для получения высушенных пищевых продуктов высокого качества, максимальная температура их нагрева должна составлять не более 70°C. Для растительного сырья (травы, лекарственное сырье, специи) максимальная температура нагрева составляет 40°C. Зачастую используют интенсификацию процесса путем принудительного вентилирования. Также при определенных условиях сушки подводимую мощность необходимо регулировать во избежание перегрева высушиваемого продукта. Поэтому одним из наиболее удобных способов сушки является сушка продукта с использованием СВЧ электромагнитной энергии [1].

## II. РАБОЧАЯ КАМЕРА

Для относительно небольших объемов продукции удобнее использовать установку периодического типа, построенную на КЛТ (рис.1).

Рабочая частота установки – 2450 МГц, т.к. магнетроны такой частоты наиболее распространены и экономически выгодны. Излучающая система представляет из себя 4 рупора, питаемые от двух магнетронов. Генератор, питающий антенну, имеет волноводный выход, поэтому фидерный тракт выполняется обычно в виде прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  [3].

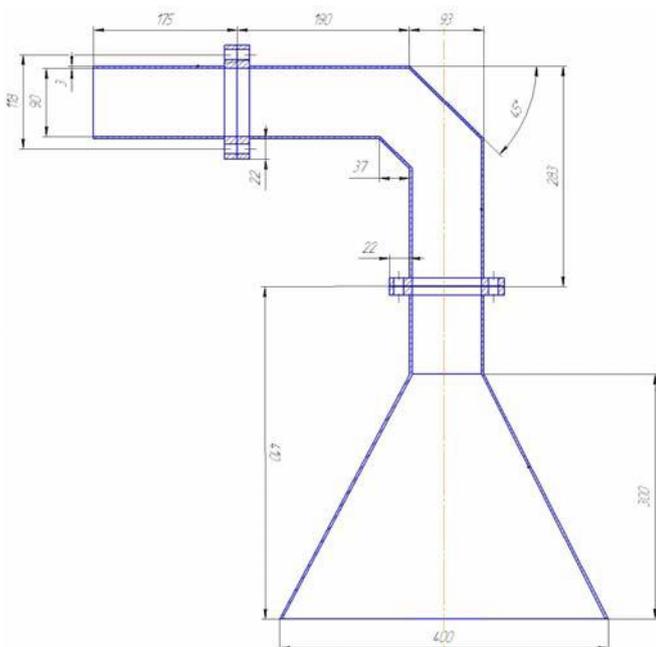


Рис.1. Излучающая система

Выбор размеров поперечного сечения прямоугольного волновода  $a$  и  $b$  производится из условия распределения в волноводе только основного типа волны  $H_{10}$ :

$$0,6\lambda \leq a \leq 0,9\lambda \quad (1)$$

Выбран стандартный алюминиевый волновод прямоугольной формы сечением  $0,9 \times 0,45$  м.

## III. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

В камере размещается 4 поддона, выполненные из радиопрозрачного и разрешенного для использования в пищевой промышленности материала. Габаритный размер одного поддона, равен раскрытию одного рупора, высота определена исходя из глубины проникновения волны  $\lambda=0,1224$  м в обрабатываемый материал, составляет  $h=0,1$  м [2]. Объем поддонов равен  $0,01$  м<sup>3</sup>.

Размеры рабочей камеры установки определены исходя из габаритных размеров ( $a=0,4$  м,  $b=0,25$  м) и количества рупоров (4 шт.). В результате расположения рупоров, габариты СВЧ камеры приняты:  $a=0,95$  м,  $b=0,65$  м,  $h=0,4$  м.

Исходя из удельной мощности, необходимой для сушки продукции [2], рассчитанная мощность магнетронов составляет  $12,5$  кВт. К установке принято 4 магнетрона, с выходной мощностью  $3$  кВт каждый.

В качестве источника СВЧ энергии выбирается источник питания постоянного тока «ИЭМ», состоящий из блока с магнетроном «NL10230-5» и блоком питания.

Источник предназначен для преобразования электрической энергии переменного тока напряжения  $220/380$  В, частоты  $50.60$  Гц в электрическую энергию постоянного тока. Выходная мощность магнетрона данной установки имеет плавную регулировку в пределах  $0,8-3,5$  кВт, что удовлетворяет требованиям регулирования мощности.

Удаление паров с помощью продувки рабочей камеры в процессе сушки обеспечивает конвективную составляющую СВЧ сушки, без которой этот процесс оказывается неэффективным. Подачу воздуха в рабочую камеру и удаление из нее паров проводят через систему щелей в стенке воздуховода, общей с рабочей камерой. Щели выполнены таким образом, чтобы не допустить утечек СВЧ энергии во внешнее пространство.

Потребная мощность воздуходувки составляет  $12,8$  Вт. Выбран двигатель вентилятора мощностью  $13$  Вт, фирмы «ELCO»

Высушиваемый материал после предварительной подготовки (мытьё, чистка, резка) помещается в поддоны и загружается в рабочую камеру. Затем установка включается и идет процесс сушки. Для эффективного уноса влаги из рабочей камеры предусмотрена система конвекции. В процессе сушки влагосодержание в продукте падает, изменяются его диэлектрические параметры и, соответственно, падает поглощение СВЧ мощности. Таким образом, в процессе сушки гарантируется отсутствие перегрева продукта. Продукт сохраняет естественный цвет, витамины и органолептические свойства.

Время затраченное, на один цикл сушки  $t=45$  мин, складывается из времени, затраченного на загрузку/выгрузку  $t=15$  мин и процесса сушки  $t=30$  мин. Таким образом, количество обрабатываемого продукта, за одну рабочую смену составит  $45$  кг, что в конечном итоге составит  $7,3$  кг сухого продукта.

## IV. ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанная установка позволяет реализовать СВЧ сушку пищевых продуктов, растительного сырья и плодовоовощной продукции. Производительность установки соответствует запросам небольших фирм и обеспечивает экономическую эффективность сушки с обеспечением высокого качества готового продукта.

## Список литературы

- [1] Рогов И.А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов/ И.А. Рогов.– М.: Агропромиздат, 1988.– 336 с.
- [2] Самылкин, В. Н. (студент). Исследование процесса СВЧ сушки моркови [Электронный ресурс] / В. Н. Самылкин ; науч. рук. Т. Ю. Дунаева // Электротехника, электромеханика и электротехнологии. - 2014. - № 1. - 4 с. - URL : <http://sstuaeu.esrae.ru/12-14>.
- [3] Архангельский Ю.С. Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010.- 229 с.

# Поиск путей снижения энергоёмкости ВВП РФ

А.С. Ведерников, Е.А. Керженцева

ФГБОУ ВО "Самарский государственный технический университет", Самара, Россия

E-mail: kerzhentseva.katya@mail.ru

**Аннотация - Состояние вопроса:** Энергоёмкость ВВП в среднем в четыре раза выше, чем в развитых странах мира. На государственном уровне встает задача кардинального снижения энергоёмкости ВВП РФ. В условиях замедления темпа роста ВВП и макроэкономического давления остро встает вопрос регулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Это обстоятельство требует внедрения новых активно-адаптивных элементов и мероприятий влияющих на снижение показателей энергоёмкости ВВП РФ. Для этих целей может быть использована система управления технологическим потенциалом страны.

**Материалы и методы:** При проведении исследования энергоёмкости ВВП РФ и поиска путей ее снижения основными элементами являются методы анализа и оптимизации. При выполнении экспериментальной части методом исследования являлось математическое моделирование. В качестве инструмента моделирования применялось программное обеспечение SPSSStatistic.

**Результаты:** Проанализированы варианты снижения энергоёмкости ВВП РФ. Сделаны выводы по способам управления и повышения энергетической эффективности страны.

**Выводы:** Разработанный алгоритм может быть использован при решении задачи снижения энергоёмкости ВВП повышения энергетической эффективности

**Ключевые слова:** энергоёмкость ВВП РФ; управление; активно-адаптивные элементы; технологический потенциал; энергетическая эффективность.

## Finding ways of reducing the energy intensity of Russia's GDP

A.S. Vedernikov, E.A. Kerzhentseva

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: kerzhentseva.katya@mail.ru

**Abstract - Background:** The energy intensity of GDP on average four times higher than in developed countries. At the state level, the challenge of radically reducing the energy intensity of Russia's GDP. The slowdown of GDP growth rate and macroeconomic pressure sharply raises the question of the regulation of energy saving and improving energy efficiency. This circumstance is the introduction of active-adaptive requires new elements and activities influencing the reduction of energy intensity of Russia's GDP. For these purposes, can be used by the control system of the technological potential of the country.

**Materials and Methods:** The study of the energy intensity of Russia's GDP and find ways to reduce it the basic elements are the methods of analysis and optimization. When performing the experimental part of the research method was mathematical modeling. As a tool for modeling software were used SPSSStatistic.

**Results:** Analyzed options for reducing the energy intensity of Russia's GDP. Conclusions on ways of managing and improving the energy efficiency of the country.

**Conclusions:** The developed algorithm can be used in solving the problem of reducing the energy intensity of GDP energy efficiency.

**Key-words:** the energy intensity of GDP of the Russian Federation; control; active-adaptive elements; technological capacity; energy efficiency.

В наши дни существует проблема высокой энергоёмкости внутреннего валового продукта России. По сравнению с другими странами данный показатель является недопустимо высоким. Данный факт мешает успешному функционированию отраслей энергетики России, поэтому проблема уже долгое время остается актуальной.

Для снижения энергоёмкости необходимо постоянно проводить анализ динамики изменения объема ВВП в различных отраслях производства, давать сравнительную характеристику данного показателя, изучать опыт других стран повышения энергоэффективности, а также реализовывать необходимые мероприятия по совершенствованию управления и распределения электроэнергии.

Задача роста энергоэффективности российской экономики существенно усложняется из-за специфических природных условий. Решение энергетических задач страны требует более активного развития энергетики, основанной на возобновляемых источниках. В качестве основного пути её решения, как правило, рассматриваются технико-технологические мероприятия по энергосбережению. В частности, это отражено в Указе Президента РФ «О

некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» № 889 от 04.06.2008 [4,1], где обозначена цель снижения энергоёмкости ВВП России не менее, чем на 40% к 2020 году от уровня 2007 года, и перечислены меры для достижения данной цели.

Для сравнения энергоёмкости России были исследованы показатели энергоёмкости других стран.

Таблица 1. Энергоёмкость ВВП в различных странах, тонны нефтяного эквивалента/ тыс. долл. 2005 г. по ППС

Страна	2000	2008	2016	2000/2016 (%)
Великобритания	0,156	0,13	0,102	79%
Германия	0,171	0,131	0,113	86%
Франция	0,154	0,147	0,132	90%
США	0,246	0,209	0,175	84%
Канада	0,331	0,301	0,275	91%
Япония	0,134	0,141	0,126	89%
Норвегия	0,287	0,234	0,194	83%
Россия	0,46	0,496	0,324	65%
Китай	0,549	0,288	0,274	95%
Индия	0,176	0,169	0,138	82%
Бразилия	0,115	0,133	0,125	94%
Украина	0,643	0,741	0,423	57%

Из приведённых в таблице 1 данных следует, что энергоёмкость ВВП в большей степени зависит от природных условий, чем от уровня технико-экономического развития экономики. В Канаде энергоёмкость в 1,5 раз выше, чем в США, в 2 и более раз выше, чем в европейских странах, в Китае – в 2 раза выше, чем в Индии и Бразилии. Россия имеет высокую энергоёмкость по сравнению с другими странами.

Для комплексного анализа энергоёмкости ВВП нашей страны исследовано потребление электроэнергии на одного занятого в промышленном производстве в 2016 году

Таблица 2. Потребление электроэнергии на одного занятого в промышленном производстве в 2016 году (кВт.ч) [5]

	По видам экономической деятельности:		
	добыча полезных ископаемых	обрабатывающие производства	производство и распределение электроэнергии, газа, воды
РФ	152803	55606	69332
ЦФО	163547	31778	68737
СЗФО	144212	61407	67860
ЮФО	50217	38760	42939
СКФО	36674	36258	29006
ПФО	139440	37997	61261
УФО	263184	60786	85278
СФО	70970	172870	112181
ДФО	64391	23469	66507
КФО	6735	18346	19251

Самое большое количество потребления электроэнергии на одного человека в добыче полезных ископаемых приходится на Уральский федеральный округ. В обрабатывающих производствах и в производствах и распределении электроэнергии, газа, воды наибольшее потребление у Сибирского федерального округа, что еще раз доказывает, что энергоёмкость зависит от особых природных условий. Наиболее масштабные комплексы добычи, обработки и распределения полезных ископаемых находятся в Сибири, что существенно усложняет работу и приводит к высокой энергоёмкости ВВП.

Таблица 3. Потреблено топливно-энергетических ресурсов на одного занятого в экономике страны по видам экономической деятельности (т.у.т – тонна условного топлива) [5]

	2012	2013	2014
<b>Всего в экономике страны</b>	<b>13,0<sup>*</sup></b>	<b>12,8<sup>*</sup></b>	<b>13,1<sup>*</sup></b>
в том числе по видам экономической деятельности:			
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	2,9	2,4	2,8
Рыболовство, рыбоводство	8,3	7,9	7,7
Добыча полезных ископаемых	62,9	63,9	72,8
Обрабатывающие производства	29,0	28,9	28,7
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	30,1	28,9	30,5
Строительство	2,2	2,3	2,3
Транспорт и связь	21,0	20,5	20,1
Прочие виды деятельности	8,8	8,5	8,7

В результате анализа выявлено, что добыча полезных ископаемых, обрабатывающие производства, транспорт и связь являются самыми энергоёмкими областями. Следовательно, основные мероприятия по снижению энергоёмкости ВВП России должны направлены в данные отрасли экономики.

Самым оптимальным решением проблемы высокой энергоёмкости ВВП следует рассматривать возобновляемые источники энергии (ВИЭ) – гидравлическую, ветряную, солнечную, геотермальную, биологическую энергию. Ресурс достаточно велик, и рост доли возобновляемых источников

энергии к 2020 году возрастет до 4,5% в энергобалансе страны. [3] В случае с гидроэнергетикой также уместно сопоставление России и Канаде.

В настоящее время почти в половине субъектов РФ с 30% территории и 20% населения страны, ГЭС и генерация гидроэлектроэнергии практически отсутствует.

Таблица 4. Гидроэнергетический потенциал и его использование в России и Канаде

Показатель	Россия	Канада
Экономический гидроэнергетический потенциал, ТВтч/год	850	535
Установленные мощности ГЭС, ГВт	73	47
Производство гидроэлектроэнергии, ТВтч/год	167	383
Использование гидроэнергетического потенциала, %	20%	72%
Доля гидроэлектроэнергии в общем производстве электроэнергии, %	59%	16%

Это: Центр Европейской части России: Белгородская, Брянская, Владимирская, Ивановская, Калужская, Костромская, Курская, Липецкая, Орловская, Тамбовская области. Север и северо-запад Европейской части России: Архангельская, Новгородская области, республика Коми. Северный Кавказ: Чечня и Ингушетия. Поволжье: Астраханская область, Калмыкия, Марий-Эл, Мордовия, Удмуртия. Западная Сибирь: Алтайский край, Курганская область, Омская область, Томская область, Тюменская область, Ханты-Мансийский АО, Ямало-Ненецкий АО. Восточная Сибирь и Дальний Восток: Бурятия, Забайкальский край, Приморский край, Хабаровский край, Чукотский АО. Водородная биодобывающая – одно из основных направлений исследований, проводимых научными исследовательскими лабораториями. Перспективность водородной энергетики связана с двумя ключевыми факторами: высокой продуктивностью биомассы; высокой жирностью ряда видов водорослей (липиды составляют до 50%, у некоторых видов - до 80% массы). По способности генерировать энергию водоросли кардинально превосходят традиционные «сухопутные» культуры, используемые сейчас для производства биотоплива, среди которых доминирует рапс. [2]

Таким образом, проведен сравнительный анализ показателей энергоёмкости ВВП России, выявлены самые энергоёмкие регионы и отрасли промышленности, установлены причины высокого потребления электроэнергии и предложены мероприятия для повышения энергоэффективности страны. В качестве одного из главных резервов для решения задач снижения энергоёмкости ВВП экономического развития страны следует рассматривать возобновляемые источники энергии - гидроэнергия, биотопливо, ветряная, солнечная, геотермальная энергия. Первые два вида энергии следует рассматривать в качестве наиболее перспективных для большей части территории России.

#### Список литературы

- [1] Дегтярев К. С., Соловьёв А. А. Энергообеспечение России - проблемы и возможности решения // Молодой ученый. — 2011. — №8.
- [2] Повышение ресурсо- и энергоэффективности: наука, технология, образование.// Тр. Междунар. симпозиума, посвященного 175-ю со дня рождения Д. И. Менделеева. Том 2. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2009
- [3] Сидоренко Г.И. и др. Экономика установок нетрадиционных возобновляемых источников энергии – Санкт-Петербург, Издательство Политехнического университета
- [4] Указ РФ «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» (№ 889 от 04.06.2008) - Российская газета, 7 июня 2008 г
- [5] Федеральный сайт государственной статистики - <http://www.gks.ru/>

# Использование метода эквивалентных схем для изучения кинетики СВЧ сушки

С.А.Бутков<sup>1</sup>, Т.Ю.Дунаева<sup>1</sup>, А.О. Мантуров<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет",  
Саратов, Россия  
E-mail: [sstu.acu.dunaeva@gmail.com](mailto:sstu.acu.dunaeva@gmail.com)

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Метод эквивалентных схем широко известен и давно используется в электрорадиотехнических задачах для моделирования динамики электрических схем и цепей различной сложности. Однако кроме применения для целей симуляции процессов в электронике, достаточно успешно развивается целый ряд альтернативных направлений применения метода эквивалентных схем. Определенный интерес представляет моделирование данным методом процессов тепломассопереноса, например, термообработки и сушки. Потокам энергии и массы в такой системе ставятся в соответствие электрические токи в соответствующих ветвях эквивалентной схемы.

**Материалы и методы:** Одним из эффективных подходов для реализации математических моделей может считаться применение симуляторов на базе вычислительного ядра Spice, например, версия LTSpice.

**Результаты:** Предложено использование метода эквивалентных схем для моделирования процессов тепломассопереноса. Получена эквивалентная схема, адекватно моделирующая изменение температуры объекта и его влагосодержания.

**Выводы:** Метод эквивалентных схем можно считать универсальным инструментом, применимым к симуляции систем различной природы либо разнородной структуры. Метод демонстрирует достаточную адекватность получаемых решений при умеренных требованиях к машинным ресурсам.

*Ключевые слова:* тепломассоперенос, метод эквивалентных схем, численная модель, LTSpice.

## An Equivalent Circuit Method for Analysis of the Microwave Drying Kinetics

S.A.Butkov<sup>1</sup>, T.Yu.Dunaeva<sup>1</sup>, A.O.Manturov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Saratov State Technical University,  
Saratov, Russian Federation  
E-mail: [sstu.acu.dunaeva@gmail.com](mailto:sstu.acu.dunaeva@gmail.com)

**Abstract — Background** The method of equivalent circuits is widely known and has long been used in electrical and radio engineering problems to simulate the dynamics of electrical circuits and the various complexity circuits. However, in addition to using for simulation purposes processes in electronics, quite a number of alternative directions of the method application of equivalent circuits are successfully developing. The simulation of heat and mass transfer processes, for example, heat treatment and drying, is interesting. In such a system, energy flows and masses are put in correspondence with the electric currents in the corresponding branches of the equivalent circuit.

**Materials and Methods:** The use of simulators based on the computing core Spice, for example, the LTSpice version can be considered one of the effective approaches for implementing mathematical models.

**Results:** The use of the equivalent circuit method is proposed for simulating the processes of heat and mass transfer. An equivalent circuit that adequately simulates changes in the temperature and moisture content of the object is obtained.

**Conclusions:** The method of equivalent circuits can be considered a universal tool applicable to the simulation of systems of a different nature or heterogeneous structure. The method demonstrates sufficient adequacy of the solutions obtained with moderate requirements to machine resources.

*Keywords — Heat and mass transfer, equivalent circuit method, numerical model, LTSpice.*

### I. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

СВЧ диэлектрический нагрев на сегодняшний момент достаточно широко используется для термообработки различных диэлектриков. Его преимущества, описанные,

например, в [1], позволяют точно поддерживать температуру и глубину нагрева, контролировать параметры процесса и в некоторых случаях достигать результатов, которые не могут обеспечить традиционные способы энергоподвода.

Исследование процессов СВЧ термообработки различных материалов с помощью методов математического моделирования практикуется достаточно давно и весьма успешно [1]. Для этих целей используются различные пакеты прикладных программ, адекватность результатов моделирования неоднократно проверялась путем натуральных экспериментов.

Однако в математическом моделировании такой задачи, как СВЧ термообработка осталась целый ряд нерешенных проблем. Например, поведение диэлектрика при термообработке определяется его диэлектрическими параметрами, а данные по их изменению не всегда доступны. Исследования поведения электромагнитной волны при взаимодействии с объектом также часто затруднены или даже невозможны.

Исключительная сложность происходящих при этом физических и химических явлений часто порождает желание исследователя получить результаты с возможно большей точностью, но такой подход зачастую уводит от физической сущности процесса. Как возможный альтернативный метод для решения задачи математического моделирования СВЧ термообработки рассмотрим так называемый метод феноменологических моделей (метод феноменологического моделирования) [6].

## II. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ СВЧ СУШКИ

Такие модели не требуют, не используют и не отображают какой-либо гипотезы о деталях физических процессов в изучаемых объектах. Простые по структуре, такие модели (обычно при числе переменных менее 10) достаточно хорошо отражают поведение объекта разных режимах работы. Применительно к СВЧ термообработке это означает, что для построения адекватной модели процесса не обязательно до тонкостей учитывать процессы преобразования СВЧ электромагнитной энергии в обрабатываемом материале. Достаточно задать общее описание процесса и несколько входных параметров, определяющих состояние системы. В нашем случае это, например, начальная и конечная температура объекта, скорость движения воздуха в рабочей камере, параметры объекта обработки, коэффициент отражения от рабочей камеры и т.д.

В работах [3, 4, 6] была выведена и численно изучена математическая модель кинетики СВЧ сушки без использования диэлектрических свойств объекта, построенная на основании уравнений теплового баланса и массопереноса [5] и использующая феноменологический подход.

Система, представляющая потоки энергии и массы воды в рабочей камере при СВЧ сушке, выглядит следующим образом (рис. 1)

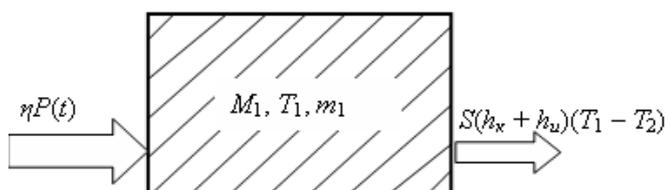


Рис.1. Упрощенная феноменологическая модель тепломассопереноса в процессе СВЧ сушки

Математическая модель кинетики переноса энергии и массы в этой системе представлена системой из двух неоднородных нелинейных дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{cases} \frac{d\Theta_1}{dt} (c_m m_1 + c_{M_1} M_1) = \eta P(t) - (h_k + h_u) S (T_1 - T_0) \\ \frac{dm_1}{dt} = -\frac{h_u S}{r} (T_1 - T_0) \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Theta_1 = T_1 - T_0$ ; – температурный напор в объекте термообработки;  $T_1$ , – текущая температура объекта;  $T_0$  – температура нормальных условий ( $20^\circ\text{C}$ );  $P(t)$  – мощность СВЧ;  $S$  – площадь, с которой идет испарение и теплоотдача конвекцией;  $m_1$  и  $M_1$  – масса жидкости и сухого скелета в обрабатываемом объекте;  $c_{m_1}$  и  $c_{M_1}$  – удельные теплоемкости жидкости и сухого скелета обрабатываемого объекта.

Первое из уравнений (1) описывает изменение температуры объекта. Она зависит от поглощаемой СВЧ энергии  $\eta P(t)$  и от тепловых потерь за счет конвективной теплопередачи воздуху рабочей камеры и за счет испарения воды. Второе уравнение описывает изменение массы воды в объекте за счет испарения.

Изменение температуры в воздухе рабочей камеры и его влагосодержания в рассматриваемом случае не учитывается.

Подобные уравнения могут быть эффективно интегрированы численно с привлечением тех или иных разностных численных методов, например, метода Рунге и Кутты [6].

Для эффективного численного интегрирования с привлечением ЭВМ была выполнена нормировка уравнений для того чтобы преобразовать их к безразмерному виду. Указанная нормировка при корректном выборе нормирующих постоянных позволяет исключить возможность ошибок переполнения, накопления численной ошибки в ходе интегрирования, а также избежать возможного появления сингулярностей в решениях, связанных с численными методами.

Для численных расчетов этой системы было разработано специализированное программное обеспечение, написанное на языке Паскаль и исполненное в стандартном компиляторе среды Borland Turbo Pascal 6.0. При численном интегрировании с использованием метода Рунге и Кутты 4 порядка точности была изучена кинетика температуры объекта и остаточного количества жидкости в высушиваемом объекте при различных режимах СВЧ облучения и различных значениях удельной теплоемкости нагреваемого вещества.

Для того, чтобы доказать, что разработанная математическая модель обладает степенью точности, достаточной для инженерных расчетов, а результаты, полученные в численных экспериментах, находятся в полном соответствии с особенностями физики процесса, нами была проведена ее верификация - сопоставление результатов моделирования с результатами натуральных экспериментов [3].

Результаты математического моделирования с использованием феноменологического подхода показали хорошее схождение с экспериментальными результатами.

На этом основании был сделан вывод: предлагаемая математическая модель показывает физически адекватные результаты и, значит, результаты, по моделированию кинетики сушки других объектов, также будут обладать достаточной степенью достоверности.

Точность такого моделирования может быть не очень высокой (ошибка может составлять порядка нескольких процентов), однако для общего анализа протекания технологического процесса и оценки адекватности модели такие результаты, на наш взгляд, вполне допустимы. Главные преимущества такой модели – ее простота, доступность для понимания и удобство использования с успехом компенсируют этот недостаток.

### III. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ

При анализе математического аппарата, описывающего систему (1), было замечено, что и процессы тепломассопереноса, и процессы работы электрических схем, базируются на одинаковом математическом формализме, а потоки энергии или вещества ведут себя аналогично токам, протекающим через элементы электрической схемы. Было выдвинуто предположение, что возможно адекватное математическое моделирование процессов тепломассопереноса схемотехническими методами, например, методом эквивалентных схем.

Метод эквивалентных схем широко известен и давно используется в электрорадиотехнических задачах для моделирования динамики электрических схем и цепей различной сложности. Суть метода изложена, например, в [2]. При использовании этого метода исследуемая система представляется в виде электрической схемы, причем основным параметрам системы ставятся в соответствие токи в ветвях схемы и напряжения в ее узлах. Параметры пассивных компонентов схемы и функциональные связи между токами и напряжениями в нелинейных или активных элементах задаются исходя из реальных величин параметров моделируемой системы и действующих в ней закономерностей. Математическое описание поведения системы выражается через систему уравнений, описывающих процессы, протекающие в составленной эквивалентной схеме. Преимущество такого подхода заключается в простоте, наглядности и тривиальности численной реализации при высокой адекватности результатов моделирования. Особым преимуществом метода является устойчивость получаемых решений.

Использование метода эквивалентных схем традиционно влечёт введение 2х наборов переменных [8] – переменных потока  $\{J_n\}$ , где  $J_n$ - эквивалент потока какого либо параметра или переменной, характеризующей систему через ветвь  $n$ ; и набор потенциалов  $\{F_n\}$ , где  $F_n$  - модельный эквивалент способности указанных характеристик объекта произвольно протекать через ветвь  $n$ . Будем говорить, что потенциал для каждой ветви  $F_n$  будет связан с потоком  $J_n$  через эту ветвь ( $J_n$  и  $F_n$  связаны друг с другом). Переменные, ассоциированные с различными ветвями, не связаны друг с другом.

Уравнение теплового баланса (первое уравнение системы (1)) моделируется схемой, содержащей нелинейную емкость  $C_1$  и источники тока  $B_2$  и  $B_3$ , управляемые напряжением. Рассмотрим схему более

подробно. Как можно видеть, изменение внутренней энергии объекта нагрева можно представить как изменение двух эквивалентных зарядов в схеме на рис.2.

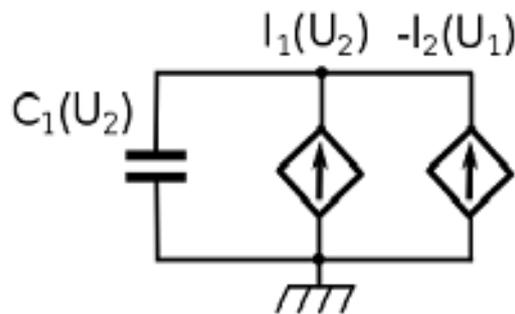


Рис. 2. Эквивалентная схема, формализующая первое уравнение системы (1)

Для имитации сохранения тепловой энергии в объекте сушки используется нелинейная емкость  $C_1$ . Нелинейная емкость  $C_1$  состоит из двух компонентов, имитирующих переменную массу влаги в объекте сушки и неизменной массы сухой составляющей объекта. Заряд на этой емкости  $Q$  нелинейно зависит от приложенного к ней напряжения  $x$  согласно формуле (2):

$$Q = (c_m \cdot V(U_2) + c_M M) \cdot x \quad (2)$$

Нелинейность зависимости заряда от напряжения, таким образом, соответствует зависимости количества тепла от массы воды в объекте  $m$ , и масса воды соответствует напряжению  $U_2$  (рисунок 2). Указанная нелинейность связана с изменением влагосодержания в объекте во время сушки и, соответственно, с изменением диэлектрических параметров объекта.

Согласно схеме рис. 2, емкость  $C_1$  может заряжаться или разряжаться токами, создаваемыми источниками  $B_2$  и  $B_3$ . В рамках предложенного подхода эти токи соответствуют потокам тепловой энергии, подводимой к объекту сушки от источника СВЧ энергии (источник тока  $B_2$ )  $I = \eta \cdot V(U_2)P$ , и потоку тепловой энергии, отдаваемой за счет конвекции и испарения (источник тока  $B_3$ ).

$$I = -\beta \cdot [V(U_1) - U_0] \quad (2)$$

Здесь  $U_1$  – эквивалент температуры объекта сушки,  $U_0$  – эквивалент температуры окружающей среды,  $\eta$  – коэффициент, соответствующий КПД источника питания СВЧ установки,  $\beta$  – коэффициент, соответствующий величине  $(h_k + h_u)S$  из формулы (1).

Рассмотрим вторую схему модели (рис. 3).

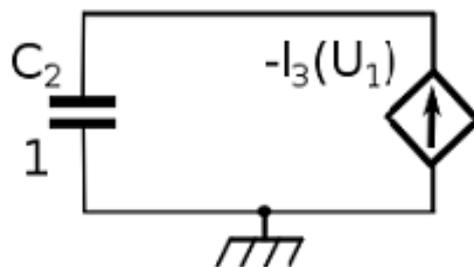


Рис.3. Эквивалентная схема, формализующая второе уравнение системы (1)

Она содержит конденсатор постоянной емкости C2 и источник тока B1, имитирующий испарение массы воды из объекта (второе уравнение системы (1)):

$$I = -\delta \cdot [V(U_1) - U_0] \quad (3)$$

где  $\delta = \frac{h_u S}{r}$  - коэффициент, зависящий от площади испарения объекта, коэффициента парообразования и коэффициента теплоотдачи испарением.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для изучения поведения системы выполнена ее симуляция в среде LTSpice [9].

Имитировался процесс сушки древесины в СВЧ установке периодического действия. В целях упрощения задачи принято, что процесс идет в открытой системе, нагрев воздуха в рабочей камере не учитывается. Результаты симуляции показаны на рис.4.

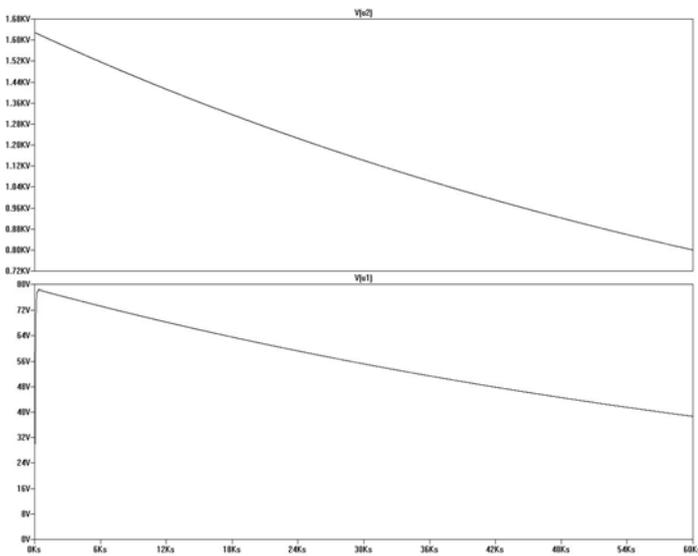


Рис.4 Результаты моделирования процесса СВЧ сушки диэлектрика

На рис. 5 представлены результаты начального этапа сушки в увеличенном масштабе.

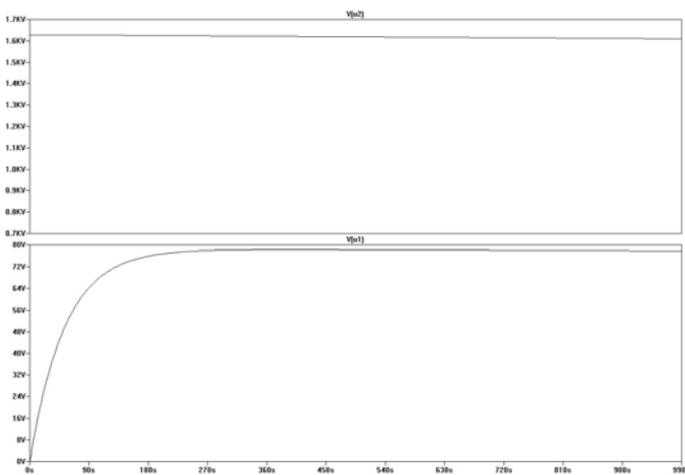


Рис.5. Результаты моделирования процесса СВЧ сушки диэлектрика (начальный этап).

Показанное на верхнем графике рис. 4, 5 напряжение  $U_1$  эквивалентно массе воды в объекте. На нижнем

графике рис. 4, 5 показано изменение величины  $U_2$ , эквивалентной температуре объекта.

Результаты симуляции показали, что поведение системы качественно соответствует динамике нагрева и сушки диэлектрика, хорошо изученной, например, в [3]. Характер кривых в целом соответствует особенностям протекания процессов тепломассопереноса при таком способе нагрева.

Необходимо отметить, что в отличие от предыдущих работ [3, 6] симуляция была проведена в среде, вычислительное ядро которой основано на применении численных схем Гира [7], демонстрирующих абсолютную устойчивость, что позволяет получать решения в задачах с жестким поведением, к которым, в частности, относятся задачи тепломассопереноса. Одним из преимуществ предложенного решения является возможность совместить расчеты процессов тепломассопереноса с моделированием преобразования СВЧ энергии в объекте. Также несомненным преимуществом предложенного метода является отсутствие необходимости исследовать электродинамические параметры системы.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности успешного использования метода эквивалентных схем для моделирования СВЧ сушки диэлектрика и корректности его реализации в среде LTSpice.

### Список литературы

- [1] Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия/ Ю.С. Архангельский. – Саратов: СГТУ, 1998. – 408 с.
- [2] Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учеб. пособие / И. С. Гоноровский. - 5-е изд., испр. - М. : Дрофа, 2006. - 719 с.
- [3] Дунаева, Т. Ю. Верификация феноменологической модели кинетики СВЧ термообработки на примере процесса сушки растительного сырья [Текст] / Т. Ю. Дунаева, А. О. Мантуров // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2009. - N 43. - С. 84-86.
- [4] Дунаева, Т. Ю. Влияние коэффициентов теплоотдачи конвекцией и испарением на кинетику СВЧ сушки диэлектриков [Текст] / Т. Ю. Дунаева, Н. А. Журавлева, Ю. В. Сыпкова // Проблемы энерго- и ресурсосбережения : сб. науч. тр. / СГТУ. - Саратов, 2010. - С. 259-262.
- [5] Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 268 с.
- [6] Dunaeva, T. The phenomenological model microwave drying kinetics of food products [Text] / T. Dunaeva, A. O. Manturov // The Seventh International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz technology (teraTech'10), Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2010. - Харьков, 2010. - P. 234-238.
- [7] JOEL D. HEWLETT and BOGDAN M. WILAMOWSKI. SPICE as a Fast and Stable Tool for Simulating a Wide Range of Dynamic Systems, *International Journal of Engineering Education* Vol. 27, No. 2, pp. 217–224, 2011.
- [8] Lewis, Edwin R. 1995. Network thermodynamics revisited *BioSystems* 34, pp. 47 – 63.
- [9] LTSpice IV. <http://www.linear.com/designtools/software/#LTSpice>. accessed 03.2016.

Мантуров, А. О. Схемотехнический подход к исследованию процессов СВЧ-сушки / А. О. Мантуров, Т. Ю. Дунаева // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2016 : материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 22-23 сент. 2016 г. = 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2016) : Conference Proceeding, Saratov, September 22-23, 2016. - Саратов, 2016. - Т. 2. - С. 152-154.

# АНАЛИЗ СТОИМОСТИ РЕЖИМА ОЖИДАНИЯ БЫТОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

А.О. Егоров<sup>1</sup>, А.А. Губарев<sup>1</sup>, Е.А. Люханов<sup>1</sup>, М.Д. Черепанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", Екатеринбург, Россия

E-mail: cherepanovamari@gmail.com

## Аннотация

**Состояние вопроса:** В настоящее время около 40% генерируемой в мире электрической энергии используется в жилых и общественных зданиях. Потому особо важно сформулировать принципы грамотного поведения потребителя электроэнергии. Энергосбережение в быту начинается с понимания основных принципов работы бытовых приборов. Современный потребитель не уделяет должного внимания возможным избыточным затратам, понесенным в результате нерационального использования бытовых электроприборов.

**Материалы и методы:** В ходе работы использовался прибор регистратор-анализатор показателей качества электроэнергии (ПКЭ) Chauvin Arnoux CA 8335+. Измерение ПКЭ и снятие графиков нагрузки проводились в течение 24 часов с дискретностью измерений 1 с. Для дальнейшего анализа статистических данных, построения сводных таблиц и графиков использовалась программа Excel.

**Результаты:** Составлен перечень бытовых приборов в составе экспериментальной квартиры, Определено их электропотребление и соответствующие затраты на электроэнергию. Построен суммарный график нагрузки и выделены электроприемники с наибольшим электропотреблением в режиме ожидания. Предложены пути снижения платы за электроэнергию.

**Выводы:** Учет потребления электроэнергии бытовой техникой в режиме ожидания и грамотное поведение потребителя позволят оптимизировать плату за электроэнергию и существенно повлиять на энергоэффективность в целом.

**Ключевые слова:** энергоэффективность; бытовое электропотребление; режимы работы; режим ожидания; бытовые электроприемники.

## THE COST ANALYSIS OF A STAND-BY MODE OF APPLIANCES

A.O. Egorov<sup>1</sup>, A.A. Gubarev<sup>1</sup>, E.A. Lyukhanov<sup>1</sup>, M.D. Cherepanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

E-mail: cherepanovamari@gmail.com

## Abstract

**Background:** Nowadays about 40% of the power output in the world are used in residential and public buildings. Therefore it is of great importance to formulate the principles of competent behavior of the electric power consumer. Energy saving in household begins with understanding of the basic principles of operation of household appliances. The modern consumer does not pay due attention to the possible excess expenses connected with irrational use of household electroreceivers.

**Materials and Methods:** During the gaging the UPQI (unified power quality indicators) logger Chauvin Arnoux CA 8335+ was used. Measurement of UPQI and load curves establishment were carried out within 24 hours with 1 s discretization. For the further analysis of statistical data, drawing up summary tables and schedules the Excel program was used.

**Results:** The household appliances of the experimental apartment which are usually operating in the stand-by mode are listed. For each electroreiver from the list the power consumption was defined and respectively expenses on the electric power are calculated. The total load curve was made and electroreceivers with the greatest energy consumption are allocated. Ways of optimization of a payment for the electric power are emphasized.

**Conclusions:** The accounting of power consumption by household appliances in a stand-by mode and competent behavior of the consumer will allow both optimizing a payment for the electric power and essential affecting energy efficiency in general.

**Key-words:** energy efficiency; household energy use; operating modes; stand-by mode; household electroreceivers.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время около 40% генерируемой в мире электрической энергии используется в жилых и общественных зданиях. Вместе с ростом нагрузки растут и тарифы на потребляемую электроэнергию, в связи с чем проблема энергосбережения встает все более и более остро [1-3]. Энергосбережение в быту начинается с понимания основных принципов работы бытовых приборов. Это приводит к повышению энергоэффективности и разработке методов рационального использования электроэнергии.

Современный потребитель не уделяет должного внимания возможным избыточным затратам, понесенным в результате нерационального использования бытовых электроприборов.

Одной из причин, повышающих потребление электрической энергии и, как следствие, платы за нее, является постоянное подключение неиспользуемых в данный момент электроприемников в сеть (таких как телевизор, фен, музыкальный центр, стиральная машина и др.).

Таким образом, для снижения затрат на электроэнергию необходимо определить уровень электропотребления бытовых приборов в режиме ожидания. Режим ожидания — это выключение всего устройства, кроме блока питания в составе самого прибора, чтобы обеспечить прием сигналов, например, от пульта дистанционного управления, из внешней сети или встроенного таймера. Такой режим еще называют «дежурным режимом» или «stand-by».

## II. ИЗМЕРЕНИЕ

В ходе работы использовался прибор регистратор-анализатор ПКЭ Chauvin Arnoux SA 8335+. Измерение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и снятие графиков нагрузки проводились в течение 24 часов с дискретностью измерений 1 с, обработка результатов осуществлялась с помощью программного комплекса PAT2 [4]. Для дальнейшего анализа статистических данных, построения сводных таблиц и графиков использовалась программа Microsoft Excel.

## III. АНАЛИЗ

В исследовании рассматриваются режимы наиболее часто используемых современным потребителем бытовых приборов, которые большую часть времени находятся в режим «stand-by». Список приводится в Таблице 1.

Опыты (измерительные эксперименты) показали, что самый большой потребитель электроэнергии в режиме ожидания — музыкальный центр. Его потребление составляет в среднем 12 Вт\*ч, что составляет 11% от номинальной мощности. За сутки в режиме работы «stand-by» при реальной эксплуатации прибора расходуется 0,3 кВт\*ч, что в денежном эквиваленте соответствует 0,86 руб. (согласно действующей тарификации на момент проведения исследований в 2016 г. в Свердловской области тариф составлял 3,42 руб/кВт\*ч днём и 1,61 руб/кВт\*ч ночью).

Таблица 1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ

№	Электроприёмник	Фирма	Модель	$P_{ном}$ , Вт
1	Телевизор	Panasonic	Viera TX-R32LE7K	144
2	Стиральная машина	Bosch	Maxx 5 WLX 16161	2400
3	Ноутбук	Asus	A52J	90
4	Блендер	Bosch	ErgoMixx 600W	600
5	Фен	Bosch	PHD5712 CTHM6D	1200
6	Мультиварка/пароварка	Panasonic	SR-TMH181	670
7	Музыкальный центр	AIWA	CX-NS52EZ	110
8	МФУ	Canon	LaserBase MF3228	700
9	Магнитофон	Sony	CFS-B5LMK2	14

Таким образом, по результатам измерений определен уровень потребления электроэнергии и ее стоимость для каждого электроприёмника в квартире, работающего в ждущем режиме, за сутки.

Как оказалось в ходе эксперимента, самым значимым потребителем в режиме «stand by» является музыкальный центр — порядка 66 % от общего потребления рассмотренных бытовых приборов. Самым маленьким потребителем является стиральная машина — менее 1%. Максимум нагрузок, равный 19,02 Вт\*ч, дежурного режима всех электроприемников пришелся на промежуток с 4 до 5 часов утра.

Полученные данные позволяют выявить стоимостную характеристику режима «stand-by» электроприемников данной квартиры. Было отмечено, что промежуток времени с 18 до 19 часов оказался наибольшим по затратам на электроэнергию, которые составили 0,07 рублей. Суммарная потребленная всеми приборами электроэнергия за сутки составила 0,42 кВт\*ч, в денежном эквиваленте 1,29 рублей. Следовательно, за месяц работа данных приборов в дежурном режиме обойдется в 39,99 рублей, в год порядка 475 рублей.

## IV. ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы определен уровень потребления электрической энергии бытовыми электроприемниками в режиме ожидания в бытовой квартире. Произведена финансовая оценка потребления электрической энергии для каждого прибора. Соответственно, в месяц данные расходы будут составлять порядка 39,99 рублей, в год — 475 рублей. Следовательно, для среднего многоэтажного дома с 5 подъездами и 25 этажами, располагающими по 6 квартир каждый, сумма, затраченная на дежурный режим бытовых электроприемников, достигнет примерно 360 тыс. рублей в год.

Данное исследование доказывает, что отключение неиспользуемых электроприемников от сети является реальным и эффективным способом сбережения электроэнергии и, как следствие, прямым способом экономии денежных ресурсов.

## Список литературы

- [1] С. П. Лохов. Оптимизация систем энергоснабжения и режимов энергопотребления экспериментальных жилых домов // Вестник ЮУрГУ. 2002. № 7(16). С. 14-15.
- [2] Адаричев Е. Н., Кокин С. Е., Паздерин А. В. Пути снижения электропотребления крупного города // Электрические станции. 2009. № 10. С. 43-46.
- [3] Verwers J.L., Sovers J.R. Challenges of supplying electric power to a large industrial customer in rural areas // IEEE Transactions on Industry Applications. Volume: 36, Issue: 4. PP. 972-977.
- [4] ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 2013.

# Электротехнический комплекс фотомодификации сред в жидком и твердом состояниях

А.А. Дмитриев, В.И. Горбунков  
ФБГОУ ВО Омский государственный технический университет  
Омск, Россия  
[aspAADmitriev@yandex.ru](mailto:aspAADmitriev@yandex.ru)

*Аннотация* — Решение целого ряда практических задач достигается воздействием ультрафиолетового излучения на органические и неорганические среды с целью придания им необходимых свойств. Выбор определенного спектрального диапазона, уровня мощности и длительности процедуры облучения является требуемым условием преобразования электрической энергии в энергию оптического излучения. Температурная зависимость характеристик и нестабильность параметров источников излучения в процессе эксплуатации могут оказывать негативное влияние на интенсивность излучения. Эти обстоятельства требуют создания системы регистрации текущих параметров процедуры облучения и оценки степени их энергетического воздействия на среду. В работе показана реализация оценки дозы ультрафиолетового излучения. Создана база данных параметров процедуры облучения. Достигнута возможность оперативного отслеживания текущей информации, проведения корректировки, остановки и возобновления процесса облучения. Отмечена перспективность применения комплекса в агропромышленном секторе для предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур.

*Ключевые слова* — электротехнический комплекс; фотомодификация; ультрафиолетовое излучение; дозировка.

## Electrotechnical complex of photomodification environments in liquid and solid aggregate states

A.A. Dmitriev, V.I. Gorbunkov  
Omsk State Technical University  
Omsk, Russia  
[aspAADmitriev@yandex.ru](mailto:aspAADmitriev@yandex.ru)

*Abstract* — The solution of a number of practical problems is achieved by the action of ultraviolet radiation on organic and inorganic media in order to give them the necessary properties. The choice of a certain spectral range, power level and duration of the irradiation procedure is a required condition for converting electrical energy into optical radiation energy. The temperature dependence of the characteristics and the instability of the parameters of the radiation sources during operation can have a negative effect on the radiation intensity. These circumstances require the creation of a system for recording the current parameters of the irradiation procedure and assessing the degree of their energy impact on the environment. The work shows the implementation of the assessment of the dose of ultraviolet radiation. The database of the parameters of the irradiation procedure is created. It was possible to quickly track the current information, adjust, stop and resume the irradiation process. Prospective application of the complex in the agro-industrial sector for preseedling processing of seeds of agricultural crops was noted.

*Keywords* — electrotechnical complex; photomodification; ultraviolet radiation; dosage.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время решение целого ряда практических задач достигается воздействием ультрафиолетового излучения (УФИ) на органические и неорганические среды с целью придания им необходимых свойств. Для этих целей широко используются ртутные лампы различных типов, плазмотроны и плазменные облучательные установки [1], эксилампы барьерного разряда [2]. УФИ представляет собой мощный фактор воздействия, так как его квантовая эффективность намного превосходит эффективность лучей видимого и инфракрасного спектра. Наличие большого числа соединений, активно поглощающих энергию ультрафиолета, позволяет влиять на свойства и структурно-функциональные процессы облучаемого

материала. Степень этого воздействия определяется дозой энергии, полученной материалом при процедуре облучения. Ряд факторов, таких как нестабильность сетевого напряжения питания, падение с течением времени мощности излучения ламп вследствие деградации рабочей газовой смеси, изменение внешней температуры оказывают негативное воздействие на фотомодификацию среды [3]. Задача контроля и мониторинга интенсивности облучения выходит на передний план при применении источников УФИ и создании более сложных устройств на их основе. Эти обстоятельства требуют создания системы регистрации параметров процедуры облучения и оценки степени их энергетического воздействия на среду.

## II. ОПИСАНИЕ

Электротехнический комплекс фотомодификации сред представлен на рис.1. Он состоит из фотореактора (1), источника питания (2), дозатора (3) и кварцевой кюветы (4), в которую помещается облучаемый материал.

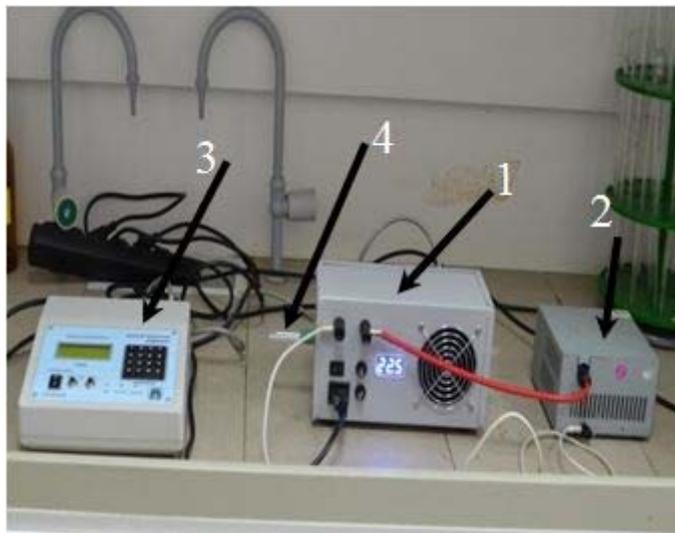


Рис.1. Электротехнический комплекс фотомодификации сред в жидком и твердом состояниях.

Твердые вещества закладываются непосредственно в кювету. При работе с жидкими средами в качестве систем подачи используется различные системы переливания.

В качестве источника УФ-И используется эксиллампа на молекулах  $\text{XeCl}^*$  (рис.2), помещенная в металлический корпус (фотореактор). Спектр излучения лампы содержит монолинию  $\lambda_p = 308 \text{ нм}$  [4]. Среди большого разнообразия некогерентных источников узкополосного излучения в УФ и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазоне эксиллампы выделяются удачным сочетанием своих физических параметров и удобством эксплуатации, поэтому находят широкое применение в светотехнике, химическом анализе и фотолизе органических соединений, производстве оптических материалов, УФ-дезинфекции [4,5]. Основное отличие эксилламп от имеющихся люминесцентных, а также тепловых источников спонтанного излучения УФ - или ВУФ – диапазонов – спектр излучения. До 80% и более общей мощности излучения может быть сосредоточено в относительно узкой (не более 10 нм на полувысоте) полосе соответствующей молекулы [6].

Питание эксиллампы осуществляется от внешнего источника напряжения импульсами с амплитудой до нескольких киловольт. При этом нагрев колбы лампы происходит в умеренном температурном диапазоне. За это свойство в зарубежной литературе эксиллампы называют «cold emission sources» [5]. Для снижения термического воздействия лампы на кювету используется система температурной регулировки, которая представляет собой микроконтроллер, управляющий маломощным вентилятором. Регистрация температуры внешней поверхности колбы лампы осуществляется датчиком температуры. При достижении порогового значения температуры микроконтроллер подает управляющий сигнал на коммутатор, который замыкает цепь питания воздушного охлаждения, благодаря чему облучаемый материал защищен от термических перегрузок.

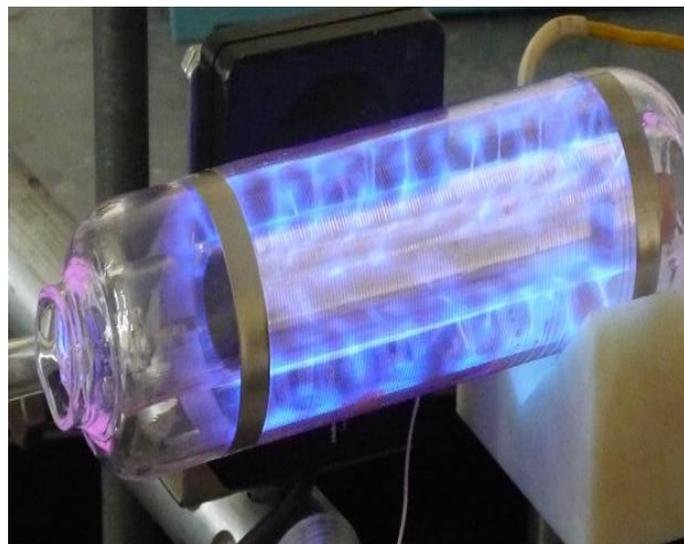


Рис.2. Эксиллампа на молекулах  $\text{XeCl}^*$ .

В качестве регистратора интенсивности излучения (датчика УФ-И) используется фотодиод со спектральной чувствительностью захватывающей длину волны лампы. Данное решение, принято полагая, что фотодиод и вещество являются спектральными приемниками, в которых под действием излучения происходят определенные характерные фотохимические реакции, имеющие равноэнергетические формы. Следует обратить внимание на тот факт, что из-за спектральной зависимости чувствительности фотодиода дозированию может быть подвергнуто только монохроматическое излучение [7].

Точное дозирование обеспечивается механизмом оценки поглощенной энергии УФ-И. При этом высокое воспроизводство и повторяемость результатов взаимодействия излучения со средами и веществами достигается за счет количественных соотношений для величины дозы [8]. Для этого было введено понятие единицы («кванта») дозы, выраженного в единичном интервале времени облучения, абсолютное значение которого получено из решения интегрального уравнения, описывающего поглощенную дозу. Так как интенсивность спектральных линий определяется законом Планка, это позволяет достаточно просто вычислить дозу облучения на любой дискретной длине волны и измерять ее дозатором [9]. При этом погрешность регистрации дозировки не превышает энергию кванта дозы, что в рассматриваемом устройстве составляет величину  $7,83 \times 10^{-19} \text{ Дж}$ .

Основой дозатора (рис.3) является микроконтроллер, который обрабатывает сигнал датчика УФ-И и выводит данные о текущей дозе и времени облучения на жидкокристаллический дисплей. Для удобства работы персонала интерфейс дозатора полностью выполнен на русском языке. Это позволяет оперативно отслеживать текущую информацию, проводить корректировку, прерывать и возобновлять процесс облучения. При достижении заданного порогового уровня дозы облучения автоматически происходит резкое снижение интенсивности излучения лампы до нуля. Набор дозы излучения осуществляется с помощью клавиатуры ввода данных. Управление процедурой облучения сред осуществляется кнопками «пуск-стоп», «сброс»,

переключателем режимов работы «прогрев лампы–рабочий режим» и общего выключателя «сеть». Выбор функциональных переключателей и их числа был осуществлен исходя из простоты обслуживания устройства при подготовке и проведении процедуры облучения [7].



Рис.3. Дозатор ультрафиолетового излучения.

Важной составляющей дозатора является модуль записи данных (МЗД), который реализует функцию сбора и вывода информации на внешние накопители. МЗД получает информацию о параметрах процедуры облучения от микроконтроллера, хранит ее в своей внутренней памяти и выводит на внешний накопитель данных, работающий по интерфейсу USB 2.0, по команде на запись с кнопок управления. Созданный на носителе файл поддерживается редактором таблиц Microsoft Excel, что позволяет просматривать и редактировать данные на большинстве ЭВМ.

### III. АПРОБАЦИЯ

Одной из областей применения рассматриваемого комплекса является предпосевная подготовка посевного материала в семеноводстве. Известно, что УФВ влияет на митотическую активность в меристеме корешков, синтез белка и нуклеиновых кислот. Семена после обработки имеют больший биоэнергетический потенциал, в них происходят структурно-функциональные перестройки мембранных образований, что приводит к стимуляции начальных ростовых процессов [10].

Первичное экспериментальное испытание комплекса [11, 12] показало, что дозирование лучевой энергии с высокой точностью обеспечивает воспроизведение и повторяемость результатов процедуры облучения семян пшеницы. При этом погрешность регистрации дозы не превышала значение  $2,45 \times 10^{-7}$  Дж.



Рис.4.Проросшие семена пшеницы, обработанные УФВ.

После обработки УФВ энергия прорастания семян увеличивается на 20-30%. Также наблюдалось увеличение сырой массы растения – на 54% выше, чем у контрольных образцов. Была хорошо развита корневая система в обработанных образцах: облученные семена имели длинные корни, которые тесно переплетались между собой (рис.4). Полученные данные показывают, что реализуемый подход к предпосевной обработке посевного материала с использованием электротехнического комплекса фотомодификации сред позволяет эффективно дозировать лучевую энергию, определять и управлять степенью энергетического воздействия на растительный материал. Энергия излучения эксилампы, поглощаемая средой при реализуемом методе обработки посевного материала позволяет оценить эффективность действия источника на различные сельскохозяйственные культуры.

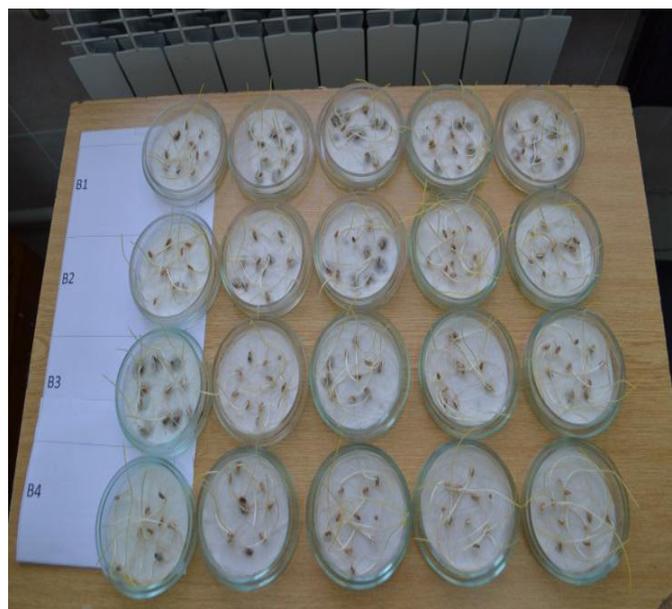


Рис.5. Экспериментальные образцы посевного материала.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электротехнический комплекс фотомодификации сред в жидком и твердом состояниях позволяет обеспечить:

- безопасность персонала при работе с ультрафиолетовым излучением;
- защиту облучаемого биологического материала (среды) от термической перегрузки;
- защиту облучаемого материала от механических травм и повреждений;
- защита облучаемого материала (среды) от переоблучения;
- контроль и мониторинг текущей интенсивности облучения;
- возможность записи данных на USB-носители;
- простоту работы с устройством для людей слабо разбирающихся в цифровой технике.

Реализована оценка дозы ультрафиолетового излучения, создана база данных параметров процедуры облучения. Достигнута возможность оперативного отслеживания текущей информации, проведения корректировки, остановки и возобновления процесса облучения. Русифицирован интерфейс дозатора.

Результаты лабораторных испытаний открывают перспективу применения установки по предпосевной обработке семян в полевых условиях. Внедрение технологии в опытно-семеноводческие процессы, сотрудничество с семеноводческими хозяйствами позволит произвести оценку агротехнологического эффекта опико-электронной технологии повышения биологической активности семян. Разработанный комплекс имеет хорошие предпосылки для решения актуальной задачи повышения всхожести и роста сельскохозяйственных культур за счет эффективного использования источников УФ-И.

#### Список литературы

[1] Гордеев Ю.А., Юлдашев Р.З. Биоактивация семян культурных растений ультрафиолетовыми и плазменными облучателями // Известия С.-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ). 2011. № 24. С. 343-348.

- [2] Eduard A. Sosnin, Yulia V. Chudinova, Irina A. Victorova, Ivan I. Volotko. Application of excilamps in agriculture and animal breeding (Review) // Proc. SPIE 9810, International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XII, 98101K.
- [3] Дмитриев А.А., Скоморощенко О.В., Борисов И.И., Киселев И.И., Чешегоров В.А., Горбунков В.И. Температурная зависимость характеристик излучения коаксиальной эксилампы на молекулах ХеС1\* / А.А. Дмитриев и др. // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. В 2 т. Т. 1. – Омск, 2017. С. 328-331.
- [4] Соснин, Э. Эксилампы – перспективный инструмент фотоники / Э. Соснин, В. Тарасенко // Биофотоника. – 2015. - №2. – С. 60-69.
- [5] Соснин Э. А. Области применения вакуумных ультрафиолетовых эксиламп (обзор) / Э. А. Соснин // Оптический журнал. – 2012. - №10. – С. 66-76.
- [6] Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ- излучения // Успехи физических наук. – 2003, – Т.173. – №2 – С. 201-217.
- [7] Горбунков, В.И. Излучатель дискретного спектра оптического диапазона с планковским распределением интенсивности для медицинской технологии экстракорпоральной фототерапии [Текст] / В.И. Горбунков, В.И. Соломонов, А.А. Жерносенко, К.Р. Сайфутдинов // Омский научный вестник. – 2015. - № 2. – С. 135-137.
- [8] Горбунков, В. И. Дозатор УФ-излучения газоразрядных ламп для медицинских целей / В. И. Горбунков // Общественное здоровье: инновации в экономике, управлении и правовые вопросы здравоохранения: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Т. 1. – Новосибирск, 2005. – С. 111–113.
- [9] Горбунков, В. И. Особенности использования излучателя закрытого типа в фототерапии / В. И. Горбунков // Проблемы и перспективы отечественной светотехники, электротехники и энергетики: сб. науч. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск, 2013. – С. 209–215.
- [10] Беляков, М. В. Влияние оптического излучения на прорастание семян / М. В. Беляков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. - №12. – С. 11-13.
- [11] Горбунков В.И., Воронкова Н.А., Соснин Э.А., Гольцова П.А., Дмитриев А.А. Предпосевная обработка семян ультрафиолетовым излучением: новый подход / В.И. Горбунков и др. // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (Саранск, 15-16 марта 2017 г.) – Саранск, 2017. С. 67-70.
- [12] Дмитриев А.А., Мальгина И.Л., Скоморощенко О.В., Горбунков В.И. Опико-электронная система предпосевной обработки семян / А.А. Дмитриев и др. // Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы VIII международной научно-практической конференции – Саратов, 2017. С. 62-64.

# Влияние частотного пуска асинхронного двигателя на падение напряжения и потери электроэнергии в системах собственных нужд электрических станций

Д.Ю Середкин, А.Д Купчинов  
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
Москва, Россия  
daniil.seredkin1@gmail.com

**Аннотация** — особенностью системы собственных нужд электростанций является наличие мощных потребителей электроэнергии - электроприводов различных механизмов. На данный момент в качестве электроприводов наиболее часто применяются нерегулируемые асинхронные двигатели. Кратность пускового тока при прямом пуске двигателя может достигать семи, что приводит к значительному провалу напряжения на шинах собственных нужд электростанции, что влечет за собой нарушение работы других потребителей, а также резкому повышению температуры обмоток двигателя, что может вызвать преждевременное старение изоляции обмоток и выход двигателя из строя. Для решения этих проблем может быть использован частотный пуск двигателя, осуществляемый с помощью плавного регулирования частоты питающего напряжения.

**Ключевые слова** — частотный пуск; частотно-регулируемый привод; асинхронный двигатель; собственные нужды; энергоэффективность.

## Influence of a frequency start of induction motor on voltage drop and on losses of the electric power in auxiliary power supply of power plants

Daniil Seredkin, Aleksandr Kupchinov  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Moscow, Russian Federation  
daniil.seredkin1@gmail.com

**Abstract** — the specialty of the auxiliary power supply system of power plants is the presence of powerful electric power consumers-electric drives of various mechanisms. At the moment, as an electric drives the most commonly are used non-controllable induction motors. Multiplicity of a starting current in case of a direct-on-line start can reach seven, that leads to the significant voltage drop on buses of auxiliary power supply of electric power plants, that involves discrepancy of functional operation of other consumers, and also to a sharp temperature increase of the motor windings, that can cause windings isolation defects and motor failure. To solve these problems, can be used a frequency start of the induction motor, carried out by means of a variable frequency control.

**Keywords** — frequency start, variable-frequency drive, induction motor, auxiliary power supply, energy efficiency.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в системах собственных нужд (СН) российских электрических станций нашли широкое применение нерегулируемые мощные асинхронные двигатели. При многократных пусках таких двигателей наблюдаются значительные потери электроэнергии, может происходить значительное падение напряжения на шинах, от которых питаются другие потребители электроэнергии системы собственных нужд. При проектировании и эксплуатации систем собственных нужд важным является определение условий пуска двигателей, при которых падение напряжения на питающих шинах электрической станции и потери электроэнергии в этой системе будут наименьшими [3]. По статистике около 70% износа электродвигателя приходится на моменты пуска [6]. Так как прямой пуск сопровождается существенными динамическими воздействиями на вал двигателя и сверхтоками в обмотках, то такой способ пуска приводит к быстрому выходу из

строя как двигателя, так и самого механизма. Причем чем выше установленная мощность привода, тем последствия такого пуска более заметны. В результате срок службы двигателей резко сокращается, а затраты на профилактику и ремонт растут.

Целью данного исследования была проверка энергоэффективности и целесообразности использования регулируемых электроприводов в системах собственных нужд вместо нерегулируемых, получивших широкое распространение из-за их простоты и удобства.

### II. МЕТОДЫ

При проведении исследования использовалась расчетная модель электроустановки собственных нужд напряжением 6 кВ, выполненная с помощью программного обеспечения ETAP (рис 1). Данная модель включает в себя следующие элементы: источник питания-трансформатор собственных нужд (ТСН), представленный в виде системы, шина собственных нужд (Шина 1), кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена BS6622

сечением 185 мм<sup>2</sup>, рассчитанный на напряжение 6 кВ, преобразователь частоты (ПЧ) и сам асинхронный двигатель (АД). В качестве исходных данных использовались параметры асинхронного двигателя привода питательного электронасоса тепловой электростанции и соответствующего ему преобразователя частоты.

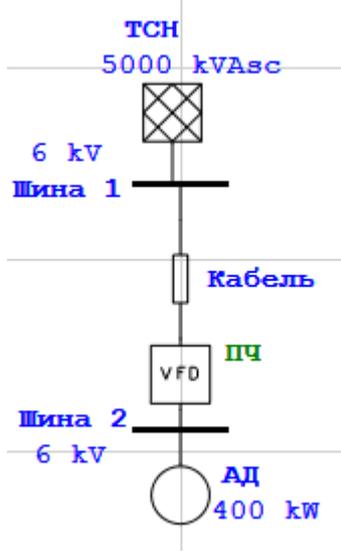


Рис. 1 Расчетная схема электроустановки собственных нужд

Основные параметры модели:

АД:

Номинальная мощность – 400 кВт;

Число пар полюсов – 1;

Номинальное скольжение – 1,55%;

Момент инерции ротора – 4,5 кг·м<sup>2</sup>.

ПЧ:

Номинальная мощность – 460 кВт;

Номинальная частота – 50 Гц;

Номинальный ток – 44,26 А;

Диапазон регулирования выходной частоты [0-150]%  $f_{ном}$ .

Кабель:

Длина – 50 км;

Удельное активное сопротивление – 0,128 Ом/км;

Удельное индуктивное сопротивление – 0,0792 Ом/км.

ТЭН:

Мощность – 5 МВА.

Нагрузка:

Момент инерции – 10 кг·м<sup>2</sup>.

ПЧ оказывают регулирующее воздействие на процесс пуска путем изменения частоты выходного напряжения и значения выходного тока. Частота выходного напряжения меняется по линейному закону, значение выходного напряжения изменяется пропорционально частоте (рис. 2).

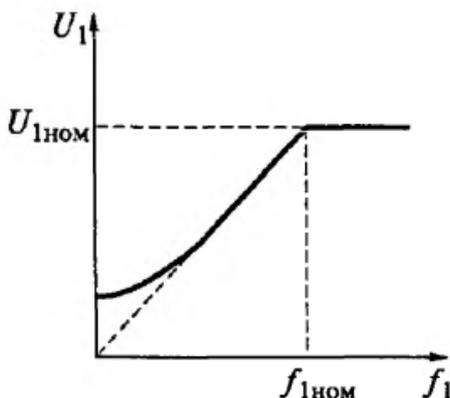


Рис. 2 Зависимость напряжения от частоты при частотном регулировании

На основании этих параметров можно устанавливать несколько пределов, превышение которых воздействует на функцию управления. Этими пределами могут быть: допустимая наименьшая скорость электродвигателя (минимальная частота), допустимый наибольший ток (предел по току).

В качестве нагрузки АД использовался механизм, обладающий насосной моментной характеристикой (рис. 3).

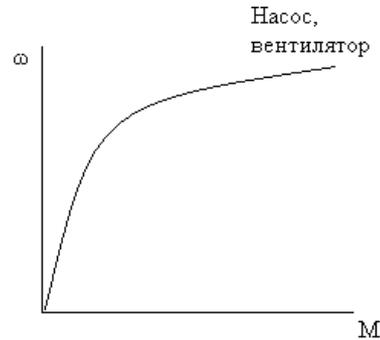


Рис. 3 Насосная моментная характеристика

В ходе работы моделировались прямой и частотный пуски АД при различной мощности ТЭН, различных длинах и сечениях кабеля и номинальной механической нагрузке. Исследовалось влияние способа пуска электродвигателя, а также мощности ТЭН на остаточное напряжение на шинах собственных нужд электрической станции и время запуска АД. Также были рассчитаны потери при прямом и частотном пусках на основе методики расчета потерь электроэнергии в электроустановках [1, 2].

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследования были получены следующие зависимости:

Напряжение (% от номинального) на шинах собственных нужд электрической станции

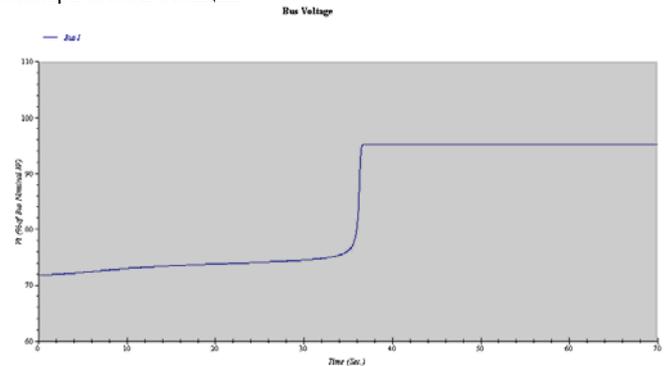


Рис. 4 Зависимость напряжения от времени при прямом пуске асинхронного двигателя

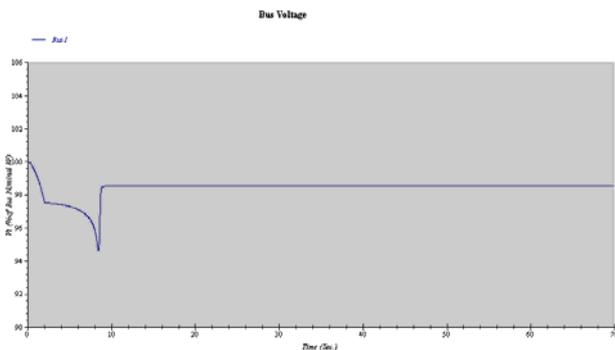


Рис. 5 Зависимость напряжения от времени при частотном пуске асинхронного двигателя

Как видно из графиков (рис 4,5), при прямом пуске происходит падение напряжения на шинах собственных нужд до 72% от номинального значения (значение провала напряжения – 28%), что негативно влияет на остальных потребителей электроэнергии и не позволяет произвести групповой пуск нескольких асинхронных двигателей. Такое падение напряжения на шинах собственных нужд может привести к снижению частоты вращения двигателей, вплоть до полной остановки некоторых из них. При частотном пуске такой проблемы не наблюдается: провал напряжения при неизменных параметрах модели уменьшается на 22% (до 5% от номинального значения) за счет плавного регулирования частоты с помощью ПЧ.

Кроме того, способ пуска влияет и на время пуска, снижение которого уменьшает время действия выделяющегося тепла в результате протекания пускового тока по обмоткам АД на их изоляцию. При неизменной мощности трансформатора собственных нужд и одинаковой нагрузке двигателя время прямого пуска составляет 38 секунд, а плавного – 9 секунд.

Потери энергии при работе электропривода с нагрузкой при прямом пуске (рис 6а) ( $M_c \neq 0$ ) определялись по формуле :

$$\Delta W = \frac{\Delta W_0 \cdot M_{cp}}{M_{cp} - M_c}, \quad (1)$$

где  $\Delta W$ ,  $\Delta W_0$  - соответственно потери энергии под нагрузкой и без нагрузки двигателя;  $M_{cp}$  - средний, неизменный за время переходного процесса момент двигателя;  $M_c$  - момент нагрузки.

$$\Delta W_0 = \frac{J \cdot \omega_0^2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right), \quad (2)$$

где  $J$  - момент инерции привода,  $\omega_0$  - скорость идеального холостого хода двигателя,  $R_1$  - сопротивление обмотки статора АД,  $R_2'$  - приведенное сопротивление обмотки ротора АД.

$$M_{cp} \approx \frac{M_k + M_n}{2}, \quad (3)$$

где  $M_k$  - критический момент АД,  $M_n$  - пусковой момент АД.

В нашем случае:

$$J = 4,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad \omega_0 = 314,16 \text{ рад/с}, \quad R_1 = 0,5836 \text{ о.е.},$$

$$R_2' = 0,4665 \text{ о.е.}, \quad M_{ном} = 1293,5 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_k = 1,5 \cdot M_{ном} = 1940,3 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_n = 1,3 \cdot M_{ном} = 1681,55 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad M_c \approx 645 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\text{Тогда } M_{cp} = 1811 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$\Delta W_0 = 499877 \text{ Дж}, \quad \Delta W_0 = 0,13888 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

$$\Delta W = 776396 \text{ Дж}, \quad \Delta W = 0,216 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Потери энергии при работе электропривода с нагрузкой при плавном пуске (рис 6б):

$$\Delta W_{nl} = \Delta W_{np} \cdot 2 \cdot \frac{T_m}{t_1}, \quad (4)$$

где  $\Delta W_{np}$  - потери при прямом пуске,  $T_m$  - электромеханическая постоянная времени.

$$T_m = \frac{J \cdot \omega}{M}, \quad (5)$$

$$\Delta W_{np} = 0,216 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

$$T_m \approx 0,08 \text{ с.}$$

$$t_1 = 4 \text{ с} - \text{время частотного пуска АД в холостую (при } M_c = 0).$$

Тогда получаем  $\Delta W_{nl} = 0,00864 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$

Таким образом, при частотном пуске потери меньше, чем при прямом примерно в  $\frac{\Delta W_{np}}{\Delta W_{nl}} = 25$  раз.

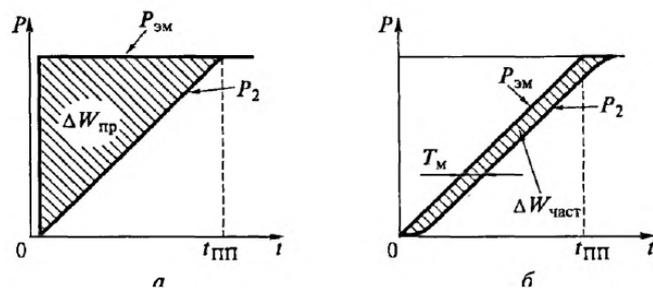


Рис. 6 Потери энергии при прямом (а) и частотном (б) пуске

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ

Мощность трансформатора собственных нужд (ТСН) также оказывает влияние на напряжение на шинах собственных нужд, которое в свою очередь отражается на времени пуска асинхронного двигателя, и при некоторой пороговой минимальной мощности двигатель не сможет выйти в номинальный режим работы. В ходе моделирования было установлено, что при прямом пуске этот порог выше, чем при плавном пуске. При прямом пуске эта мощность ~ 4000 кВА, а при частотном двигатель достигает номинальной скорости вращения и при мощности ТСН 3000 кВА. Это обусловлено тем, что при нерегулируемом пуске падение напряжения на шине СН больше, а так как момент пропорционален напряжению в квадрате, то из-за малого значения напряжения возможен недостаточный пусковой момент, в следствие чего АД не запускается.

Изменение длины или сечения кабеля тоже влияет на напряжение на клеммах двигателя, а, следовательно, и на время пуска. Но чем больше электрическая удаленность двигателя от шины собственных нужд, тем меньше падение напряжения на ней, и это более благополучно отражается на других потребителях электроэнергии этой шины.

Улучшение качества электрической энергии во время частотного пуска приводит к уменьшению вероятности выхода из строя, а также увеличению надежности, эффективности и ресурса дополнительного оборудования, питающегося от шин собственных нужд по сравнению с прямым пуском.

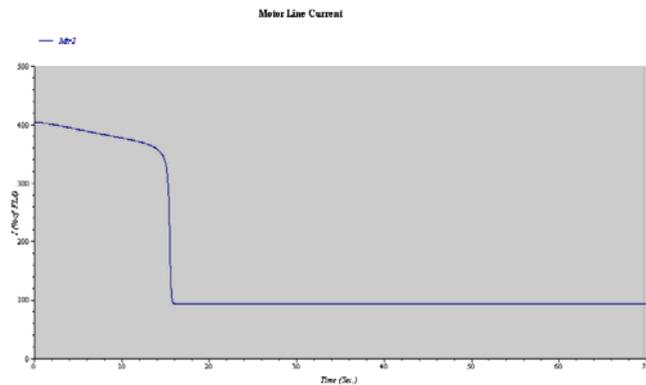


Рис. 7 Ток на клеммах АД в момент прямого пуска

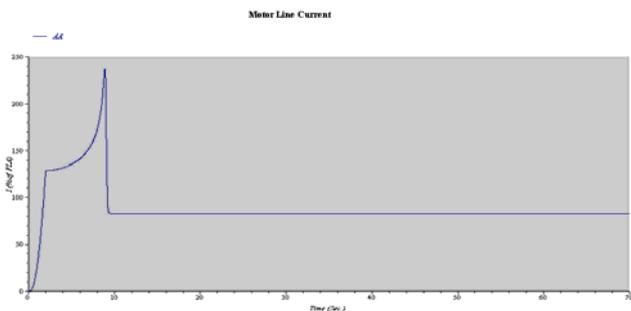


Рис. 8 Ток на клеммах АД в момент плавного пуска

При исходных данных при прямом пуске асинхронного двигателя ток на выводах АД достигает 400% от номинального значения (рис 7). Именно большой пусковой ток вызывает значительное падение напряжения на питающих шинах. Выделяемое тепло на нагрев проводников, как известно, пропорционально квадрату тока, поэтому при пуске электродвигателя резко увеличивается их температура. У двигателей с короткозамкнутым ротором скорость нарастания температуры обмоток статора находится в пределах 5 - 7 °С в секунду [7]. Поэтому затянувшийся процесс пуска АД и, как следствие, протекание пускового тока может вызвать термические перегрузки обмотки, в результате чего может появиться возможность ускорения старения изоляции или ее обгорание, что может стать причиной межвиткового короткого замыкания. Таким образом, прямой пуск АД отрицательно

отражается не только на питающей сети, но и на самом двигателе.

При плавном пуске на клеммах того же двигателя ток достигает 240% от номинального значения (рис 8). Использование ПЧ позволило снизить пусковой ток почти в два раза и время его воздействия на цепь статора на 70%, следовательно, уменьшая термическое воздействие на обмотку АД.

Использование устройств плавного пуска дает возможность: устранить все рывки в механической части привода в момент останова и пуска электродвигателя, увеличить период службы электродвигателя, уменьшить вероятность перегрева электродвигателя, снизить ударные перегрузки с помощью уменьшения пусковых токов электродвигателя [4].

Как видно из исследования, замена нерегулируемых электроприводов регулируемыми на производстве положительно отразится на потребителях и качестве электрической энергии в системе собственных нужд, а также существенно снизит потери электроэнергии при пусках асинхронных двигателей.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на исследование возможности снижения мощности ТСН при использовании ПЧ, снижения сечения кабеля в цепи АД при проектировании электроустановок собственных нужд электростанций, а также исследованию особенностей защиты ЧРП от различных аварийных режимов, включая короткие замыкания и перегрузки.

### Список литературы

- [1] Ильинский, Н.Ф. Москаленко, В.В. Электропривод. Энерго- и ресурсосбережение. – Москва: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
- [2] Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода. - Москва: «Издательский дом МЭИ», 2007. – 224 с.
- [3] Гашимов, А.М., Рахманов Р.Н. Исследование влияния пуска мощных асинхронных двигателей газокomppressorных установок на режим питающей электрической сети. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. - 2012. - №1. – С. 17-22.
- [4] Пантель, О.В. Влияние отрицательных последствий прямого пуска асинхронного двигателя на двигатель, рабочий механизм и питающую сеть // Academy. - 2015. - №2. – С.14-15.
- [5] Enemuoh, F.O, Okafor, E.E, Onuegbu, J.C, Agu, V.N. Modelling, Simulation and Performance Analysis of A Variable Frequency Drive in Speed Control Of Induction Motor [Моделирование, симуляция и анализ производительности частотно-регулируемого привода при регулировании частоты асинхронного двигателя], International Journal of Engineering Inventions, 2013, issue 5, pp. 36-41.
- [6] Семенов, В. Энерго- и ресурсосберегающие технологии в металлургии. // МЕТАЛЛУРГИЯ-ИНТЕХЭКО.- 2008. – С. 8-14.
- [7] Мусин, А.М. Аварийные режимы работы электродвигателей и способы их защиты // Издательство «Колос», 1979. – 111 с.

# УСТРОЙСТВО ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ

А.А. Савельев<sup>1</sup>, А.И. Орлов<sup>2</sup>, С.В. Волков<sup>3</sup>  
ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»  
Йошкар-Ола, Россия

<sup>1</sup>E-mail: savelich94@gmail.com

<sup>2</sup>E-mail: karlorlov@gmail.com

<sup>3</sup>E-mail: svedin2011@mail.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Несимметрия нагрузки в трехфазной сети приводит к электрическим потерям и отрицательно влияет на работу однофазных и трёхфазных электроприемников, что может приводить к их выходу из строя или сокращению срока службы. Проблема несимметрии токов и напряжений вызывает существенные экономические потери и должна быть решена. Проект направлен на решение указанной проблемы путем разработки и создания устройства выравнивания нагрузки коммутационного типа для трехфазных распределительных сетей 0,4 кВ.

**Материалы и методы:** При проведении исследований относительно эффективности предложенного способа выравнивания нагрузки фаз электрической сети применялись методы теоретической электротехники, анализа и синтеза электронных устройств, компьютерное моделирование и физический эксперимент. В качестве инструмента компьютерного моделирования применялось программное обеспечение MATLAB Simulink.

**Результаты:** Подтверждены теоретические предположения относительно предложенного способа решения проблемы несимметрии токов и напряжений. Разработан алгоритм управления устройством выравнивания нагрузки коммутационного типа. Создан экспериментальный образец устройства.

**Выводы:** Внедрение разработанного устройства в распределительные электрические сети позволит снизить коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям, уменьшить разброс фазных напряжений в электрической сети и, как следствие, снизить дополнительные потери в силовых трансформаторах, обусловленные несимметричным режимом работы. Планируется дальнейшая модернизация устройства с целью расширения возможностей его применения для контроля за несанкционированными подключениями к электрической сети, а так же для контроля состояния изоляции и поиска дефектов кабельных и воздушных линий.

**Ключевые слова:** симметрирование, выравнивание нагрузки, силовой ключ, модуль коммутации.

# LOAD BALANCING UNIT FOR THREE-PHASE DISTRIBUTION ELECTRIC MAIN 0.4 kV

A.A. Savelev<sup>1</sup>, A.I. Orlov<sup>2</sup>, S.V. Volkov<sup>3</sup>

Mari State University  
Yoshkar-Ola, Russian Federation

<sup>1</sup>E-mail: savelich94@gmail.com

<sup>2</sup>E-mail: karlorlov@gmail.com

<sup>3</sup>E-mail: svedin2011@mail.ru

## Abstract

**Background:** The unbalance of the load in a three-phase electric main leads to electrical losses and adversely affects the operation of single-phase and three-phase electrical receivers, which can lead to their failure or shorten the life time. The problem of unbalance of currents and voltages causes significant economic losses and must be solved. The aimed of the project is solving this problem by design and producing a load-balancing unit of switching type for three-phase electric main of 0.4 kV.

**Materials and Methods:** In research on the effectiveness of the proposed method for symertizing the load of phases of an electrical main, methods of theoretical electrical engineering, analysis and synthesis of electronic devices, computer simulation and physical experiment were used. The software MATLAB Simulink was used as a computer modeling tool.

**Results:** Theoretical assumptions regarding the proposed method for solving the asymmetry problem for currents and voltages are confirmed. An algorithm for controlling the switching load balancing device is developed. An experimental sample of the device was created.

**Conclusions:** Application of the developed device into distribution electric mains will allow to reduce the voltage asymmetry coefficients of reverse and zero sequences, to reduce the differences of phase voltages in the electric main and, as a consequence, to reduce additional losses in power transformers caused by asymmetric operation mode. It is planned to further upgrade the device in order to expand its possibilities for monitoring unauthorized connections to the power grid, as well as for monitoring the condition of insulation and searching for defects in cable and air lines.

**Key-words:** symmetry, load balancing, power switch, switching module.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В трехфазных городских и сельских электрических сетях существует проблема несимметрии напряжений, возникающая при неравенстве фазных нагрузок между собой. Анализ несимметрии принято выполнять методом симметричных составляющих. Отклонения напряжений отдельных фаз, вызванные несимметрией электрических нагрузок, могут превышать допустимые в стандарте [1] значения. Несимметрия напряжений, характеризуемая коэффициентами по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям, неблагоприятно влияет на работу однофазного и трехфазного электрооборудования. Так, для некоторых однофазных электроприемников отклонение напряжения в любую сторону приводит к существенному сокращению их срока службы или отказам. Трехфазные асинхронные электродвигатели, составляющие основу современного электропривода и являющиеся основными потребителями электроэнергии, при несимметричном питающем напряжении имеют пониженную перегрузочную способность, при той же нагрузке работают с повышенным скольжением и, следовательно, имеют более высокие потери. Составляющие обратной последовательности вызывают колебания электромагнитного момента и мгновенной мощности, дополнительные потери в магнитопроводах, ошибки в работе устройств релейной защиты и счетчиков электроэнергии.

## II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА СИММЕТРИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Проблеме несимметрии напряжения, обоснованию ее актуальности с точки зрения дополнительных потерь в элементах системы электроснабжения посвящено множество работ. Так, Дед А.В. и др. в работе [2] отмечают актуальность расчета несимметричных режимов в системах электроснабжения и указывают, что среди суммарных дополнительных потерь наибольшее значение имеют потери от токов нулевой последовательности. Вохидов А.Д. и Немцев Г.А. в работе [3] предлагают простое уравнение, определяющее дополнительные потери от несимметрии в распределительной сети 0,4 кВ в зависимости от величины коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности, а также методику и алгоритм расчета этих потерь. Работа Курилина С.П. [4] посвящена энергетическим режимам отдельных сельскохозяйственных установок при несимметрии напряжения. В качестве основного средства обеспечения нормативных отклонений напряжения авторы называют использование трансформаторов 35–110/10 кВ с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой, в качестве дополнительных – установку конденсаторов поперечного включения, увеличение сечений проводов ЛЭП, установку регулировочных автотрансформаторов на линиях 10 кВ.

Симметрирование электрической сети на этапе проектирования не позволяет в полной мере избавиться от обозначенной проблемы по причине развития сети с течением времени и вероятностного характера изменения фазных нагрузок.

Современные технические решения, направленные на устранение проблемы несимметрии электрических сетей, по принципу работы и используемым техническим средствам можно разделить на 3 группы. К первой группе относятся статические устройства, бесступенчато перераспределяющие мгновенную мощность между фазами электрической сети. Принцип работы и технические возможности такого оборудования, включая активные фильтры гармоник, статические компенсаторы реактивной мощности и другие устройства подробно раскрыты в работах [5, 6, 7, 8]. Несмотря на огромный потенциал подобных технических средств, высокая стоимость сдерживает их широкое распространение. Ко второй группе относятся симметрирующие трансформаторы. К третьей – устройства равномерного распределения электрической нагрузки по фазам электрической сети за счет выполнения электрической сети. Пример подобного устройства, позволяющего подключать однофазных потребителей к определенным фазам электрической сети в зависимости от ее фазных токов, приведен в описании патента [9]. В работе [10] предложена конструкция коммутатора фазной нагрузки, алгоритм работы которого заключается в измерении фазных токов и выборе на их основе схемы соединения фаз нагрузки с фазами электрической сети с целью минимизации тока в нейтральном проводе четырехпроводной системы электроснабжения. Однако приведенные схемы не оптимальны в отношении количества коммутационных элементов. Кроме того авторы работы [10] не предлагают решения проблемы циклических коммутаций, возникающих в результате работы приведенного устройства. В работах [11, 12, 13] даются структурные схемы и алгоритмы работы многофазного устройства выравнивания нагрузки.

## III. УСТРОЙСТВО ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ

Устройство выравнивания нагрузки предназначено для выравнивания фазных нагрузок электрической сети между собой путем переключения потребителей с более нагруженной фазы на менее нагруженную без изменения исходного порядка чередования фаз. Необходимость соблюдения порядка чередования фаз связана с тем, что в составе нагрузки, подключенной к электрической сети через устройство, могут содержаться многофазные электроприемники, такие как, электрические двигатели. В этом случае для выравнивания нагрузки электрической сети в целом применима только круговая перестановка фаз нагрузки относительно фаз электрической сети. Количество вариантов перестановок равно количеству фаз электрической сети.

Структурная схема рассматриваемого устройства выравнивания нагрузки в трехфазном исполнении, его возможное конструктивное исполнение, а также алгоритмы управления для случая отсутствия в составе электроприемников трехфазной нагрузки представлены в работах [11, 12, 13]. Блок-схема устройства, его расположение относительно узла электрической сети и основные конструктивные элементы показаны на рис. 1.

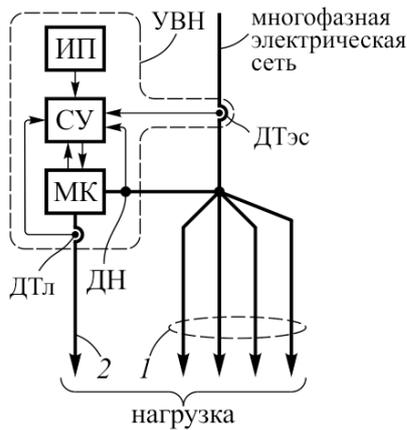


Рис. 1. – Блок схема устройства выравнивания нагрузки: 1 – отходящие линии; 2 – отходящая линия устройства выравнивания нагрузки.

Устройство выравнивания нагрузки УВН содержит датчики напряжения ДН фаз электрической сети и нейтрального провода, датчики фазных токов электрической сети ДТэс и датчики фазных токов отходящей линии симметрирующего устройства ДТл, контроллер К, предназначенный для обработки исходных сигналов и выполнения вычислений, а также модуль коммутации МК, служащий для реализации выбранной схемы подключения фаз нагрузки к фазам электрической сети и интерфейс пользователя ИП. Выбор схемы подключения фаз нагрузки к фазам электрической сети, обеспечивающей минимальный коэффициент несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям в точке общего присоединения нагрузок, выполняется контроллером К в соответствии с алгоритмом управления. Этот выбор осложняется наличием некоторой несимметрии фазных напряжений и токов, а также нелинейностью вольт-амперных характеристик потребителей, входящих в состав нагрузки.

Для управления устройством выравнивания нагрузки разработано несколько алгоритмов. Результаты анализа влияния алгоритмов управления устройством на коэффициенты несимметрии напряжения по нулевой и обратной последовательностям в точке общего присоединения нагрузок к электрической сети приведены в работе [13]. В ней также определены границы применения предложенных алгоритмов управления.

#### IV. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Устройство выравнивания нагрузки представляет собой коммутационный аппарат, управляемый контроллером. Система управления (контроллер) выполнена в трехфазном исполнении. Измерение фазных токов и напряжений производится на основании сигналов с первичных преобразователей. В качестве последних для измерения напряжений приняты резистивные делители напряжения.

Для измерения тока рассмотрены три варианта первичных преобразователей: измерительный шунт, датчик холла; измерительный трансформатор тока.

Результаты экспериментов показывают, что наиболее предпочтительным является трансформатор тока, поскольку он не создает дополнительных помех и обеспечивает гальваническую развязку измерительной цепи от силовой. Цепь измерения тока показана на рис. 2.

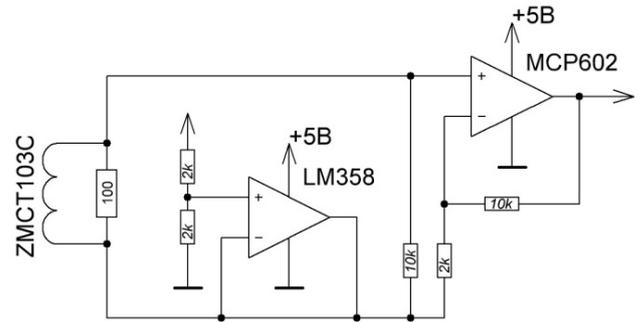


Рис. 2. – Измерительные цепи напряжения

Все необходимые измерения, а так же вычисление предпочтительного с точки зрения симметрии способа перераспределения отходящих линий нагрузки по фазам электрической сети осуществляет запрограммированный для этой цели AVR микроконтроллер АТmega8А, рис. 3.

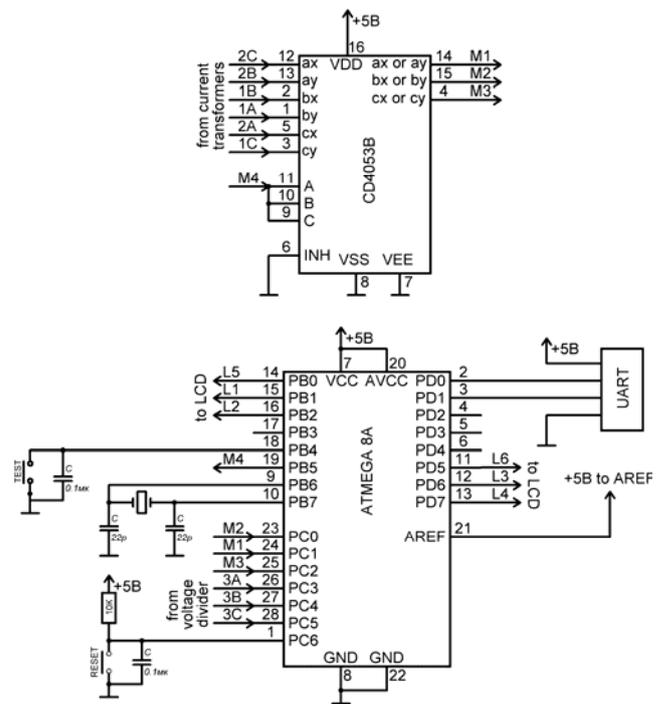


Рис. 3. – Схема подключения микроконтроллера

Схема включает сам микроконтроллер АТmega8А, мультиплексор CD4053В, выводы для подключения LCD 1602А, последовательный интерфейс UART, кнопку перезагрузки, кнопку запуска тестового режима, внешний тактовый генератор, собранный на кварцевом резонаторе и двух конденсаторах.

Мультиплексор CD4053B расширяет число каналов, подключенных к АЦП микроконтроллера до девяти, делая возможным измерение всех необходимых сигналов: трех фазных токов от источника, трех фазных токов отходящих линий, трех фазных напряжений сети.

Микроконтроллер реализует предпочтительный с точки зрения симметрии способ перераспределения отходящих линий нагрузки по фазам электрической сети, выполняя необходимые для этого коммутации посредством силовых ключей. Связь микроконтроллера с блоком силовых ключей осуществляется через последовательный интерфейс UART.

Управляющая программа для микроконтроллера ATmega8A написана на языке C++. Быстродействие микроконтроллера удвоено переключением его на внешний генератор тактовых сигналов частотой 16 МГц, выполненный в виде кварцевого резонатора.

На основе предложенной схемы создан образец устройства выравнивания нагрузки, работоспособность которых подтверждена экспериментально. Внешний вид системы управления показан на рис. 4.



Рис. 4. – Экспериментальный образец системы управления

#### V. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВА ВЫРАВНИВАНИЯ НАГРУЗКИ.

Технико-экономический эффект от применения симметризирующего устройства объясняется следующим.

1. Симметрируется электрическая сеть в целом, что приводит к нормализации отклонений напряжения в соответствии с [1] по обратной и нулевой последовательности.

2. Нормализуется качество электроэнергии, что приводит к сокращению потерь электроэнергии в электрических сетях и электрооборудовании потребителей. Применение совместно с симметрирующими трансформаторами позволит значительно сократить коэффициенты несимметрии по обратной последовательности.

3. Появляется возможность контроля за несанкционированными подключениями потребителей в разветвленных линиях электропередачи, оснащенных

симметрирующими устройствами. Обеспечивается возможность локализации несанкционированных подключений.

4. За счет цифровой системы управления и дистанционного контроля за системой симметрирующих устройств появляется возможность применения разработки в существующих интеллектуальных электрических сетях.

5. Значительно сниженная стоимость симметрирования электрической сети по сравнению с аналогичными.

Таким образом, существующая проблема несимметрии токов и напряжений в трехфазных электрических сетях может быть решена. С этой целью разработан способ симметрирования нагрузки для трехфазных электрических сетей и система управления, реализующая предложенный способ. Рассмотрены особенности устройства системы управления и экспериментально подтверждена работоспособность устройства выравнивания нагрузки.

#### Список литературы

- [1] ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Изд-во стандартиформ, 2014. – 17с.
- [2] Оценка дополнительных потерь мощности от несимметрии напряжений и токов в элементах систем электроснабжения / Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 10 (часть 3). – С. 421-425.
- [3] Вохидов А.Д., Немцев Г.А. К определению потерь мощности при несимметричной нагрузке // Вестник Чувашского университета. 2015. № 1. С. 56-58.
- [4] Курилин С.П. Развитие теории несимметричных режимов и энергетических процессов асинхронных двигателей сельскохозяйственных электроустановок: дис. докт. техн. наук. М., 2005. 367 с.
- [5] G. Eason, B. Noble, and I.N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 529-551, April 1955. (references)
- [6] Zagrodnic M.A., "Three-Phase AC electrical system, and method for compensating an inductance imbalance a system". Patent US 9500182 B2, Nov. 22, 2016.
- [7] Akagi H., Hagiwara M., "Single-Phase power converter, three-phase two-phase power converter, and three-phase power converter". Patent US 9596805 B2, Nov. 15, 2016.
- [8] Oberzaucher F., Krenhuber G. "Voltage switch-over device". Patent US 6369548 B1, Apr. 9, 2002.
- [9] Давид Яир, Виттнер Лупу Устройство равномерного распределения электрической нагрузки по n-фазной сети распределения электроэнергии. Патент РФ № 2200364, приоритет от 05.12.1997.
- [10] Венедиктов С.В., Иванов П.В., Андреева З.А., Державин А.С. Алгоритм функционирования и расчетная модель автоматического коммутатора нагрузки / Материалы X Международной научной школы «Наука и инновации – 2015».
- [11] Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Анализ влияния устройства выравнивания нагрузки на показатели несимметрии электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2016. № 3. С. 100-109.
- [12] Орлов А.И., Волков С.В., Савельев А.А. Алгоритмы управления трехфазным устройством выравнивания нагрузки электрической сети // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 162-172.
- [13] Заявка на пат. № 2016127923, 11.07.2016. Способ симметрирования многофазной электрической сети и устройство для его реализации / Орлов А.И., Савельев А.А.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

А.А. Губарев<sup>1</sup>, А.О. Егоров<sup>1</sup>, Е.А. Люханов<sup>1</sup>, С.Н. Шелюг<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: [gubarev.anton96@gmail.ru](mailto:gubarev.anton96@gmail.ru), [a.o.egorov@urfu.ru](mailto:a.o.egorov@urfu.ru), [caluhanov@yandex.ru](mailto:caluhanov@yandex.ru), [s.n.shelyug@urfu.ru](mailto:s.n.shelyug@urfu.ru)

**Аннотация** – Обеспечение надёжного и бесперебойного электроснабжения экспериментальных физических установок и обеспечение качества электроэнергии (ПКЭ) на их зажимах является залогом их нормальной и безопасной работы, является залогом проведения успешных физических экспериментов. Исследования в области влияния таких установок на ПКЭ отсутствуют, но тема является крайне актуальной в связи с повышенной научной активностью в данной области. Задача исследования режимов работы таких установок и их влияния на ПКЭ требует специальных исследований. В ходе эксплуатации таких ускорителей зафиксированы серьёзные искажения ПКЭ в части несинусоидальности напряжений и токов, несимметрии нагрузки по фазам. Для выявления причин искажения ПКЭ на ускорителе элементарных частиц и принятия мер по их устранению выполнен комплекс электрических измерений. Анализатором-регистратором СА-8335+ производится запись на жёсткий диск ПКЭ с дискретность в 1 секунду в течение двух суток работы электроустановки. Проводится обработка и анализ полученных данных, оформляется отчёт о комплексном энергетическом обследовании. Получены графики всех нормируемых ПКЭ с дискретностью в 1 секунду: напряжений и токов по фазам, содержание гармонических составляющих. Построен суточный график нагрузки электроустановки. Выполнена оценка симметрии по фазам и синусоидальности питающего напряжения. Сделаны выводы о соблюдении ПКЭ в системе электроснабжения установки. Ускорители элементарных частиц относятся к отдельной группе электроприёмников, вносящих искажения напряжений и несимметрию по фазам напряжений и токов. Необходимо выполнять специальные требования к их системам электроснабжения.

**Ключевые слова** – показатели качества электроэнергии, режимы работы ускорителей элементарных частиц

## RESEARCH OF PARTICLE ACCELERATOR ELECTRIC OPERATING MODES

A.A. Gubarev<sup>1</sup>, A.O. Egorov<sup>1</sup>, E.A. Lyukhanov<sup>1</sup>, S.N. Shelyug<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

E-mail: [gubarev.anton96@gmail.ru](mailto:gubarev.anton96@gmail.ru), [a.o.egorov@urfu.ru](mailto:a.o.egorov@urfu.ru), [caluhanov@yandex.ru](mailto:caluhanov@yandex.ru), [s.n.shelyug@urfu.ru](mailto:s.n.shelyug@urfu.ru)

**Abstract** – Ensuring reliable and uninterrupted power supply of test physical installations on its clamps and power quality assurance is the key to its normal and safe work and therefore the key to carrying out successful physical experiments. Researches concerning power quality indices (PQI) in the field of such installations are absent but the subject is extremely urgent in because of increased scientific activity in this field. The research problem of such installations operating modes and its influence on PQI requires special researches. Serious PQI distortions regarding voltage and current uninusoidality and loading unbalance on phases are registered within accelerators operation. To indicate the reasons of PQI distortion on the particle accelerator and to take corrective measures the complex of electric measurements is executed. The CA 8335+ logger makes PQI record on its hard disk drive with 1 s discretization within two days of electric installation operation. Processing and analysis of the obtained data is carried out; the report on integrated power research is made out. Diagrams of all normalized PQI with 1 s discretization are received: voltages and currents on phases, the harmonious components content. The daily production load curve of electric installation is created. The assessment of symmetry on phases and the supply voltage harmonicity is executed. Conclusions on PQI observance in system of installation power supply are drawn. Particle accelerators belong to the separate group of electroreceivers introducing voltage distortions and asymmetry of voltage and currents on phases. It is necessary to meet special requirements to its systems of power supply.

**Keywords** – power quality indices, particle accelerator operating modes.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Оценка влияния работы ускорителя элементарных частиц (УЧ) на показатели качества электроэнергии (ПКЭ) является актуальной энергетической задачей в связи с повышением научной и деловой активности учёных, работающих в области ядерной физики. Высокий интерес представляет ответ на вопрос, как обеспечивается качество электроэнергии, для электроснабжения подобных установок и как такие установки, например, ускорители элементарных частиц, влияют непосредственно на ПКЭ [1]. Несоответствие ПКЭ нормативным значениям может повлечь перебои в работе

УЧ, прервать важный высокотехнологичный наукоёмкий процесс, поэтому необходим анализ всех возможных причин ухудшения качества электроэнергии, в том числе и влияние УЧ на ПКЭ (прямая и обратная задача).

### II. ИЗМЕРЕНИЕ

Для исследования режимов работы системы электроснабжения УЧ и самого УЧ используется УЧ, установленный в Филиале Уральского федерального университета. Измерения ПКЭ производилось по 3-х фазной 5-ти проводной схеме [2], в соответствии с Рис.1. В качестве измерительного прибора был использован

регистратор – анализатор ПКЭ Chauvin Arnoux CA 8335+, работающий с дискретностью 1 секунда для действующих значений. Также, в отдельных режимах, производилась регистрация ПКЭ с циклом измерения 256 точек на период 0,02 секунды. Снятие ПКЭ и графиков нагрузки осуществлялось в течение двух суток – рабочих дней пятницу и понедельник. Конец пятницы можно считать выходным днём, когда нагрузка сильно отличается от рабочего дня. Системы жизнеобеспечения УЧ работают непрерывно и являются постоянной нагрузкой.

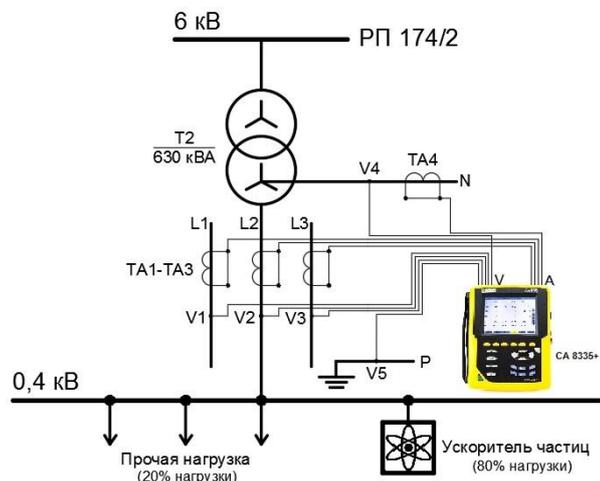


Рис.1. Схема подключения измерительного прибора

Ускоритель является уникальной сложной и многоставной электроустановкой, его установленная мощность неизвестна, но его проектная трёхфазная мощность оценивается в 250 кВА. Нагрузка УЧ составляет 80% от всей нагрузки на шинах 0,4 кВ. Номинальная мощность силового трансформатора, установленного в РП 174 и питающего УЧ, составляет 630 кВА.

### III. ГРАФИКИ

На основании полученных измерений были сформированы графики нагрузки. Ввиду схожести графиков для двух дней измерений на Рис.2 представлена нагрузка пятницы, где условно присутствует рабочий и выходной день. Напряжения, измеренные в фазах, представлены на Рис.3. Напряжение на нулевом проводе было всё время наблюдения стабильным и колебалось возле отметки «0», что говорит о хорошей симметрии напряжений. Суммарные коэффициенты гармонических искажений приведены на Рис.4.

Каждый график дополнен средним значением параметра на интервале измерения, приведены максимальное и минимальное значения. На всём интервале наблюдения среднесуточное напряжение составило 229,38; 228,92 и 228,67 В в фазах А, В и С соответственно, с нерегулярным колебанием  $\pm 3В$

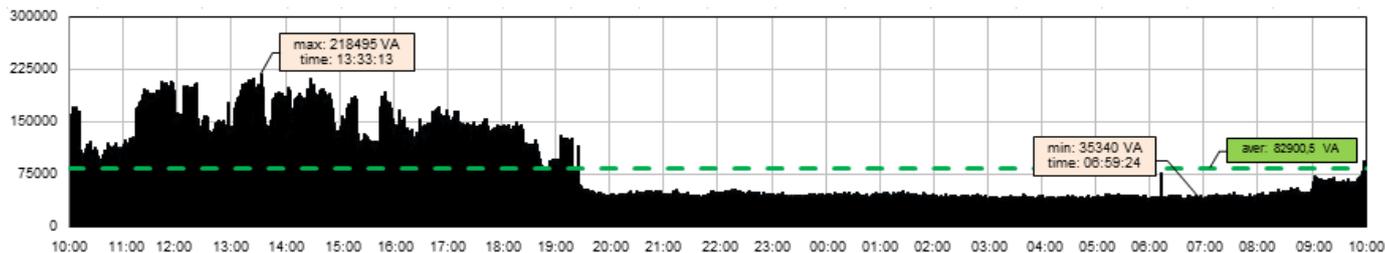


Рис.2. График нагрузки трансформатора в пятницу (максимум – 218,50 кВА; минимум – 35,34 кВА), S, (ВА)

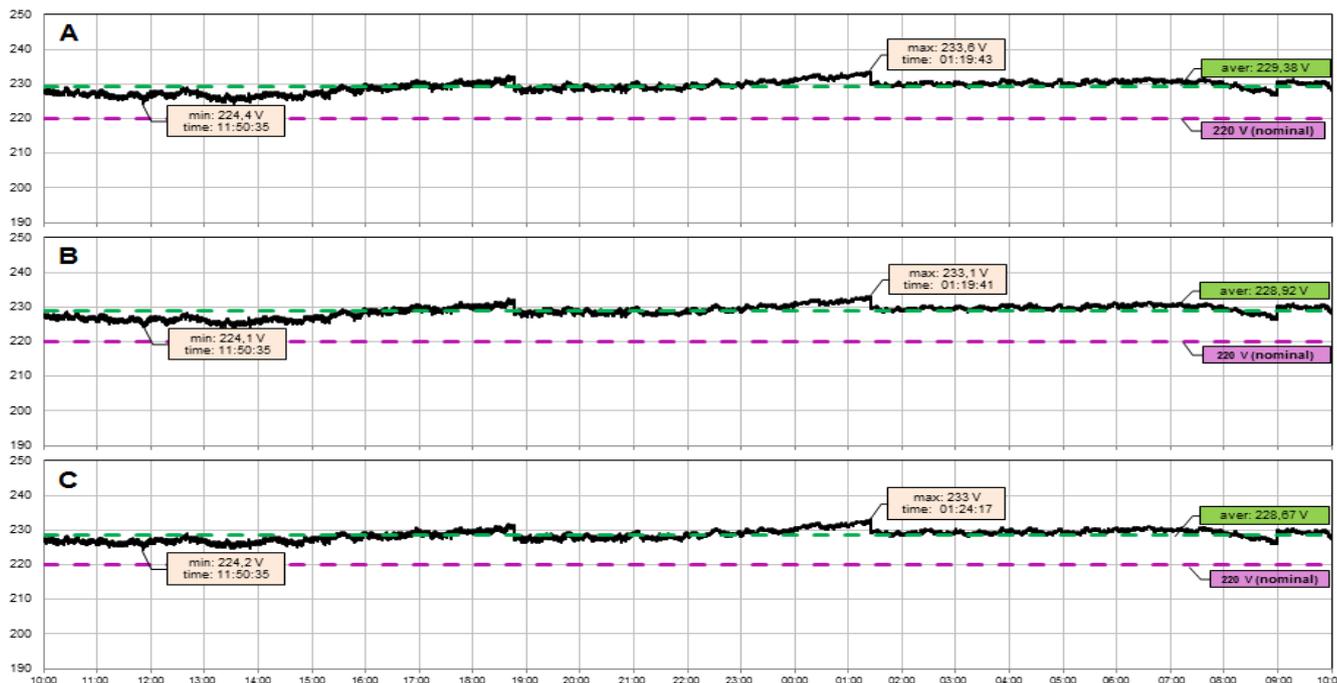


Рис.3. Напряжение на фазах центра питания РП 174/2 U, (В)

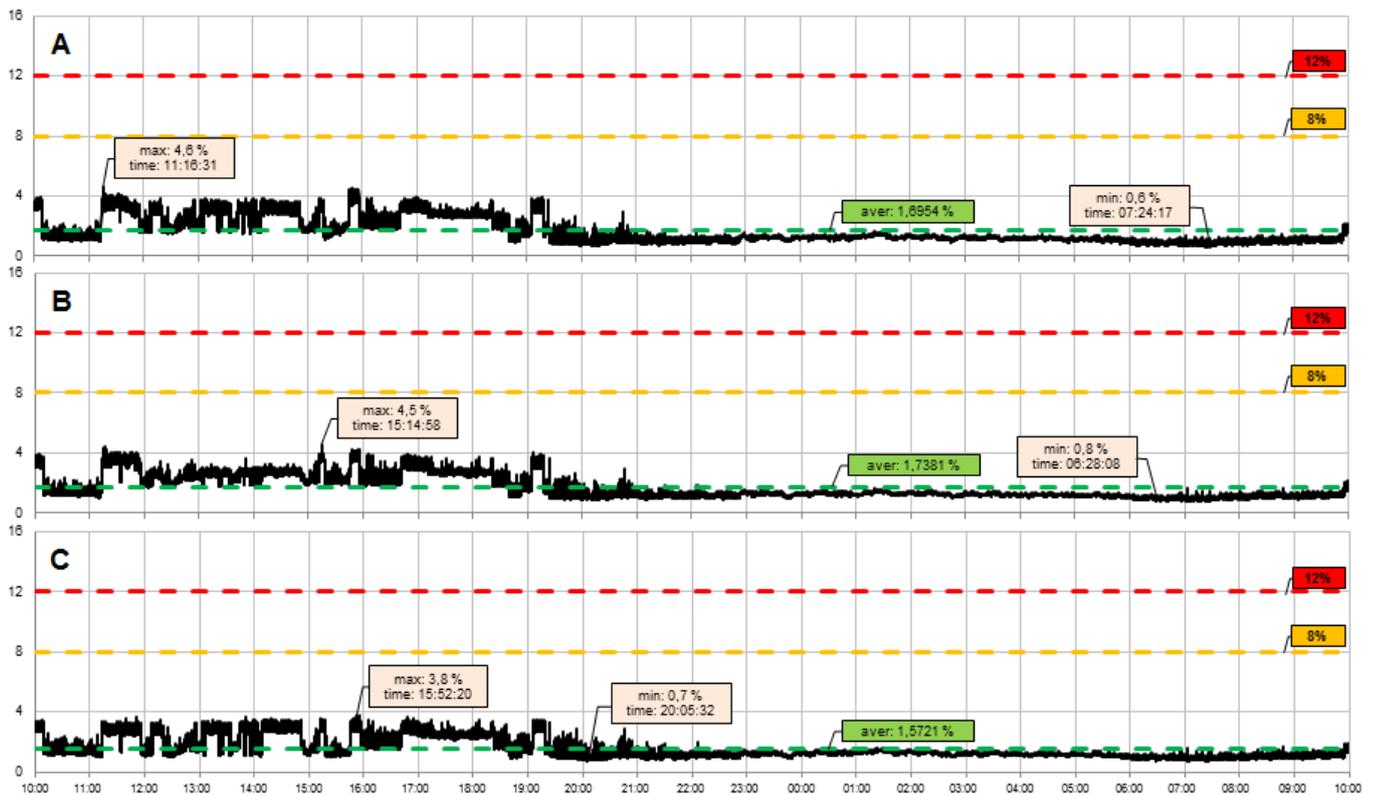


Рис.4. Суммарный коэффициент гармонических искажений на фазах и в нулевом проводе, THD, (%)

#### IV. АНАЛИЗ

В соответствии с полученными данными, на всем измеряемом интервале, уровень отклонения напряжения не превышает 10% допустимых ГОСТ [1]. Значение суммарного коэффициента гармонических искажений так же находится в допустимых пределах и не превышает 5%.

Однако, как видно из графиков, в период роста нагрузки, значения напряжения на фазах снижаются и наблюдается рост суммарного коэффициента гармонических искажений. В Таблице I представлены несколько значений параметров режима работы измеряемого оборудования. Видно, что с ростом загруженности силового трансформатора происходит снижение напряжение и увеличение коэффициента гармонических искажений. Отклонение напряжений от номинального значения соответствующее максимуму

нагрузки и составляет для фаз А, В и С соответственно 4,6 В (2,09 %), 4,5 В (2,04 %) и 5 В (2,27%). Значение суммарного коэффициента гармонических искажений, соответствующее максимуму нагрузки, составляет для фаз А, В и С соответственно 2,1 %, 1,9 % и 1,9 %. Данные значения находятся в пределах, допустимых по ГОСТу.

Значения напряжения и тока за период основной частоты и гармонический состав для трёх фаз и нулевого провода представлены на Рис.5-8. Видно, что при небольших искажениях синусоиды напряжения имеется относительно симметричный несинусоидальный ток во всех 3х фазах. Также наблюдается несинусоидальный ток в нейтральном проводе, вызванный несимметрией гармонических составляющих фазных токов.

Таблица I. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА РАБОТЫ УЧ

День	Параметр								Время
	$S, VA$	Загрузка тр-ра, %	$U_A, B$	$U_B, B$	$U_C, B$	$THD_A, \%$	$THD_B, \%$	$THD_C, \%$	
Пятница	218 495 (max)	34,68	224,6	224,5	225	3,3	2,7	3,1	13:33:13
	35 340 (min)	5,61	230,5	230,2	229,8	1	1,1	1	6:59:24
Понедельник	208 619 (max)	33,11	226,4	226,3	225,4	2,1	1,9	1,9	11:11:31
	37 426 (min)	5,94	230,1	229,8	229,5	1,2	1,2	1,2	5:34:24

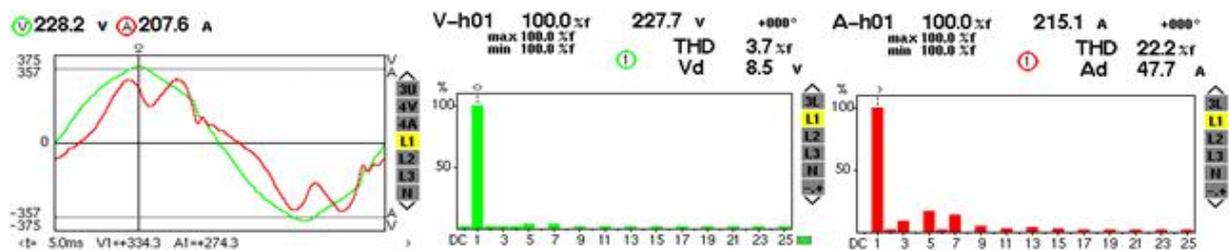


Рис.5. Напряжение и ток на периоде, гармонический состав, фаза А

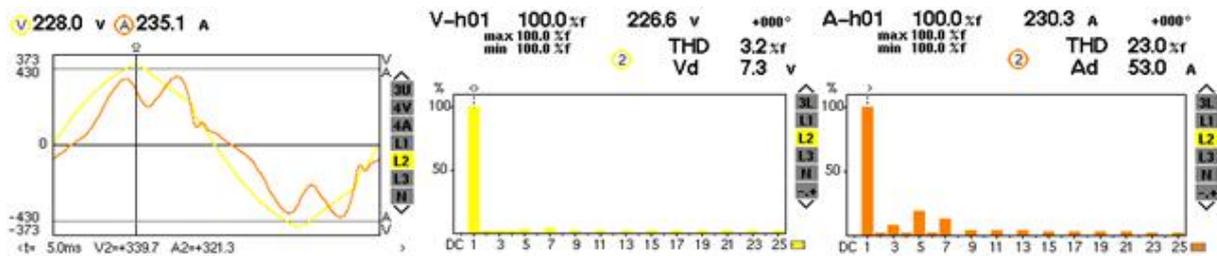


Рис.6. Напряжение и ток на периоде, гармонический состав, фаза В

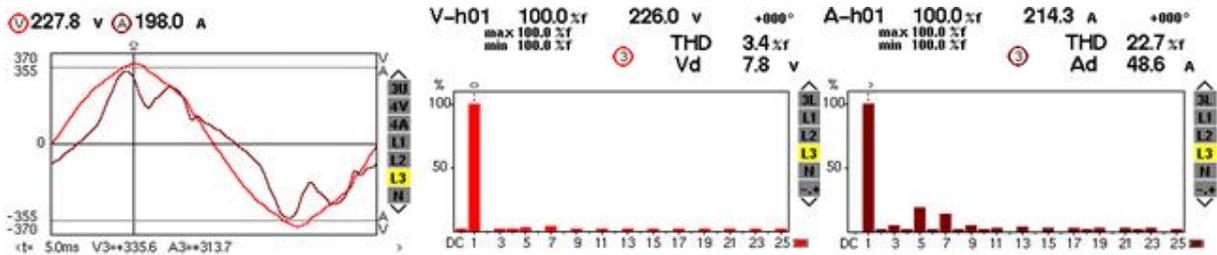


Рис.7. Напряжение и ток на периоде, гармонический состав, фаза С

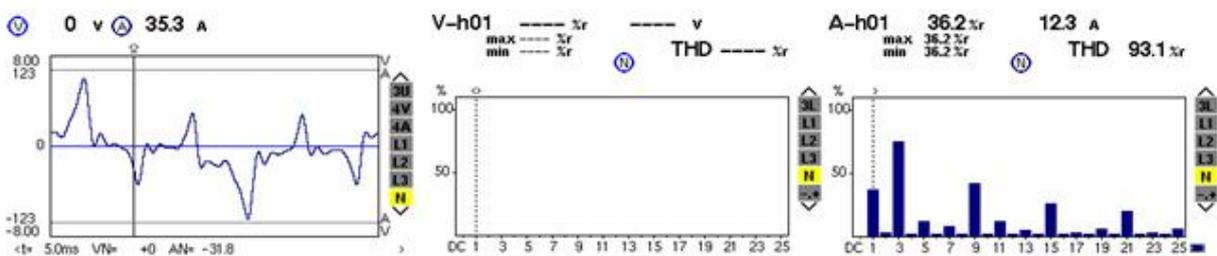


Рис.8. Напряжение и ток на периоде, гармонический состав, нулевой провод

## V. Выводы

В ходе исследования получены и проанализированы электрические параметры режимов работы и параметры качества электроэнергии (ПКЭ) при работе трёхфазного ускорителя элементарных частиц (УЧ). Исследование показало, что работа УЧ сопровождается снижением напряжения, увеличением суммарного коэффициента гармонических искажений в фазных напряжениях и токах, то есть отклонением основных параметров от номинальных значений тем больше, чем выше нагрузка на силовой трансформатор. Особенностью работы УЧ является несинусоидальные токи за счёт присутствия гармоник 3, 5, 7 и 9й гармоник с долей до 20%, не вносящих серьёзных искажений в ПКЭ. Все отклонения, зарегистрированные за всё время наблюдения и вносимые УЧ в течение его цикла работы, находятся в допустимых пределах, качество электроэнергии соответствует ГОСТ [1] и электроустановки работают нормально. При схеме электроснабжения от отдельного центра питания, УЧ не наносит сильные и явные искажения в параметры качества электроэнергии.

## Список литературы

[1] ГОСТ 32144-2013 “Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”, 2013.  
 [2] ГОСТ 12.3.019-80 “Система стандартов безопасности труда. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности”, 1986.

[3] Хальясмаа, А. И.; Дмитриев, С. А.; Кокин, С. Е., “Энерго-информационные модели функционирования и развития систем электроснабжения больших городов”, 2013.  
 [4] Ярошко, В. М.; Никишова М. В.; Муляр Е. В., “Задача оптимального распределения суточной нагрузки электропотребителя”, Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета №06, 2004, с. 2-6.  
 [5] Verwers, J.L.; Sovers, J.R., “Challenges of supplying electric power to a large industrial customer in rural areas” Industry Applications, IEEE Transactions on (Volume:36, Issue: 4), pp. 972-977.  
 [6] Rudnick, H.; Mutale, J.; Chattopadhyay, D.; Saint, R., “Studies in Empowerment: Approaches to Rural Electrification Worldwide”, Power and Energy Magazine, IEEE (Volume:12, Issue: 4), pp. 35-41.

# Рекуперация тепла в системах приточно-вытяжной вентиляции посредством обратимого термодинамического цикла

А.Ю. Росляков  
Филиал АО «СО ЕЭС» Хакаское РДУ  
г. Абакан, Россия  
sunrox@yandex.ru

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Важнейшим элементом энергосбережения в жилых и промышленных зданиях является эффективная вентиляция с точки зрения тепловых потерь. К сожалению, в России вентиляционные системы развиты слабо, на что есть объективные причины – суровый климат. В зимний период расходы на прогрев приточного воздуха могут превышать расходы на отопление, что вынуждает домовладельцев и организации отказываться от вентиляции. Применение существующих рекуператоров снижает эксплуатационные затраты, но поднимает капитальные, а сами рекуператоры способны отказывать при низких температурах из-за обмерзания. Радикально решить вопрос эффективной и надежной вентиляции может схема рекуперации, основанная на обратимом термодинамическом цикле Карно.

**Материалы и методы:** Необходимые обоснования выполнены посредством тепловых расчетов. Проведены натурные испытания на уменьшенной физической модели.

**Результаты:** Исследование показало работоспособность приведенной схемы рекуперации, ее универсальность и вместе с тем экономическую эффективность. Выяснилось, что ее можно использовать в режиме отопления и кондиционирования. В рамках исследования предложены перспективные рационализаторские идеи в области конструкции компрессора.

**Выводы:** Внедрение предложенной схемы рекуперации на основе обратимого термодинамического цикла позволяет органично решить проблему энергоемкости вентиляции в холодное время года, а также отказаться от традиционных систем отопления и кондиционирования, в непрерывном режиме снабжая помещения свежим воздухом.

**Ключевые слова:** вентиляция, отопление, кондиционирование, термодинамический цикл, инженерные системы, энергетическая эффективность, климат-контроль, воздушный компрессор.

## The heat recovery systems of ventilation through a reversible thermodynamic cycle

Alexander Roslyakov  
The branch of JSC "SO UPS" Khakass RDU  
Abakan, Russian Federation  
E-mail: sunrox@yandex.ru

## Abstract

**Background:** The most important element of energy saving in residential and industrial buildings is an effective ventilation from the point of view of heat loss. Unfortunately, in Russia the ventilation system is poorly developed in that there are objective reasons – the harsh climate. In the winter, the cost of heating the supply air can exceed the cost of heating, forcing homeowners and organizations to renounce ventilation. The application of existing heat exchangers reduces operating costs but raises capital, and the heat exchangers are able to refuse at low temperatures due to freezing. Radically solve the issue of effective and reliable ventilation can recovery scheme based on reversible thermodynamic Carnot cycle.

**Materials and Methods:** The feasibility studies have been performed by means of thermal calculations. Conducted full-scale tests on reduced physical model.

**Results:** The study showed the efficiency of recovery, her versatility and however economic efficiency. It turned out that it can be used in the mode of heating and air conditioning. The study proposed a promising innovation ideas in the field of compressor design.

**Conclusions:** Implementation of the proposed recovery scheme based on reversible thermodynamic cycle allows us to seamlessly solve the problem of the intensity of ventilation in the cold season, as well as to abandon the traditional systems of heating and air conditioning, in continuous operation supplying the premises with fresh air.

**Key-words:** ventilation, heating, air-conditioning, thermodynamic cycle, system engineering, energy efficiency, climate control, air compressor.

## I. ЗНАЧЕНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ

Микроклимат воздушной среды характеризуется 4-мя важными параметрами, влияющими на здоровье человека:

- свежесть воздуха;
- чистота воздуха;
- влажность;
- температура.

Таким образом для обеспечения длительного, комфортного пребывания человека в помещении эти 4 параметра необходимо контролировать на должном уровне. Традиционно эта задача решается установкой соответствующих инженерных систем жизнеобеспечения:

- системы отопления;
- системы кондиционирования;
- системы приточно-вытяжной вентиляции;

Учитывая климатические особенности России, использование приточно-вытяжной вентиляции в холодный период года связано с определенными трудностями, главная из которых энергозатратность. Подогрев холодного приточного воздуха при соблюдении норм СанПиНа по воздухообмену сопоставим по энергозатратам с отоплением либо превышает его, при этом тепло удаляемого вытяжкой воздуха теряется безвозвратно. Применение рекуператоров повышает энергетическую эффективность вентиляции до 75 %, но увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты, при этом эксплуатация самих рекуператоров при низких температурах представляет определенные трудности.

## II. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ

К настоящему времени разработаны, опробованы и представлены на рынке несколько типов рекуператоров (воздух-воздух) для систем вентиляции:

### A. Пластинчатые

В самом простом виде этот тип рекуператоров представляет собой обычный теплообменник воздух-воздух. Главный его недостаток – это обмерзание конденсата на вытяжке при низких температурах наружного приточного воздуха (начиная с  $-10^{\circ}\text{C}$ ). Эту проблему решают такими способами как:

- установкой байпаса на линии притока с электро- или водо-подогревом;
- применением метода стратификации для организации непрерывного процесса разморозки;
- использованием дополнительных секций (2-х, 3-х секционные версии);
- применением пластин из гигроскопичной (влагопроницаемой) целлюлозы.

Все применяемые методы разморозки приводят к усложнению и соответственно удорожанию конечного изделия, сводя на нет главное достоинство пластинчатых рекуператоров – простоту и неприхотливость в эксплуатации. КПД пластинчатого рекуператора

варьируется в широких пределах – от 0% до 70% (среднее 50%) в зависимости от конструкции и условий применения.

### B. Роторные

Ядро роторного рекуператора – это тепловой аккумулятор в виде ротора, способный при вращении циклически принимать и отдавать тепло проходящих через него воздушных потоков. Несмотря на то, что он имеет подвижные части, его конструкция относительно проста. Главный же недостаток – неизбежное смешивание приточного и вытяжного воздуха в количестве до 5%, что исключает применение этого типа рекуператоров в «чистых» помещениях. Второй недостаток менее выражен – это обмерзание, однако оно легко устраняется штатными средствами (регулировками), ценой снижения производительности. КПД роторных рекуператоров выше, чем у пластинчатых и составляет в среднем 75%. Приведенная стоимость так же выше.

### C. Фреоновые

Этот тип рекуператора является типичным тепловым насосом, перекачивающим тепло с теплообменника на вытяжке в теплообменник на притоке или наоборот в зависимости от сезона. Промежуточный теплоноситель – разновидность фреона. Главным недостатком фреонового рекуператора, как и теплового насоса, является его высокая стоимость. Сложная конструкция и тяжелые условия эксплуатации (большой перепад температур и высокое значение ПВ) приводит к тому, что этой системе свойственны и все недостатки систем кондиционирования с «зимним комплектом», включая высокие эксплуатационные издержки.

Т.к. фреоновый рекуператор предполагает разделение потоков приточного и вытяжного воздуха, то казалось бы, его можно использовать в «чистых помещениях», однако всегда есть риск утечки хладагента, поэтому и здесь их применение нецелесообразно. Достоинством фреоновых рекуператоров, как и любых парокompрессионных машин, является высокое значение холодильного коэффициента (3-4 ед.), что в конечном счете делает их достаточно энергоэффективными. Но при достижении отрицательных температур на испарителе в вытяжном канале мы опять сталкиваемся с обмерзанием. Таким образом и эта система подвержена хроническому, для российского климата, недостатку.

При комбинировании различных типов рекуператоров можно снизить риск обмерзания и при этом повысить общую энергоэффективность системы, конечно же, ценой роста ее стоимости и снижения надежности.

## III. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ РЕКУПЕРАЦИИ

Проблема обмерзания рекуператоров в зимний период может быть достаточно элегантно решена за счет свойств самого воздуха. Известно, что воздух как тело обладает идеальной упругостью и подчиняется закону Гука (1), который связывает линейно приложенную силу и удлинение через коэффициент жесткости:

$$F = k\Delta l \quad (1)$$

, а применительно к воздуху объем  $V$  и давление  $P$  при условии, что его температура  $T$  постоянна. В

термодинамике эта зависимость выражена уравнением состояния идеального газа (2):

$$PV = mRT, \text{ где } mRT = const \quad (2)$$

Таким образом, воздух действует как механическая пружина, накапливая энергию при сжатии и возвращая ее при расширении. Как известно, процесс сжатия газа (воздуха) сопровождается ростом температуры, т.е. ростом внутренней энергии за счет части подведенной к нему работы, согласно первому закону термодинамики (адиабатное сжатие) (3):

$$\Delta U = -A \quad (3)$$

, где  $\Delta U$  - прирост внутренней энергии,  $A$  - работа внешних сил.

В свое время, в период с 1892 по 1897 год Рудольф Дизель, создавая свой одноименный двигатель, после неоднократных попыток, успешно применил этот эффект для воспламенения топлива. Однако в компрессорной технике этот эффект считается побочным и нежелательным. Для защиты компрессоров от перегрева их оборудуют мощной системой охлаждения, отводящей производимое тепло в окружающую среду или как побочный продукт на нужды отопления. Таким образом, компрессор способен производить два продукта: сжатый воздух и сопутствующее тепло. В результате формула (3) примет вид:

$$\Delta U = \Delta U_{пэ} + \Delta U_{тэ} = -A \quad (4)$$

, где  $\Delta U$  - прирост полной энергии,  $\Delta U_{пэ}$  - прирост потенциальной энергии,  $\Delta U_{тэ}$  - прирост тепловой энергии,  $A$  - работа внешних сил.

Идея термодинамической рекуперации состоит в том, что бы сначала сжать вытяжной воздух, тем самым нагреть его, отнять избыточное тепло для подогрева приточного воздуха, затем, путем его расширения вернуть ранее затраченную энергию обратно в систему. Этот цикл соответствует обратимому термодинамическому циклу Карно с политропными процессами сжатия и расширения.

Предложенная схема имеет ряд исключительных особенностей:

- отсутствие обмерзания теплообменников при любых наружных температурах;
- возможность управление влажностью приточного воздуха за счет вынужденного осушения вытяжного воздуха, т.е. рекуперация влаги;
- возможность комбинированной работы в режиме воздушного отопления и вентиляции в холодное время года;
- возможность комбинированной работы в режиме кондиционирования и вентиляции в теплое время года;
- возможность работы в режиме только вентиляции в демисезонный период;
- экологическая безопасность, так как не используются фреоны;
- отсутствие смешивания приточного и вытяжного воздуха, что критично для «чистых» помещений;
- возможность мультизонального управления температурой.

Все режимы – взаимопереходные. Это свидетельствует о том что, предлагается не просто схема рекуперации, а полноценная система климат-контроля, способная заменить сразу 3 инженерные системы (отопление, кондиционирование, вентиляцию с функцией рекуперации).

#### IV. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА

Предлагаемая схема рекуперации использует стандартные пневматические элементы: теплообменники, водоотделители и пр., за исключением компрессора и детандера. Воздушный компрессор является центральным узлом схемы и по условиям работы должен удовлетворять ряду требований:

1. безмасляность;
2. бесшумность;
3. компактность;
4. высокая производительность;

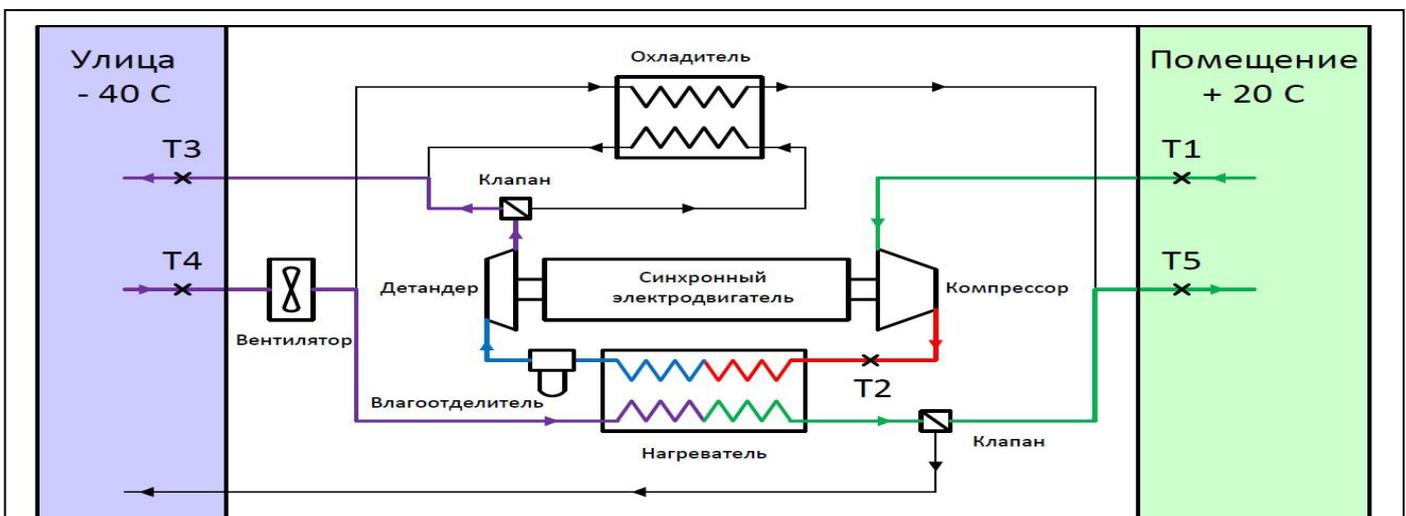


Рисунок №1

5. высокий КПД;
6. значительный ресурс при непрерывной работе;
7. простота обслуживания;
8. невысокая стоимость;
9. регулируемая степень сжатия от 1 до 3 ед.

К сожалению, сегодня на рынке нет ни одного серийного воздушного компрессора, который бы соответствовал предъявленным требованиям, возможно вследствие отсутствия ниши, где он мог бы применяться.

Анализ существующих компрессионных технологий показал, что наиболее релевантным являются динамический тип компрессоров, в частности осевые компрессоры. Они обладают высокой энергоэффективностью, позволяющей при малых габаритах обеспечить необходимую производительность. Более того, в них не используется масло, а КПД достигает 90%. Бесшумность и значительный ресурс можно обеспечить применением бесфрикционных газодинамических подшипников. Этот тип компрессора способен развивать степень сжатия в 3 ед. на 2-х или 3-х ступенях. Так как условия работы рассматриваемого воздушного компрессора значительно мягче чем в газотурбинном двигателе и соответственно требования к термической и механической прочности его узлов будут меньше, то следует ожидать, что за счет применения новых материалов, например композитных, а так же аддитивных технологий производства, можно значительно снизить итоговую стоимость такого осевого компрессора. Более того, спокойный режим работы, без динамических перегрузок с неизменными параметрами поступающего в него воздуха так же способствуют снижению технических требований.

Рассматривая перспективы компрессоростроения в целях массового использования в климатической технике особенно интересной выглядит технология объемного сжатия с применением газодинамического эффекта, которая исключает применение масла и при этом повышает ресурс компрессора многократно.

#### V. ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА

Для наглядной количественной оценки предлагаемой схемы рекуперации, можно рассмотреть конкретный пример с заданием исходных параметров требуемого теплообмена (рис. №1). Условимся расчет вести для частного, одноэтажного, деревянного дома площадью

$S_D = 100 м^2$  в зимний период. Примем температуры приточного и вытяжного воздуха равными установившейся температуре внутри дома  $T_1 = T_5 = 293,15 K (20^{\circ}C)$ . Температуру наружного воздуха примем  $T_4 = 233,15 K (-40^{\circ}C)$ . Объемный расход воздуха на вентиляцию примем  $G = 300 м^3 / ч.$  в соответствии с СП 54.13330.2011. Удельные тепловые потери дома при низких зимних температурах берем по справочнику  $Q_{пот} = 75 Вт / м^2$ , без учета потерь на естественную вентиляцию. Так же примем, что в рекуператоре установлен односекционный пластинчатый теплообменник, КПД которого составляет  $\eta = 50\%$ .

Для обеспечения принятых условий, найдем температуру  $T_2$  подогретого в компрессоре воздуха по формуле (4):

$$T_2 = \frac{(T_5 - T_4)}{\eta} + T_4 = 353,15 K (80^{\circ}C) \quad (4)$$

Теперь найдем требуемую степень сжатия компрессора для адиабатного и политропного процессов по формуле (5), где  $T_2$  и  $T_1$  задаем в Кельвинах, показатель  $n$  для адиабаты принимаем 1,4, а для политропы 1,28:

$$\varepsilon = \left(\frac{n-1}{n}\right) \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (5)$$

В результате получаем  $\varepsilon_{ad} = 2$ ,  $\varepsilon_{nm} = 2,3$ .

Рассчитаем прирост тепловой энергии сжимаемого воздуха для адиабатного и политропного процессов по формуле (6) на разных степенях сжатия.

$$\Delta U_{TЭ} = mR \frac{n}{n-1} (T_2 - T_1) \quad (6)$$

, где  $m$  - масса сжимаемого воздуха (кг),  $R = 287$  - газовая постоянная (Джс / кг · К).

Занесем полученные термодинамические параметры в сводную таблицу №1.

Поскольку уравнение состояния идеального газа и вытекающее из него уравнение (6) не учитывают прирост потенциальной энергии воздуха при сжатии по

Таблица №1

$\varepsilon$	Адиабатный процесс			Политропный процесс			$\Delta E_{TЭ} (Джс)$
	$T_2 (K)$	$P_2 (кгс)$	$\Delta U_{TЭ}^{ad.} (Джс)$	$T_2 (K)$	$P_2 (кгс)$	$\Delta U_{TЭ}^{nm.} (Джс)$	
2	356	2,6	151374	341	2,42	149710	50480
3	399	4,6	381798	373	4	372649	201921
4	432	7	670347	397	5,9	647816	454323
5	460	9,5	1005846	417	7,8	964750	807687
6	484	12,3	1381316	435	9,9	1316710	1262011
7	505	15,2	1791766	450	12	1701060	1817295
8	525	18,4	2233365	463	14,3	2107728	2473541
9	542	21,7	2701301	475	16,6	2538572	3229094
10	558	25,1	3194310	486	19	2995763	4086822

отношению к внешней среде, то ее можно найти, прибегнув к механической модели. Представим поршень площадью  $S = 1\text{ м}^2$ , который под действием силы  $F$  перемещается в цилиндре на расстояние  $\Delta l$  и сжимает в нем воздух. Сам воздух деформируется подобно пружине в соответствии с неким коэффициентом жесткости  $k$ . Тогда система будет подчиняться закону Гука (1), а работа внешней силы, т.е. прирост потенциальной энергии упругой деформации воздуха, будет выражен формулой (7).

$$A = \Delta U_{пэ} = F_{cp} \cdot \Delta l = k \frac{\Delta l^2}{2} \quad (7)$$

Выразим  $F_{cp}$  и  $\Delta l$  через степень сжатия  $\varepsilon$ :

$$F_{cp} = \frac{P_2 - P_1}{2} \cdot S = P_1 \frac{(\varepsilon - 1)}{2} \cdot S \quad (8)$$

$$\Delta l = \frac{V_1 - V_2}{S} = V_1 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon S} \quad (9)$$

Тогда формула (7) после преобразования примет вид (10):

$$A = \Delta U_{пэ} = P_1 V_1 \frac{(\varepsilon - 1)^2}{2\varepsilon} = mRT_1 \frac{(\varepsilon - 1)^2}{2\varepsilon} \quad (10)$$

Рассчитаем прирост потенциальной энергии для разных степеней сжатия и занесем результаты в таблицу №1, а так же построим сводный график (рис. №2), зависимостей прироста энергии воздуха  $\Delta U_{тэ}^{ад.}$ ,  $\Delta U_{тэ}^{пт.}$ ,  $\Delta U_{пэ}$  от степени сжатия для анализа полученных результатов.

По графику видно, что в зоне интересующих степеней сжатия в диапазоне  $\varepsilon = 1..3$  прирост потенциальной энергии меньше, чем тепловой примерно на 60%, однако с ростом степени сжатия доля потенциальной энергии растет и начиная с  $\varepsilon = 7$  становится больше доли

тепловой энергии в общих затратах на производство сжатого воздуха. Таким образом на высоких степенях сжатия компрессирование воздуха становится более выгодным с точки зрения возврата энергии. При этом прирост тепловой энергии в политропном процессе немного меньше чем в адиабатном за счет неизбежного рассеивания теплоты.

Рассчитаем электрическую мощность  $N_{KV}$  компрессорной установки в составе рекуператора на вентиляцию вышеуказанного дома площадью  $100\text{ м}^2$  с расходом воздуха  $G = 300\text{ м}^3 / \text{ч}$  по формуле (11):

$$N_{KV} = \frac{\Delta U \cdot G}{\varepsilon \cdot \eta_K \cdot \eta_{Э} \cdot 3600} \approx 11(\text{кВт}) \quad (11)$$

, где  $\Delta U$  - сумма потенциальной и тепловой энергии сжатого воздуха для  $\varepsilon = 2$ ,  $\eta_K$  - средний КПД осевого компрессора ( $\eta_K = 0,85$ ),  $\eta_{Э}$  - средний КПД синхронного электропривода ( $\eta_{Э} = 0,9$ ).

Мощность отопительного прибора для такого дома, исходя из тепловых потерь, составляет (12):

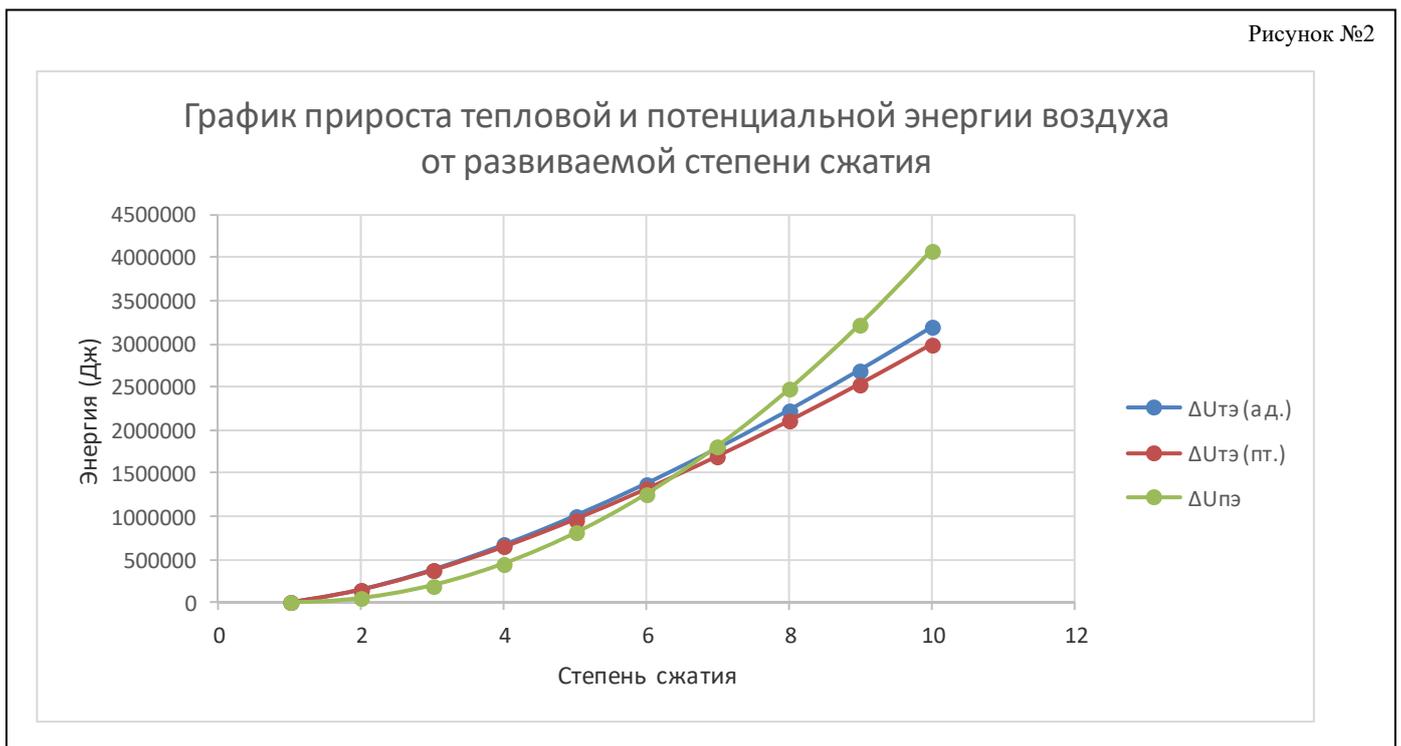
$$N_{оп} = Q_{пот} \cdot S_{д} = 75 \cdot 100 = 7,5(\text{кВт}) \quad (13)$$

Таким образом, при данных условиях вентиляция воздуха оказывается примерно на 30% более затратной, чем отопление. Снизить затраты на вентиляцию возможно 3-мя способами:

- Повысить КПД теплообменника до 65% без риска обмерзания, за счет взаимной оптимизации площади теплообмена и расхода через него. Это снизит энергозатраты оценочно на 10%;

- Использовать детандер для возврата потенциальной энергии воздуха. Для  $\varepsilon = 2$  доля возвратной энергии может составить оценочно 20%, для  $\varepsilon = 3$

Рисунок №2



соответственно 35%.

- Снизить расход воздуха ниже норматива на 30%. Считаю, что в большинстве случаев это приемлемо при низких зимних температурах.

Общее совокупное снижение мощности компрессорной установки за чет принятых мер может составить до 50%, что в конечном счете окажется ниже затрат на отопление.

Важным достоинством предлагаемой схемы является ее универсальность. Это выражается в том, что если в доме использовать принцип воздушного отопления, как это сделано скажем в США, то за счет регулирования мощности компрессора в рекуператоре можно догревать приточный воздух до уровня компенсации тепловых потерь, либо охлаждать его в летний период за счет конвертации схемы (Рис.№1).

Рассчитаем прирост температуры приточного воздуха  $T_5$  для компенсации вышеуказанных тепловых потерь в доме. Для этого преобразуем формулу (11), выразив  $\Delta U$  через  $N_{KV}$ , где вместо  $N_{KV}$  подставим требуемую мощность отопительного прибора  $N_{OP}$ , получим формулу (14):

$$\Delta U_D = \frac{N_{OP} \cdot \varepsilon \cdot \eta_K \cdot \eta_{\varepsilon} \cdot 3600}{G} \approx 137700(\text{Дж}) \quad (14)$$

, где  $\Delta U_D$  - требуемое дополнительное количество тепловой энергии.

Находим сумму  $\Delta U_{TЭ}^{ad} + \Delta U_D = 289074(\text{Дж})$ , далее обратным расчетом по формуле (6) находим температуру  $T_2 = 385K (112^{\circ}C)$ , оценочно приняв степень сжатия  $\varepsilon = 2,6$ . Теперь по формуле (4) найдем температуру  $T_5 = 309(K) (36^{\circ}C)$ , т.е. разница с ранее рассчитанной -  $16^{\circ}C$ . Полученная температура является совершенно безопасной для притока воздушного отопления.

Охлаждение реализуется более сложно. В работу вводится второй теплообменник в качестве охладителя.

Воздушные потоки перенаправляются трехходовыми клапанами. Отличие такой схемы от традиционной состоит в том, что воздушные потоки не циркулируют в помещении, а полностью обновляются за счет вентиляции. Расчет энергоэффективности в режиме охлаждения несколько сложнее, чем на отопление, поэтому здесь не приводится.

## VI. Выводы

С точки зрения энергетической эффективности предлагаемая схема рекуперации сравнима по затратам с существующими решениями, например, такими как электроподогрев приточного воздуха. Главное ее достоинство в универсальности, простоте и надежности, которые в конечном итоге должны позволить снизить совокупные эксплуатационные на обслуживание и капитальные затраты в процессе жизненного цикла установки, отказавшись от остальных инженерных систем.

С другой стороны следует учитывать, что расчеты проводились на максимальные затраты для самых суровых зимних условий, которые длятся не более 1-2 месяцев в году, в тоже время в демисезонный период достигающий полугода, затраты на вентиляцию, работающую в режиме фрикулинга, будут минимальные. В летний же период – ниже средних.

Таким образом, благодаря современным технологиям предлагаемая схема рекуперации использующая безопасный и естественный воздух может стать отличной альтернативой другим инженерным системам, конкурируя с ними в приведенной экономической эффективности.

## Список литературы

- [1] Карабин, А.И. Сжатый воздух. Выработка, потребление, пути экономии. // Машиностроение – Москва, 1964. – 342 с.
- [2] Мартыновский, В.С., Мельцер, Л.З. Судовые холодильные установки // Транспорт, 1964. – 383 с.
- [3] Пигарев, В.Е., Архипов, П.Е. Холодильные машины и установки кондиционирования воздуха // Маршрут, 2003. – 424 с.
- [4] Моисеев, Б.В., Яблонский, Ю.П. Термодинамические циклы тепловых двигателей (поршневые ДВС) // ТюмГАСА, 2003. – 34 с.

# Использование конденсационных теплообменников в системах глубокой утилизации теплоты дымовых газов при сжигании серосодержащего топлива

Д.А. Денищук  
ФГБОУ ВО НИУ "МЭИ"  
Москва, Россия  
E-mail: [dmitry.denishuk@yandex.ru](mailto:dmitry.denishuk@yandex.ru)

## Аннотация

**Состояние вопроса:** Традиционные конструкции экономайзеров и воздухоподогревателей гарантируют отсутствие низкотемпературной коррозии холодной части теплообменных поверхностей благодаря поддержанию температуры стенки выше точки росы паров серной кислоты и паров воды, что приводит к повышенным тепловым потерям с уходящими газами. Потери тепла при сжигании серосодержащего топлива могут быть снижены благодаря применению коррозионностойких теплообменников конденсационного типа в системах глубокой утилизации теплоты уходящих газов.

**Материалы и методы:** При проведении исследования, анализировался российский и зарубежный опыт эксплуатации теплообменников конденсационного типа в нефтехимии и химической промышленности. Вопросы утилизации конденсата кислот прорабатывались экспериментально на базе химической лаборатории Технического Университета Нюрнберга им. Георга Симона Ома. В качестве инструмента моделирования тепловых схем электростанций применялось программное обеспечение Boiler Designer.

**Результаты:** Исследованы процессы конденсации паров кислот при охлаждении дымовых газов пылеугольных и мазутных котлов. Дан анализ эффективности применения конденсационных теплообменников на паросиловом пылеугольном блоке мощностью 225 МВт. Предложены схемы включения разработанной системы в цикл электростанции и конструктивное исполнение теплообменника. Рассмотрены основные проблемы проектирования и эксплуатации разработанной системы.

**Выводы:** Разработанная система может быть применена как на существующих, так и на вновь строящихся пылеугольных и мазутных котлах тепловых электростанций. Реализация предлагаемой технологии приведет к снижению расхода топлива на 2,8% (при снижении температуры уходящих газов со 140 °С до 85 °С) и позволит производить побочный товарный продукт.

**Ключевые слова:** система глубокой утилизации теплоты с применением конденсатора уходящих газов, повышение технико-экономических показателей пылеугольной ТЭС, конденсация паров серной кислоты, получение сульфата аммония.

## The using of condensing heat exchangers in exhaust gases deep heat recovery systems for sulphur-containing fuel burning

Dmitrii Denishchuk  
Moscow Power Engineering Institute  
Moscow, Russian Federation  
E-mail: [dmitry.denishuk@yandex.ru](mailto:dmitry.denishuk@yandex.ru)

## Abstract

**Background:** The conventional design of economizers and air heaters ensures that cold end corrosion due to condensing sulfuric acid or water vapor does not occur because the minimum tube wall temperature is maintained above the dew points that is the reason for high heat loss with flue gas. Sulphur-containing fuel-burning flue gas heat loss could be reduced by the using of corrosion-resistant condensing heat exchangers in exhaust gases deep heat recovery systems.

**Materials and Methods:** The Russian and foreign experience of condensing heat exchangers operation in the petrochemical and chemical industry was analyzed. The disposal of acids condensate was studied experimentally in the chemical laboratory of Nuremberg Institute of Technology Georg Simon Ohm. As a tool for simulation of power plants thermal circuits was used Boiler Designer.

**Results:** The processes of acid vapor condensation upon flue gas cooling of coal-fired and oil-fired boilers were researched. The efficiency analysis of condensing heat exchangers in coal-fired steam power plant with 225 MW capacity. The proposed scheme enable

the developed system to the power plant cycle and the heat exchanger design. The main problems in the design and operation of the developed system were considered.

**Conclusions:** The developed system can be applied in both existing and newly constructed coal-fired and oil-fired boilers of thermal power plants. Implementation of the proposed technology will reduce fuel consumption by 2.8% (by reducing the flue gas temperature from 140 °C to 85 °C) and allow to produce by-commodity product.

**Key-words:** Exhaust gases deep heat recovery system with flue gas condenser, improving of technical-and-economic indexes of coal-fired thermal power plant, sulfuric acid vapor condensation, obtaining ammonium sulfate.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Обобщенно, дымовые газы при сжигании твердого или жидкого топлива, в основном состоят из газообразного диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), паров воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ), газообразного азота ( $\text{N}_2$ ) и избыточного кислорода ( $\text{O}_2$ ). Обычно, более чем две трети дымовых газов составляет азот. Также газы могут содержать небольшое количество твердых частиц, монооксида углерода ( $\text{CO}$ ), оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и оксидов серы в виде газообразного диоксида ( $\text{SO}_2$ ) и триоксида ( $\text{SO}_3$ ). [1]

Наличие  $\text{SO}_3$  обусловлено тем, что часть  $\text{SO}_2$ , образующегося из серы, содержащейся в топливе, окисляется до  $\text{SO}_3$ . [2]

В процессе охлаждения и в результате взаимодействия с парами воды в дымовых газах образуются пары серной, сернистой, азотной и соляной кислот. При этом точка росы уходящих газов определяется по температуре конденсации паров серной кислоты.

Традиционно, температура уходящих газов поддерживается выше точки росы для исключения низкотемпературной коррозии. При этом имеют место повышенные тепловые потери с уходящими газами. [3]

В данном исследовании разработана концепция коррозионностойкого теплообменника конденсационного типа – конденсатора уходящих газов (КУГ) для системы глубокой утилизации теплоты дымовых газов.

## II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ

Основная задача системы глубокой утилизации теплоты дымовых газов с применением КУГ – понизить температуру газов ниже точки росы паров серной кислоты и обеспечить конденсацию на поверхностях теплообмена.

Уходящие газы котла охлаждаются в КУГ до минимально допустимой температуры, обеспечивающей нормальное рассеивание газов в атмосфере без модернизации дымовой трубы. По ходу движения газов, происходит конденсация паров серной кислоты. Получаемый в результате раствор серной кислоты собирается в конденсатосборнике, поступает в химический реактор для дальнейшей утилизации.

Для детальной проработки технологии была выбрана вновь строящаяся ТЭЦ-2 г. Артем, Приморский край. Основные технические решения по данному проекту были выполнены проектной организацией АО «Институт Теплоэлектропроект», г. Москва. Предполагается строительство 4-х пылеугольных блоков с двумя турбинами Т-120/140-12,8-2 и двумя турбинами К-225-12,8-4Р. Реализация технологии КУГ детально

проработана применительно к блоку №3 второй очереди строительства, с турбоустановкой К-225-12,8-4Р и пылеугольным котлом Еп-630-13,8-565/565.

Основное топливо – бурый уголь Павловского месторождения (на рабочую массу: влага – 41,5%; сера – 0,4%).

КУГ представляет собой теплообменник, в межтрубном пространстве которого движутся газы, а по трубкам теплообменных поверхностей – охлаждающая среда – основной конденсат. Со стороны газов, теплообменник устанавливается после котельного агрегата и электрофильтра (Рис.1).

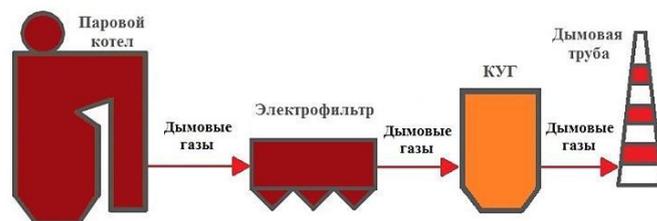


Рис.1 Схема включения КУГ в газо-воздушный тракт

Для регулирования температуры газов перед дымовой трубой предусмотрено байпасирование части дымовых газов мимо КУГ и смешение с основным потоком перед трубой. [4]

Со стороны охлаждающей среды КУГ устанавливается в тракт основного конденсата, параллельно ПНД1 и ПНД2. Также была рассмотрена возможность отказа от подогревателя низкого давления ПНД-3 в целях уменьшения капитальных затрат.

## III. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОНДЕНСАТОРА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ

С конструкторской точки зрения, КУГ представляет собой газо-водяной теплообменник с теплоизолированным корпусом. Нижняя часть теплообменника выполнена под углом. Под КУГ располагается химический реактор. Данная компоновка обеспечивает естественный слив конденсата в реактор, что позволяет отказаться от применения насоса для перекачки раствора серной кислоты.

При проектировании КУГ необходимо учитывать не только теплоту, отдаваемую уходящими газами при охлаждении, но и теплоту конденсации паров серной кислоты. [5] Следовательно, в тепловую мощность КУГ входят две составляющие – теплота, воспринятая основным конденсатом в результате охлаждения дымовых газов и скрытая теплота конденсации паров серной кислоты.

Модель КУГ представлена на рисунке 3.

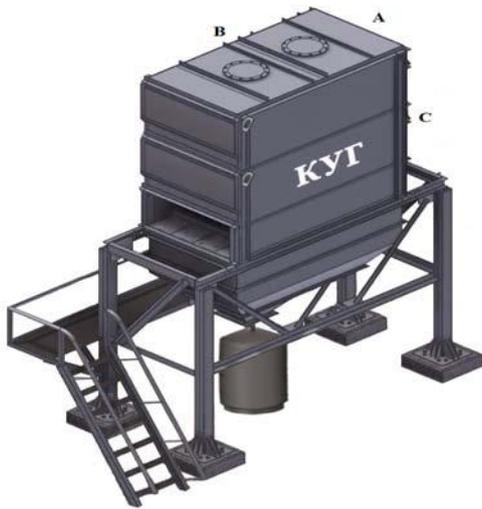


Рис. 3 Модель установки КУГ

Габаритные размеры конденсатора уходящих газов (размеры А/В/С): 4м/7м/11,75м.

Площадь теплообмена КУГ составляет 3991 м<sup>2</sup>.

При рассматриваемых условиях тепловая нагрузка КУГ составляет 14240,16 кВт.

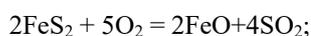
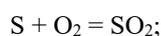
Основная проблема создания подогревателя, работающего в агрессивных средах – материал поверхностей нагрева. С одной стороны, материал должен быть кислотостойким, долговечным и обладать высокими теплопроводными свойствами, с другой – иметь низкую стоимость. [6] В качестве материала поверхностей нагрева предполагается использовать СТАЛЬ 20 с нанесением на наружную поверхность трубы кислотостойкого покрытия.

В качестве кислотостойкого покрытия было рассмотрено применение нескольких материалов: тефлон, керамика и система покрытий РОКОР® для адсорберов очистки дымовых газов от серы. Среди трех представленных вариантов кислотостойкого покрытия было проведено сравнение по трем параметрам: коэффициент теплопроводности, толщина покрытия и стоимость. Также была проработана возможность применения кислотостойких сталей. Использование сталей типа 12Х18Н10Т повышает цену теплообменных поверхностей на 245%.

Для исключения проскока тумана серной кислоты предполагается устанавливать несколько ступеней демистров (туманоуловителей) на выходе из КУГ. Эффективность современных демистров достигает 99,9%.

#### IV. ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

При окислительном сжигании топлива, из органической и колчеданной серы образуются диоксид серы [7]:

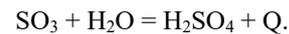


В результате химических процессов, происходящих по тракту котельного агрегата, некоторая часть диоксида серы окисляется до триоксида. Конверсия SO<sub>2</sub> в SO<sub>3</sub> происходит при температуре порядка 1000 °С и зависит от коэффициента избытка воздуха и приведенного серосодержания топлива [8].



При рассматриваемых условиях степень конверсии составляет 0,8854%.

Образовавшийся в продуктах сгорания топлива серный ангидрид при охлаждении начинает взаимодействовать с парами воды, образуя пары серной кислоты:



При температуре ниже 200 °С в дымовых газах содержатся только пары H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, и отсутствуют молекулы SO<sub>3</sub> [8].

Предполагается охлаждать уходящие газы до температуры 85 °С.

На поверхности теплообмена КУГ будет конденсироваться концентрат серной кислоты (порядка 75%).

Количество концентрированной кислоты, конденсирующейся в КУГ – 53,24 кг/ч.

Ввиду того, что серная кислота обладает классом опасности II и является высокотоксичной, предполагается разбавление конденсата в конденсаторосборнике водой до концентраций порядка 20-10% для обеспечения безопасности персонала и снижения коррозионной активности раствора. При данных концентрациях раствора серной кислоты, конечный продукт переработки конденсата – сульфат аммония находится в жидкой фазе, без выпадения осадка, что упрощает его транспортировку и облегчает условия работы химического реактора. Предполагается разбавления конденсата серной кислоты до концентрации 15%.

#### V. НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ РАСТВОРА СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Нейтрализацию раствора серной кислоты предполагается осуществлять в химическом реакторе с помощью водного раствора аммиака.

Цель данного способа утилизации – получение ценного с промышленной точки зрения продукта – сульфата аммония.

Сульфат аммония ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – повсеместно используемое азотосодержащее удобрение, производимое отечественной промышленностью в больших количествах. Сульфат аммония хорошо растворяется в воде, что позволяет использовать его в жидком виде. Получение данного вещества на электростанции в качестве побочного продукта позволит реализовывать его по цене, ниже рыночной. [9]

Количество образующегося раствора сульфата аммония - 623,4 кг/ч с концентрацией 35,7%.

Одна установка КУГ на пылеугольном блоке мощностью 225 МВт способна обеспечивать удобрениями 355 га почвы в год.

При температуре раствора серной кислоты порядка 85 °С и температуре раствора аммиака равной температуре в промышленном помещении (порядка 20 °С), количество тепла, выделяющегося в ходе экзотермической реакции (температура продукта реакции) зависит от концентраций исходных реагентов.

Теплоту, выделяемую при экзотермической реакции в реакторе, предполагается утилизировать добавочной водой, поступающей в конденсатор турбины с температурой 30°С. Начальная температура добавочной воды принимается равной 20°С. В исходной схеме добавочная вода нагревается паром из коллектора собственных нужд. Для уменьшения расхода пара из коллектора собственных нужд, часть добавочной воды предполагается пропускать через реактор, который является спиральным теплообменником. Тепловая мощность химического реактора покрывает до 60% потребности тепла на подогрев добавочной воды цикла.

## VI. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

При установке КУГ в схему пылеугольного блока Артемовской ТЭЦ-2 сокращается расход топлива ввиду более глубокого использования теплоты дымовых газов и повышения экономичности работы блока в целом. Данный эффект приводит к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу, также, как и конденсация паров серной кислоты в КУГ.

Принципиальная тепловая схема пылеугольного блока 225 МВт Артемовской ТЭЦ-2 с системой глубокой утилизации теплоты с КУГ представлена на рисунке 4.

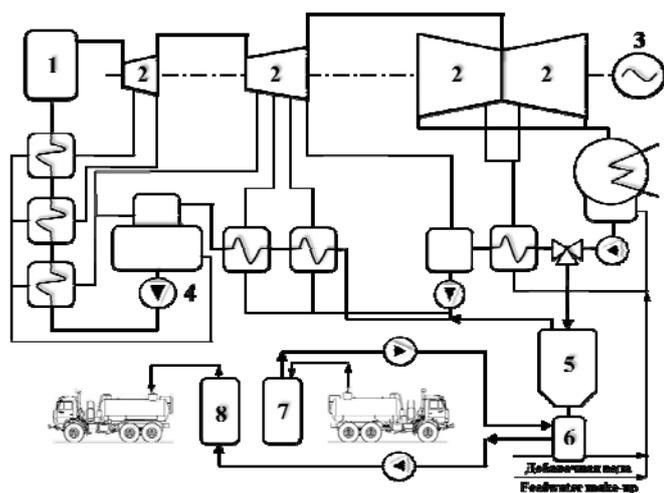


Рис. 4 Принципиальная тепловая схема пылеугольного блока 225 МВт Артемовской ТЭЦ-2 с системой глубокой утилизации теплоты с КУГ.

1-паровой котел паропроизводительностью 630 т/ч; 2-паровая турбина номинальной мощностью 225МВт; 3-генератор; 4-ПЭН; 5-КУГ; 6-химический реактор; 7-бак запаса водного раствора аммиака; 8-бак-хранилище водного раствора сульфата аммония.

По результатам исследования, внедрение установки с КУГ на конденсационном паросиловом блоке 225 МВт приведет к сокращению расхода топлива при номинальной нагрузке блока на 2,8%.

В результате охлаждения дымовых газов происходит снижение их объемного расхода, ввиду чего нагрузка привода дымососа снижается на 1,5%.

При температуре наружного воздуха 20 °С, дымовые газы по ходу движения в трубе охлаждаются на 15 °С, при этом их температура существенно превышает точку росы паров воды, что исключает возможность конденсации воды в дымовой трубе.

В результате исследования было выявлено положительное влияние установки на технико-экономические параметры блока, разработана система утилизации отходов производства с получением востребованного товарного продукта, получены приемлемые сроки окупаемости и величина капитальных затрат для конкретной тепловой электростанции. Помимо этого, были проработаны решения по основным проблемам, связанным с эксплуатацией установки в стационарных условиях.

Установка глубокой утилизации теплоты уходящих газов с применением КУГ является перспективной технологией использования угля в России ввиду существенного улучшения технико-экономических и экологических показателей блока при низких капитальных затратах, а также тесного симбиоза представленной технологии с развивающимся аграрным комплексом России.

## Список литературы

- [1] Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators. Design, Application and Calculations / V. Ganapathy. Marcel Dekker Inc., New York, USA, 2003.
- [2] Experiences and Results of SO<sub>3</sub> Measurements Performed under Oxy-Coal Fires Conditions. Institute of Combustion and Power Plant Technology. G. Scheffknecht. University of Stuttgart. Stuttgart, Germany, 2011.
- [3] Recovery of water from boiler flue gas using condensing heat exchangers. Final technical report. DOE Award Number DE-NT0005648. Edward Levy, Harun Bilirger, John DuPont. Energy Research Center Lehigh University, Bethlehem, USA, 2011.
- [4] Editor: John J. McKetta (1997), Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Volume 61, 1st Edition, CRC Press ISBN 0-8247-2612-X.
- [5] Yen Hsiung Kiang (1981), "Predicting Dew points of Gases", Chemical Engineering Vol. 88, Issue 3, p. 127
- [6] V. Ganapathy (1993), Steam Plant Calculations Manual, 2nd Edition, CRC Press, ISBN 0-8247-9147-9. See Table 2.9 on page 94.
- [7] Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. Под редакцией Н.В. Кузнецова и др. Энергия, Москва, 1973 г.
- [8] Коррозия газового тракта котельных установок. В.Ш. Магадаев. Энергоатомиздат, Москва, 1986 г.
- [9] Прохоров В.Б., Денищук Д.А., Горбунов Д.В. Некаталитическая система конденсации паров серной кислоты для глубокой утилизации теплоты уходящих газов пылеугольных котлов. Энергосбережение и водоподготовка, №1 (105) февраль, Москва, 2017.

# Анализ функциональных возможностей программно-вычислительного комплекса «КАПРЭС» в контексте решения задач развития ЭЭС

А.А. Костин, П.Е. Мезенцев, В.П. Обоскалов  
ФГБУ Институт теплофизики УрО РАН  
Екатеринбург, Россия  
KostinAlex709@yandex.ru

*Аннотация — Опыт разработки и применения программно-вычислительных комплексов (далее – ПВК) на различных этапах проектирования (развития) электроэнергетических систем ЭЭС привел к возникновению совершенно нового подхода к решению задач развития ЭЭС, стоящего на стыке методов научного поиска и практических экспертных методов. Рациональным подходом к разработке проектных процедур и алгоритмов принятия решений в рамках перспективного развития ЭЭС является использование эвристических принципов. Особенностью использования эвристических алгоритмов при решении подобных задач является возможность связывания нечетких понятий, которыми пользуется лицо, принимающее решение, с формализованным числовым отображением этих понятий в ПВК. Материалы, представленные в статье отражают функциональные возможности ПВК «КАПРЭС», разработанного авторами для решения задач перспективного развития ЭЭС в условиях неопределенности. При проведении исследования применялись подходы и методы теории нечетких множеств и принятия решения в условиях не определенности. При выполнении экспериментальной части методом исследования являлось математическое моделирование. В качестве инструментов моделирования использовались возможности ПВК «КАПРЭС». Разработанный ПВК «КАПРЭС» может применяться для решения задач комплексного перспективного развития ЭЭС (в перспективе, региональных ЭЭС) проектными организациями, а также в образовательных целях при изучении методов решения задач многокритериальной оптимизации.*

*Ключевые слова — электроэнергетическая система; теория нечетких множеств; программно-вычислительный комплекс; перспективное развитие*

## Electrical power system development software (CAPRES) functionality analysis

Alexey Kostin, Petr Mezentsev, Vladislav Oboskalov  
Institute of Thermal Physics Ural Branch of RAS  
Ekaterinburg, Russian Federation  
KostinAlex709@yandex.ru

*Abstract — Development and using of special electrical power systems (EPS) development software has led to making of new technical approach based on mathematical algorithms and expert analysis methods. The main idea of these methods includes heuristic principles. Application of heuristic methods make it possible to link fuzzy logic theory and expert analysis methods in the new special software of electrical power systems development (CAPRES). The main methodological basis of this article includes fuzzy logic theory methods represented in the form of new software “CAPRES”. New EPS development software (CAPRES) functionality analysis carried out. New functional prospects of CAPRES is noted. The software “CAPRES” can be used for EPS development problems solving and for educational purposes in electrical engineering department of universities.*

*Keywords — electrical power system; fuzzy logic theory; software; development*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разработка и использование программно-вычислительных комплексов (далее - ПВК) для решения специализированных задач нашли широкое применение в различных отраслях, в том числе в электроэнергетике. В данной статье главной задачей

является описание, разработанного авторами, ПВК анализа перспектив развития электроэнергетических систем (далее – ПВК «КАПРЭС») в основе которого лежат принципы теории нечетких множеств и принятия решений в условиях неопределенности. ПВК «КАПРЭС» позволяет решать задачу оценки перспектив развития отдельных энергорайонов и электроэнергетических систем с учетом

различных, предварительно заданных технических, экономических и других параметров [1]. Описание ПВК «КАПРЭС»

#### А. Краткое представление интерфейса меню

На Рис. 1 представлен внешний вид меню ПВК и вкладки рабочей области.

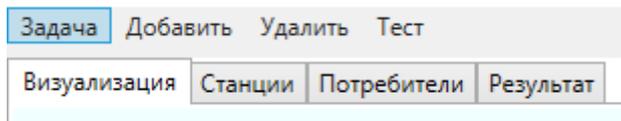


Рис. 1. Внешний вид меню ПВК «КАПРЭС» и вкладки рабочей области.

ПВК «КАПРЭС» позволяет производить распределение крупных потребителей электрической энергии по зонам влияния электростанций (центров питания) с помощью алгоритма на основе теории нечетких множеств с учетом предварительно определенных параметров и целей задачи (проекта). В разработанном комплексе оперирование производится на уровне отдельных задач, которые включает в себя заданную энергосистему (далее - ЭЭС), наполненную генерирующими объектами, крупными потребителями электрической энергии и электросетевыми объектами с некоторой системой параметров и взаимосвязей между отдельными участниками ЭЭС которая задается пользователем.

По своим функциональным возможностям данный ПВК позволяет выполнять:

- 1) моделирование ЭЭС с выделением отдельных субъектов электроэнергетики (генерирующие компании, электросетевые компании, крупные потребители электрической энергии) с территориальной привязкой;
- 2) проведение оценки текущего состояния энергосистемы региона, либо отдельного энергорайона в контексте определения «узких мест» ЭЭС;
- 3) анализ перспектив развития ЭЭС с учетом влияния разнородных факторов и различной динамики в контексте решения задачи многокритериальной оптимизации;
- 4) формирование перечня (рекомендации) наиболее рациональных с технической и экономической точек зрения решений [2].

Тип функционирования ПВК «КАПРЭС» - «рабочая станция» реализована возможность загрузки и сохранения архивного или текущего проекта. Предусмотрены базы данных отдельно для каждого энергорайона. ПВК представлен графическим интерфейсом, ввод данных осуществляется в табличном виде, вывод результатов – в текстовом окне и на графике.

#### В. Описание вкладок меню ПВК «КАПРЭС»

1. Задача. В данной вкладке меню находятся все операции, связанные с задачей (проектом) в целом.
  - 1.1. Новая. С помощью данной вкладки можно создать новую задачу (проект), при этом данные о старой задаче будут утрачены, если они не сохранены. После создания новой

задачи все вкладки рабочей области будут очищены.

- 1.2. Сохранить. Данная вкладка позволяет сохранить текущую задачу (проект) в файл с расширением (.task).
- 1.3. Загрузить. Вкладка позволяет загрузить сохраненный ранее проект из файла.
- 1.4. Решить. Вкладка запускает алгоритм расчета «зон влияния» электростанций (центров питания) на существующих или перспективных потребителей электрической энергии. Для запуска алгоритма расчета должна быть загружена некоторая задача (проект).
2. Добавить. С помощью данной вкладки меню можно добавить элементы ЭЭС или определить их дополнительные свойства. При добавлении нового элемента или свойства открывается всплывающее окно, в котором нужно ввести имя нового элемента.
3. Удалить. С помощью данной вкладки меню можно удалять существующие элементы ЭЭС и их свойства.

#### II. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПВК «КАПРЭС»

В разработанном ПВК в целях обеспечения наглядности в контексте решения задач развития ЭЭС каждый проект (задача) визуализирована. Каждый элемент ЭЭС имеет свое уникальное имя и место расположения на визуализированной карте, которое можно менять в процессе работы в текущем проекте. Также учитываются параметры физического расстояния и электрической проводимости между объектами ЭЭС, которые вводятся пользователем в качестве исходных данных задачи и отображаются на карте по середине линий электропередачи (линии связи,  $R$  – расстояние,  $\Pi$  – электрическая проводимость связи в относительных единицах).

При добавлении нового элемента ЭЭС через меню «Добавить» данный элемент появляется на поле визуализации (карта визуализации). Перемещать объект по карте визуализации можно, зажав на нем левую кнопку мыши.

Для объединения двух элементов связью, необходимо зажать клавишу Shift, при этом курсор принимает вид крестика. Затем, удерживая Shift, затем нужно поочередно нажать левую клавишу мыши на соединяемых элементах. После этого появится всплывающее окно, в котором нужно будет ввести параметры связи. При нажатии на каком-либо элементе рабочей области правой клавишей мыши, появится контекстное меню, которое позволяет изменять параметры элемента либо удалять его. В правом нижнем углу рабочей области ПВК «КАПРЭС» расположен ползунок, который позволяет менять масштаб рабочей области в диапазоне от 40% до 200% от масштаба по умолчанию. Также справа и внизу от карты визуализации расположены ползунки, с помощью которых можно передвигаться по рабочей области. На Рис.2 представлен пример карты визуализации ПВК «КАПРЭС» [3].

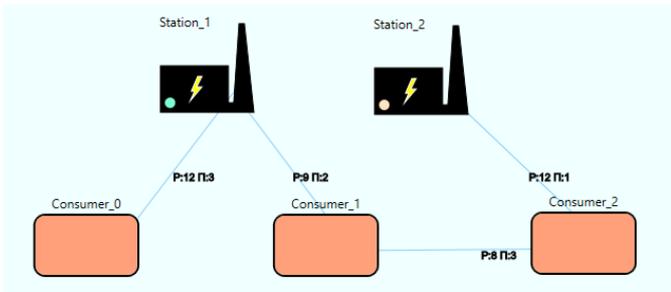


Рис. 2. Пример карты визуализации ПВК «КАПРЭС».

Также на карте визуализации отображаются результаты решения задачи. Каждый производитель энергии имеет свой цвет, который отображается в кружке в левом нижнем углу. После того как задача будет решена и распределение будет построено, каждый потребитель (область потребления) получит такие же кружки, которые будут сообщать о том, в зону какой электростанции распределились отдельные крупные потребители электрической энергии по заданным изначально критериям. Работа с картой визуализации очень удобна в рамках решения задач перспективного развития в привязке к определенной территории (области). На Рис.3 приведен пример результатов решения задачи оценки перспектив развития модели некоторой ЭЭС на карте визуализации с указанием распределения по зонам влияния электростанций (слабое влияние может свидетельствовать о необходимости проведения капитального, планового ремонта генерирующего оборудования или о целесообразности развития электросетевой инфраструктуры при перспективном увеличении электропотребления в ЭЭС).

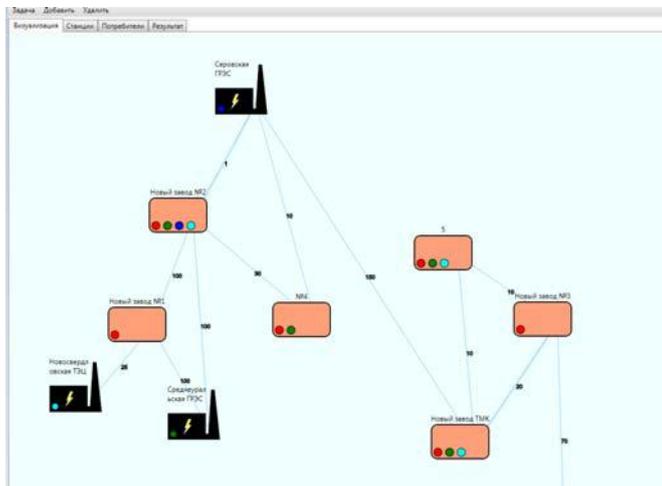


Рис. 3. Пример результатов решения задачи на карте визуализации ПВК «КАПРЭС».

Ввод исходных данных также реализован в табличном виде. Во вкладке параметры электростанций (центров питания) вводятся отдельные свойства электростанций (в приведенных относительных единицах), во вкладке свойства потребителей электрической энергии – свойства потребителей и косвенно описывается состояние электросетевой инфраструктуры в рассматриваемой ЭЭС. На Рис. 4 представлен пример отображения вкладки параметров электростанций, на Рис.5 – параметров потребителей электрической энергии и электрических сетей.

	Feature0	Feature1	Feature2
Station_0	0.6	0.1	0.7
Station_1	0.2	0.8	0.1

Рис. 4. Форма отображения вкладки задания свойств электростанций (центров питания) в ПВК «КАПРЭС».

	Расстояние	Проводимость	Feature0	Feature1	Feature2
Consumer_0	0	0	0	0	0
Consumer_1	0	0	0	0	0
Consumer_2	0	0	0	0	0

Рис. 5. Форма отображения вкладки задания свойств потребителей электрической энергии (центры потребления) в ПВК «КАПРЭС»

Результаты расчетов приводятся также в текстовом виде. После решения текущей задачи в окне ПВК появляется описание решения с указанием полученных распределений по различным критериям: общие свойства (определяются индивидуально пользователем), физическое расстояние (удаленность между объектами), электрическая проводимость связей. На рис 6. Приведен пример представления результатов решения задачи в текстовом виде в ПВК «КАПРЭС». Способом получения вывода из трех критериев можно управлять, путем внесения изменений в конфигурационный файл ПВК «КАПРЭС», как это представлено на Рис. 7.

```

Зона 1
Разнесение по свойствам:
К зоне электростанции Station_0 рекомендуется отнести:
Consumer_0, Consumer_1
К зоне электростанции Station_1 рекомендуется отнести:
Consumer_0, Consumer_1
Разнесение по расстояниям:
К зоне электростанции Station_0 рекомендуется отнести:
Consumer_0, Consumer_1
К зоне электростанции Station_1 рекомендуется отнести:
Consumer_0, Consumer_1
Разнесение по проводимости:
К зоне электростанции Station_0 рекомендуется отнести:
Consumer_1
К зоне электростанции Station_1 рекомендуется отнести:
Consumer_0, Consumer_1

```

Рис. 6. Пример представления результатов в текстовом виде в ПВК «КАПРЭС»

Конфигурационный файл находится в папке с исполняемым файлом Energy.UI.exe.config (.xml формат) и позволяет изменять поведение ПВК в зависимости от определенных изначально целей задачи развития ЭЭС (определение результата по отдельному критерию либо по набору критериев).

Параметр AutogenerateParticipantNames может принимать значения True (Истина) или False (Ложь). При включении данной настройки (значение True) имена вновь добавляемых элементов ЭЭС будут сгенерированы автоматически.

```

<Energy.UI.Properties.Settings>
  <setting name="AutoGenerateParticipantNames" serializeAs="String">
    <value>True</value>
  </setting>
  <setting name="DebugMode" serializeAs="String">
    <value>True</value>
  </setting>
  <setting name="CombinationType" serializeAs="String">
    <value>Intersection</value>
  </setting>
</Energy.UI.Properties.Settings>

```

Имена параметров

Значения

Рис. 7. Пример представления результатов в текстовом виде в ПВК «КАПРЭС»

Параметр DebugMode может принимать значения True или False. При включении этой настройки откроется дополнительное меню (меню отладки) и при создании новых линий связи (линий электропередачи), параметры этих связей будут сгенерированы случайным образом в диапазоне значений существующих связей.

Параметр CombinationType может принимать значения Intersection и Union. Данный параметр влияет на построение общего вывода на основании трех распределений во вкладке результата. Распределения определяют разделение потребителей электрической энергии на множества, исходя из критерием расстояния, электрической проводимости связей и свойств отдельных элементов (например, установленная мощность электростанции, степень физического износа генерирующего оборудования, доступность топлива для электростанции и т.д.). Если параметр принимает значение Union, то для каждой электростанции (центра питания, источника) результат определяется как объединение множеств потребителей электрической энергии из различных распределений по разным критериям. Если параметр принимает значение Intersection то принимается пересечение распределений по различным критериям [4].

### III. ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПВК «КАПРЭС»

Разработанный ПВК «КАПРЭС» представляет собой пример автоматизированной реализации эвристического алгоритма на основе теории нечетких множеств (далее - ТНМ), что является дополнением к результатам, получаемым по итогам экспертного анализа решения задачи перспективного развития ЭЭС. Особенностью использования здесь эвристических алгоритмов является возможность связывания нечетких понятий, которыми пользуется лицо, (ЛПР), с формализованным числовым отображением этих понятий в ПВК. Многие параметры, определяющие возможные варианты, не могут быть точно измерены, поэтому затруднительно их описание и представление их количественной меры обычными математическими методами. Данная проблема решается, если информацию представлять в категориях ТНМ.

Применение аппарата ТНМ позволяет создавать адекватные модели структур принятия решений, отражающие принципы «принятия» решений и меры предпочтительности условий и на каждом иерархическом уровне. Погрешности, которые являются следствием применения эвристического метода экспертных оценок, могут быть уменьшены за счет привлечения большого числа экспертов, проверки компетентности экспертов, входящих в одну экспертную комиссию, усреднением и вероятностной обработкой субъективных мнений экспертов.

В целях расширения функционала ПВК «КАПРЭС» разработана в виде конструктора и позволяет пользователю самостоятельно определить индивидуальные исходные параметры отдельной задачи и проекта и провести предварительную подготовку приведения параметров, что обеспечивает наибольшую гибкость при решении сложных многокритериальных задач перспективного развития ЭЭС.

Важным фактором, определяющим актуальность развития ПВК «КАПРЭС» является то, что при увеличении размерности ЭЭС и трудностей определения рациональных решений в части перспектив развития ЭЭС, данный расчетный комплекс может выступать как дополнительный модуль оценки рациональных решений в совокупности с применением методов экспертного анализа с учетом обеспечения надежности функционирования ЭЭС и интересов отдельных участников ЭЭС (генерирующие компании, электросетевые организации, крупные потребители электрической энергии).

Разработка ПВК «КАПРЭС», прежде всего, нацелена на привлечение большего внимания субъектов электроэнергетики и специалистов электроэнергетической отрасли к необходимости применения инновационных технологий в задачах перспективного развития электроэнергетического комплекса регионов страны.

### Список литературы

- [1] Шефер Г. Учет неопределенных факторов в процессе принятия решения. Сан Матео. Калифорния, 1990.
- [2] А.Л. Мызин, А.А. Костин, П.Е. Мезенцев. Моделирование состояния электростанций и связи между энергорайонами энергосистемы. Вестник НГТУ, 2011. – С. 67 – 82.
- [3] А.А. Костин, П.Е. Мезенцев, В.П. Обоскалов. Применение классической и поведенческой моделей принятия решений в контексте решения задач развития ЭЭС. Труды международной Научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи – 2015», 2015. – С. 343 – 349.
- [4] А.А. Костин, П.Е. Мезенцев, В.П. Обоскалов. Анализ неопределенности в задачах автоматизированного развития ЭЭС и ее учет в ПВК «КАПРЭС». Сборник докладов 6-й международной научно-практической конференции «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» в рамках специализированного форума «Expo Build Russia», 2017. – С. 53-57.

# Улучшение качества электроэнергии в сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции

А.В. Крюков<sup>1 а</sup>, А.П. Куцый<sup>1 б</sup>, А.В. Черепанов<sup>1 с</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения", Иркутск, Россия  
E-mail: <sup>а</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>б</sup> tosha1993irc@yandex.ru, <sup>с</sup> santela89@mail.ru

*Аннотация* – В электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог, в полном объеме применимы технологии интеллектуальных электрических сетей (smart grid). Задача использования таких технологий имеет большую значимость в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, где основная системообразующая электрическая сеть непосредственно связана с тяговыми подстанциями железнодорожных магистралей. Ввиду значительного объема резкопеременной, нелинейной и однофазной тяговой нагрузки показатели качества электроэнергии в этих сетях далеко выходят за допустимые пределы. Поэтому проблема управления качеством электроэнергии на основе интеллектуальных технологий приобретает особую актуальность.

В статье приводится описание компьютерных моделей активных элементов smart grid, отличающихся применимостью в задачах управления качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог. Представлены компьютерные технологии управления качеством электроэнергии на основе концепции интеллектуальных электрических сетей;

На основе результатов проведенных исследований возможно решение следующих актуальных практических задач:

- моделирование режимов электрических сетей 110-200 кВ, питающих тяговые подстанции, с учетом активных устройств по улучшению качества электроэнергии;
- рациональный выбор комплекса интеллектуальных средств автоматического управления качеством электроэнергии в системах внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока;
- уменьшение несимметрии и снижение гармонических искажений.

На основе разработанных моделей и компьютерных технологий возможна реализация интеллектуальных подходов к проблеме управления качеством электроэнергии в электрических сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции железных дорог переменного тока.

*Ключевые слова* – электрические сети 110-220 кВ, тяговые подстанции железных дорог, улучшение качества электроэнергии.

## Improvement of the electric power quality in networks of 110-220 kV feeding traction substations

A.V. Kryukov<sup>1 а</sup>, A.P. Kutsyi<sup>1 б</sup>, A.V. Cherepanov<sup>1 с</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk state transport university, Irkutsk, Russia  
E-mail: <sup>а</sup> and\_kryukov@mail.ru, <sup>б</sup> tosha1993irc@yandex.ru, <sup>с</sup> santela89@mail.ru

*Abstract* – On the electrical networks feeding tractive substations of the railroads technologies of intelligent electrical networks (smart grid) are in full applicable. The task of use of such technologies has the big significance in Eastern Siberia and in the Far East where the main backbone electrical network is directly connected to tractive substations of railway lines. In view of the considerable volume of alternating, non-linear and single-phase tractive loading electric power figures of merit on these networks far quit for tolerable limits. Therefore the problem of quality management of the electric power on the basis of intellectual technologies acquires special relevance.

In article the description of computer models of the active elements of smart grid, the quality managements of the electric power differing in applicability in tasks is provided in systems of electrical power supply of the railroads. Computer technologies of quality management of the electric power on the basis of the concept of intelligent electrical networks are provided;

Researches were conducted on the basis of the program Fazonord complex developed in Irkutsk state transport university and upgraded regarding implementation of technologies of quality management of the electric power on the basis of the concept of intelligent electrical networks.

On the basis of results of the conducted researches the decision of the following urgent practical tasks is possible:

- simulation of the modes of electrical networks of 110-200 kV feeding tractive substations taking into account the active devices on improving of quality of the electric power;
- a rational choice of a complex of intellectual means of automatic control of quality of the electric power in systems of external electrical power supply of the railroads of an alternating current;
- reduction of asymmetry and lowering of harmonic distortions.

On the basis of the developed models and computer technologies implementation of intellectual approaches to a problem of quality management of the electric power on electrical networks of 110-220 kV feeding tractive substations of the railroads of an alternating current is possible.

*Keywords:* electrical networks of 110-220 kV, tractive substations of the railroads, improving of quality of the electric power.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Технологии интеллектуальных сетей (smart grid) [1 – 6], на основе которых возможно эффективно решать задачи управления качеством электроэнергии [7] полностью применимы в электрических сетях, питающих тяговые подстанции (ТП) магистральных железных дорог, а также в системах тягового электроснабжения (СТЭ). В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке основная системообразующая электрическая сеть непосредственно связана с ТП Транссиба и потому вопросы улучшения качества электроэнергии в этих сетях приобретают особую актуальность.

## II. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СТЭ

Интеллектуальная система тягового электро-

снабжения (ИСТЭ) включает в свой состав следующие сегменты (рис. 1):

- развитые комплексы, работающие в режиме on line и обеспечивающие мониторинг состояния электрооборудования;
- устройства автоматического управления, использующие цифровые технологии;
- источники реактивной мощности, оснащенные устройствами пофазного управления;
- накопители электроэнергии [7] и установки распределенной генерации;
- активные кондиционеры гармоник (АКГ), симметрирующие трансформаторы и другие устройства.

На схеме, представленной на рис. 2, показано размещение интеллектуальных устройств в СТЭ.

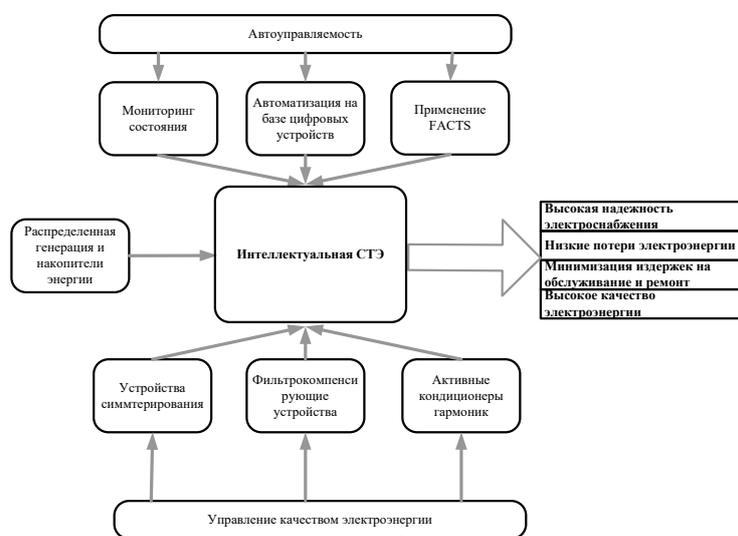


Рис. 1. Структура ИСТЭ:

FACTS (flexible alternative current transmission systems) – комплекс технических и информационных средств автоматического управления режимами

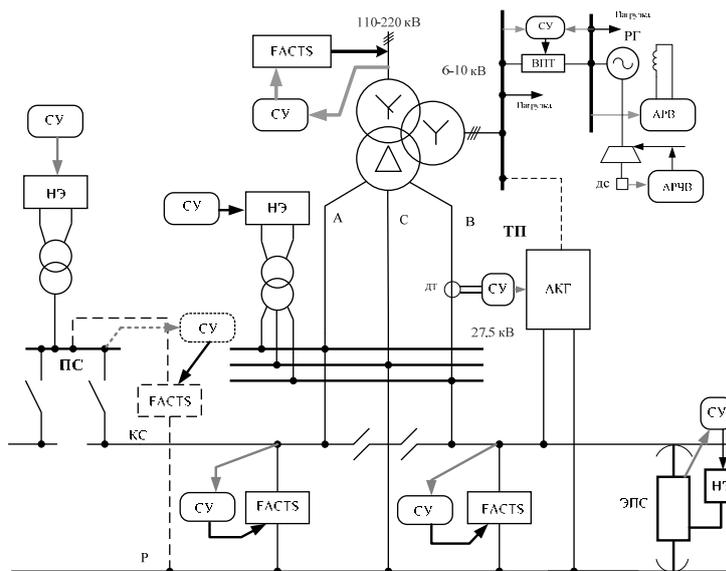


Рис. 2. Установка интеллектуальных устройств управления в системе тягового электроснабжения: АРВ, АРЧВ – автоматические регуляторы возбуждения и частоты вращения генераторов РГ; СУ – система управления; ДТ, ДС – датчики тока и скорости вращения; НЭ – накопители энергии; ЭПС – электроподвижной состав; РГ – распределенная генерация; ВПТ – вставка постоянного тока

Классификация технических средств управления режимами СТЭ проиллюстрирована схемой, представленной на рис. 3.



Рис. 3. Средства управления режимами СТЭ:

ВГ – высшие гармоники; ВДТА – вольтодобавочный трансформаторный агрегат; НЭ – накопитель электроэнергии; РГ – распределенная генерация; СТ – симметрирующий трансформатор; ТОУ – токоограничивающее устройство.

Так как функции отдельных средств smart grid могут дублировать друг друга, то размещение полного комплекса интеллектуальных устройств на каждой тяговой подстанции нецелесообразно.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СТЭ

Алгоритм комплексного моделирования ИСТЭ включает два этапа, в каждом из которых используются разные модели. В основе первого этапа лежит разработанная в ИрГУПСе технология имитационного моделирования режимов СТЭ [7, 8]. Полученные на первом этапе экстремальные величины тяговых нагрузок и потоки мощности на вводах 110-220 кВ ТП используются на втором этапе при построении динамических моделей с использованием средств программной системы Matlab. Исследования показывают, что на основе комплексного применения имитационных и динамических моделей можно получить адекватный результат.

Отличия в технологиях имитационного и динамического моделирования элементов smart grid могут приводить к некоторым различиям в результатах определения показателей качества электроэнергии. Тем не менее, в рамках теоретико-множественного подхода можно говорить о совпадении результатов как о принадлежности некоторой ограниченной области пространства параметров:  $G_I \cap G_M \approx \emptyset$ , где  $G_I, G_M$  – соответственно, множества расчетных параметров, полученных на основе имитационных и динамических моделей.

**Результаты моделирования.** В качестве первого примера представлены результаты моделирова-

ния режимов реальной сети 220 кВ, от которой питаются тяговые подстанции одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири. Цель моделирования заключалась в анализе эффективности применения пофазно управляемых устройств FACTS для уменьшения несимметрии. Под FACTS (flexible alternative current transmission systems) понимается комплекс технических и информационных средств автоматического управления режимами. Рассматривались две структурные схемы устройства:

- FACTS, силовые элементы которого включены по схеме «звезда»;
- FACTS с элементами, включенными по схеме «треугольник».

Полученные результаты позволили сформулировать следующие выводы (рис. 4):

- при отсутствии FACTS коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $k_{2U}$  на шинах 220 кВ ТП превышает нормально допустимые значения;
- установка пофазно управляемого FACTS на одной из тяговых подстанций дает возможность полной нормализации показателя  $k_{2U}$  на шинах всех ТП рассматриваемого полигона;
- лучшее симметрирование обеспечивает FACTS, силовые блоки которого соединены в треугольник.

Во втором примере иллюстрируется методика моделирования активных кондиционеров гармоник на основе резонансных схем, имеющих малую проводимость на основной частоте и замыкающие узел подключения на землю при частотах высших гармоник [7]. В результате многовариантного моделирования при различных графиках движения поез-

дов дали возможность сформулировать следующие выводы:

1. При отсутствии средств подавления высших гармоник коэффициенты гармоник  $k_U$  на шинах 220 кВ десяти тяговых подстанций превышают предельно допустимые значения.

2. Использование пассивных фильтров на подстанциях с большим уровнем гармонических искажений приводит к росту гармоник высоких порядков на других подстанциях.

3. Рассматриваемая СТЭ имела тяговую сеть 2х25 кВ и включала наряду с контактной подвеской питающие провода. Моделирование показало, что включение АКГ достаточно только для фидеров контактной сети. Кондиционеры на фидера питающих проводов устанавливать не нужно.

4. Установка АКГ на плечах питания восьми ТП обеспечивает снижение  $k_U$  до допустимых значений.

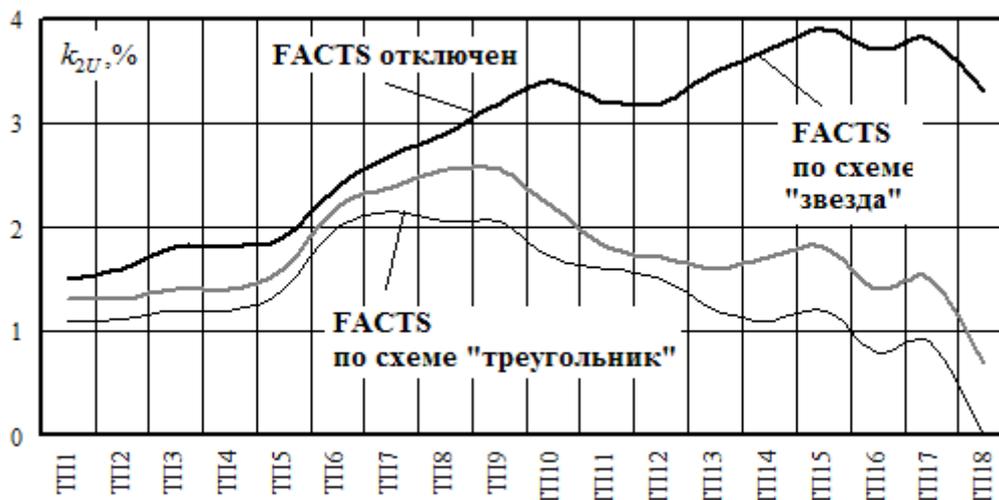


Рис. 4. Максимальные значения коэффициентов несимметрии по обратной последовательности на шинах 220 кВ ТП

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи управления качеством электроэнергии в сетях 110-200 кВ, питающих тяговые подстанции, могут быть решены на основе описанных выше методов и алгоритмов моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог переменного тока, построенных с использованием технологий smart grid. При разработке моделей преодолены следующие затруднения:

- нелинейный, динамический и многоуровневый характер систем тягового электроснабжения требует изменения не только численных значений коэффициентов, но и структуры реализуемой модели;

- активные элементы, которые используются в технологиях smart grid, приводят к еще большему усложнению моделей активно-адаптивных сетей, питающих тяговые нагрузки.

Преодолеть указанные затруднения возможно на основе методов декомпозиции путем разбиения процесса моделирования на два этапа: на первом применяются имитационные технологии, а на втором — динамические модели.

Предложенная технология комплексного моделирования может эффективно применяться в задачах проектирования и эксплуатации интеллекту-

альных СТЭ, на основе которых можно существенно улучшить показатели качества электроэнергии по несимметрии и несинусоидальности.

#### Список литературы

- [1] Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть — новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. — № 4.— 2009. — С. 29-34.
- [2] Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции smart grid. — М.: ИАЦ, 2010. — 208 с.
- [3] Массель Л.В. Проблемы создания smart grid в России с позиций информационных технологий и кибербезопасности // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — Иркутск, 2014. — С. 171-181.
- [4] Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог. — Омск: ОмГУПС, 2013. — 195 с.
- [5] Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В.А. Ушаков, В.А. Алексеенко. — Иркутск: ИрГУПС, 2012. — 129 с.
- [6] Плеханов В.И. Передовые технологии передачи электроэнергии в Европе: стратегический план по развитию сети smart grid // Современные научные исследования и инновации. — № 2-2(46). 2015. — С. 160-167.
- [7] Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. — Иркутск: Издательство ИрНТУ, 2015. — 218 с.
- [8] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. — 273 с.

# Транспортировка электрической энергии на основе СВЧ-луча и ректенн

Д.Н. Гура, В.М. Новиков, В.Я. Яловой, А.Л. Корольков  
ФГАОУ ВПО СКФУ, ФГБОУ ВПО РГУПС, Филиал АО «СО ЕЭС» Северокавказское РДУ  
Пятигорск, Ростов-на-Дону, Россия  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

**Аннотация** — на Северном Кавказе в связи с развитием туристического кластера встаёт вопрос подачи электрической энергии в труднодоступные места. Постройка традиционных линий передачи электрической энергии, таких как проводные, кабельные зачастую невозможна или слишком дорого. В статье исследуемая проблема рассматривается с точки зрения использования микроволнового диапазона радиоволн.

**Ключевые слова:** электрическая энергия, ректенна, полуволновый вибратор, диполь, программа Манна, мощность сигнала передатчика, коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн.

## The transportation of electric energy on the basis of microwave beam and rectan

D.N. Gura, V.M. Novikov, V.Y. Yalovoy, A.L. Korolkov  
FSAEI HPE NCFU, FSAEI HPE RSRTU, JSC “SO UPS” North Caucasus RDU  
Pytigorsk, Rostov-on-Don, Russia  
GuraDN@skrdu.-soups.ru

**Abstract** — With the development of the tourism cluster the question of the supply of electricity raises in hard to reach places in the North Caucasus. The construction of traditional lines of transmission of electrical energy, such as wired, cable is often impossible or too expensive. In the article the research problem is considered from the point of view of the use of microwave wavelengths.

**Keywords:** electric energy, rectenna, half-wave vibrator, the dipole, the manna program, transmission power, gain of transmitting and receiving antennas.

### I. ВВЕДЕНИЕ

В качестве проводников при передаче электрической энергии от её источника к приёмнику (потребителю) используются воздушные и кабельные линии электропередач. Проводная передача электрической энергии требует значительных затрат на проектирование, строительство линий, их обслуживание и ремонт.

### II. БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА

Технологические методы беспроводной передачи энергии могут быть разнообразны. Из них можно выделить основные [2]: лазерный, индукционный, резонансный, с использованием направленного луча сверхвысокой частоты (СВЧ), с последующим преобразованием в постоянный ток.

Развитие радиолокации и интенсивные работы по освоению дециметровых и сантиметровых диапазонов волн заложили основу для широкого использования СВЧ-

энергетики и вызвали растущий интерес к беспроводной передаче энергии с помощью направленного микроволнового излучения [1]. Микроволновый диапазон (2,4-5,8 ГГц) даёт возможность существенно уменьшить размеры передающих и приёмных антенн и отличается высоким уровнем эффективности устройств генерации и преобразования энергии электромагнитного излучения.

Наиболее распространённым типом преобразователя микроволн в постоянный электрический ток является ректенна с полупроводниковыми СВЧ-диодами и диодами Шоттки [1].

### III. НЕЛИНЕЙНАЯ АНТЕННА

Ректенна (от англ. Rectifying) устройство, представляющее собой нелинейную антенну, предназначенную для преобразования энергии поля падающей на неё волны в энергию постоянного тока. Простейшим вариантом конструкции может быть полуволновый вибратор, между плечами которого устанавливается устройство с односторонней

проводимостью (например, диод). В таком варианте конструкции антенна совмещается с детектором, на выходе которого, при наличии падающей волны, появляется ЭДС. Для повышения усиления такие устройства могут быть объединены в многоэлементные решётки [7].

Ректенны могут применяться в качестве приёмников в каналах передачи энергии на большие расстояния, что особенно важно при транспортировке энергии.

Для проведения эксперимента выбрана схема приёмного устройства:

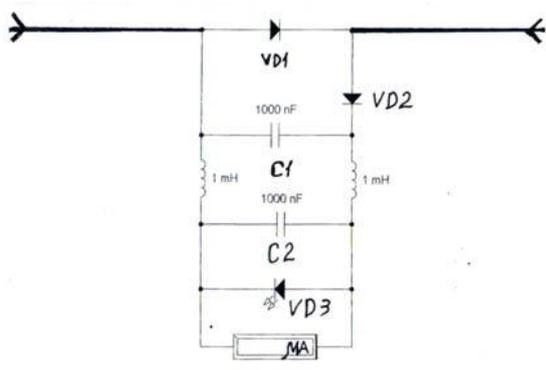


Рис. 1. Схема принципиальная принимающего устройства

Схема рассчитана на частоту принимаемого сигнала 2,4 ГГц. Кагушки индуктивности намотаны на ферритовых кольцах, в качестве СВЧ-диодов при проведении экспериментов использовались диоды: Д18, Д405, в качестве передатчика использовались: микроволновая печь (дверца закрыта), устройство Wi-Fi, мобильный телефон в режиме разговора.

Использовались три типа антенн: диполь, волновой канал с тремя элементами, волновой канал с шестью элементами. Лучшие результаты получены при использовании антенны волновой канал с шестью элементами.

Расчет параметров антенны типа «Диполь» в программе Mmana представлен на Рис. 2.



Рис. 2. Расчёт параметров антенны типа «Диполь» в программе Mmana

Диаграмма направленности антенны типа «Диполь» в программе Mmana представлен на Рис. 3.

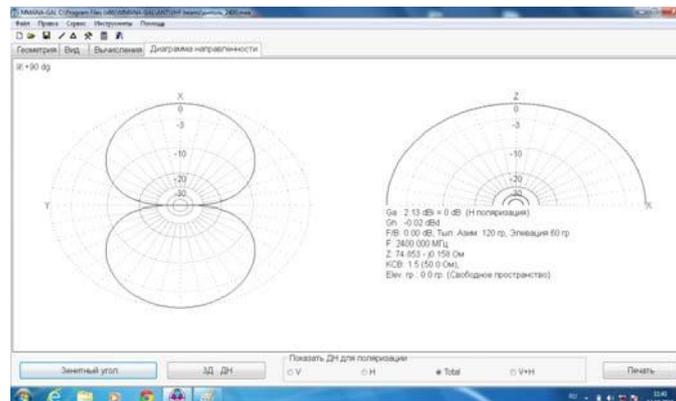


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны типа «Диполь»

Замер СВЧ-излучения микроволновой печи представлен на Рис. 4.



Рис. 4. Замер СВЧ-излучения микроволновой печи

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа представляет собой первый этап серии экспериментов, направленных на исследование беспроводной передачи электрической энергии на расстояние. Она имеет практическое значение для электроэнергетики.

#### Список литературы

- [1] Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика, М., 2003.
- [2] Беспроводная передача электричества, <http://ru.wikipedia.org> (дата обращения 30. 10. 15)
- [3] Беспроводное электричество, <http://lib.convdocs.org> (дата обращения 30. 10. 15)
- [4] Ректенна, <http://ru.wikipedia.org> (дата обращения 30. 10. 15)
- [5] Колосовский Е.А. Устройства приёма и обработки сигналов. Учебное пособие для Вузов-М: Горячая линия 2003-456с.
- [6] Радиоприёмные устройства. Учебник для Вузов Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Голевин. Под редакцией Н.Н. Фомина. 3-е изд. Стереотип. –М: Горячая линия – Телеком, 2007, -520с.
- [7] Моделирование многоэлементных ректенн для приёма энергии в диапазоне микроволн. Ян Чунь МГУ 2006. <http://dslib.net> (дата обращения 3. 11. 15)
- [8] Энергетическая стратегия России на период до 2030г. <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/> (дата обращения 25. 10. 15)

# РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА ТОПЛИВНО — ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА БАЗЕ

## ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ЭНЕРГОПОРТАЛ»

С.А.Авдонькин, А.А.Колесников

АО «Новокуйбышевская нефтехимическая компания», Новокуйбышевск, Россия

E-mail: [sergei@avdonkin.ru](mailto:sergei@avdonkin.ru)

**Аннотация** - для повышения экономичности Новокуйбышевской ТЭЦ-2 (далее-НкТЭЦ-2), обеспечивающей покрытие тепловых мощностей основного потребителя – АО «Новокуйбышевская нефтехимическая компания» (далее-АО «ННК»), на базе передовых технологий в области ИТ спроектирован, разработан и внедрен программный комплекс «Энергопортал». Комплекс позволяет в режиме реального времени контролировать движение энергетических потоков в полном объеме, а также моделировать и прогнозировать режим работы НкТЭЦ-2.

**Ключевые слова** — энергоэффективность; программный комплекс; оптовый рынок электроэнергии и мощности; теплоэнергия; электроэнергия; собственные нужды; диспетчерский график генерации.

## FUEL AND ENERGY MONITORING SYSTEM REALISATION BASED ON "ENERGYPORTAL" SOFTWARE COMPLEX

Avdonkin S.A. Kolesnikov A.A.

JSC “Novokuybyshevsk petrochemical company”, Novokuybyshevsk, Russia

E-mail: [sergei@avdonkin.ru](mailto:sergei@avdonkin.ru)

**Abstract** - Novokuybyshevsk Heat Power Station-2 (NHPS-2) provides thermal capacities for the main consumer - JSC “Novokuybyshevsk petrochemical company” (JSC “NPC”). To increase the Novokuybyshevsk Heat Power Station-2 (NHPS-2) economy there was designed, developed and implemented software package based on advanced technology - "Energyportal". This software package allows user to monitor energy flows and simulate working mode of Heat Power Station in real-time mode.

**Keywords** — energy efficiency; Software complex; Wholesale Electric Energy/Power Market; Heat energy; Electricity; own needs; Dispatching schedule of generation.

### I. ВВЕДЕНИЕ

АО «Новокуйбышевская нефтехимическая компания» — один из крупнейших производителей продукции газопереработки, нефтехимии и органического синтеза в Самарской области.

В 2013 году, для обеспечения покрытия тепловых мощностей компании, в состав АО «ННК» вошла Новокуйбышевская ТЭЦ-2 с установленной мощностью 340 МВт (1070 Гкал/час).

В настоящее время энергосбережение крупных промышленных предприятий является одной из самых актуальных проблем. Ни для кого не секрет, что основной составляющей в конечной стоимости выпускаемой продукции являются энергетические ресурсы.

Руководством АО «ННК» были поставлены следующие цели:

- Повысить надежность энергоснабжения производственных площадок АО «ННК».
- Повысить эффективность работы НК-ТЭЦ-2 и максимально снизить себестоимость поставляемой теплоэнергии, рассчитанной по принципу единого продукта (покрытие затрат на производство

дополнительной выручкой от реализации электрической энергии и мощности на оптовом рынке).

Для реализации вышеуказанных задач, сотрудниками, имеющими многолетний опыт работы в крупных софтверных и генерирующих компаниях-участниках оптового рынка электроэнергии и мощности (далее-ОРЭМ), разработан и внедрен в промышленную эксплуатацию программный комплекс «Энергопортал», имеющий многомодульную архитектуру.

### II. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ.

Программный комплекс представляет собой единое информационное пространство, осуществляющее сбор и хранение данных с внешних автоматизированных систем и источников, выполняющий следующие функции:

- **Оптимизация состава и параметров включенного генерирующего оборудования.**  
Турбогенераторы, котлоагрегаты, вспомогательное оборудование, оптимальное распределение тепловых и электрических нагрузок по агрегатам;
- **Оперативный учет и контроль потребления и производства энергетических ресурсов.**

Электрическая энергия, тепловая энергия, газ, водоотведение, паровой конденсат и др.;

• **Моделирование режимов работы станции в зависимости от различных внешних факторов.**

Построение и сравнение различных вариантов с составом и параметрами включенного генерирующего оборудования с учетом влияния внешних факторов и рыночной конъюнктурой;

• **Оперативный контроль состояния включенного основного и вспомогательного оборудования.**

Мнемосхема станции с параметрами работы оборудования в режиме реального времени;

• **Расчет, контроль и выдача рекомендаций по выполнению диспетчерского графика.**

Визуализация, расчет удельного диспетчерского графика (УДГ), рекомендации по отклонению от диспетчерского графика (ДГ).

• **Оперативные расчеты отклонений Балансирующего рынка.**

Расчет финансовых обязательств и требований в режиме реального времени с целью оценки правильности и корректировки выбранной стратегии;

• **Анализ стоимостей снижения по готовности генерирующего оборудования**

Оперативная оценка снижения оплаты поставляемой мощности за текущий месяц;

• **Расчет фактических и прогнозных удельных расходов топлива.**

На основании выбранного оптимального состава и параметров генерирующего оборудования расчет планов по относительным приростам удельных расходов на сутки вперед и фактических значений в режиме реального времени;

• **Факторный анализ производственной программы и финансовых показателей в сопоставлении с бизнес-планом.**

• **Анализ конкурентного окружения участников ОРЭМ.**

Определение стратегии участия торговых аукционов на оптовом рынке крупных тепловых электростанций, режимов работы ГЭС, АЭС, анализ влияния сетевых ремонтов на узловые цены ОРЭМ.

Работа комплекса в едином информационном пространстве, объединяющим как технико-экономические показатели работы станции, так и результаты деятельности на оптовом рынке, позволяет оперативно принимать верные управленческие решения, направленные на достижение максимального маржинального дохода и высокой надежности работы станции в целом.

III. ТЕХНОЛОГИИ.

Программный комплекс «Энергопортал» (рис.1) представляет собой высокотехнологичную платформу, работающую с единым информационным пространством – реляционной базой данных (MS SQL).

Комплекс имеет клиент-серверную архитектуру и разработан на основе передовых технологий в области ИТ с использованием платформонезависимых инструментов. Серверная часть представлена в виде кластеров с балансировкой нагрузки.

Используемые серверные технологии:

- Операционная система: на выбор Microsoft Windows Server, RedHat, CentOS;
- Система управления базами данных: Microsoft SQL Server 2016;
- Сервера приложений JBOSS, WildFly, Apache Tomcat;
- Web Сервер Apache HTTP Server.



Рис.1 Схема взаимодействия ПК «Энергопортал»

ПК «Энергопортал» имеет адаптивный интерфейс, подстраивающийся под возможности платформы (настольной и мобильной), и идеален для работы в любом современном браузере как персонального компьютера, так и мобильного устройства.

ПК «Энергопортал» состоит из крупных блоков (рис.2) с последующим разделением на подмодули:

- **Производственный блок.**  
Расчет ТЭП, диспетчерский график, мнемосхема, отпуск теплоэнергии, топливоиспользование, выработка электрической энергии, фиксация фактических параметров работы НкТЭЦ-2 для расследования инцидентов;
- **Блок по работе на оптовом рынке.**  
Анализ рынка, определение стратегии участия, расчет результатов операционной деятельности, прогнозирование и анализ модельных режимов работы станции;
- **Административный блок.**  
Разграничение прав доступа пользователей комплекса по полномочиям, контроль работоспособности ПК «Энергопортал» (отслеживание сбоев и критических ошибок).

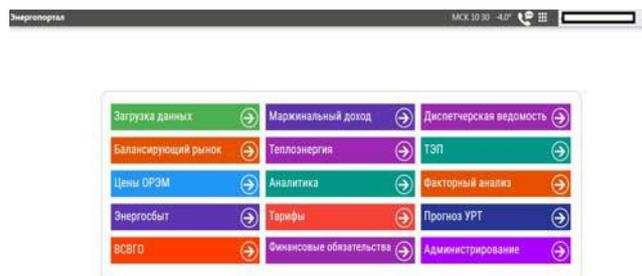


Рис.2 Главная страница ПК «Энергопортал»

В качестве примера работы рассмотрим некоторые подмодули:

- Модель режимов;
- Диспетчерский график;
- ТЭП;
- Подача ценовых заявок в автоматическом режиме;
- Система получения данных текущей работы НкТЭЦ-2 «TelegramMessage».

Подмодуль «Модель режимов» (рис.3) предназначен для определения оптимального варианта состава и параметров включенного генерирующего оборудования станции в сопоставлении с ценовыми показателями оптового рынка, обеспечивающего эффективность работы станции и достижения максимального дохода от реализации электроэнергии и мощности на ОРЭМ, с учетом обеспечения надежности энергоснабжения потребителей.

№	Оборудование	Цена	Количество	Цена	Количество	Цена	Количество	Цена	Количество
1	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150
2	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150
3	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150
4	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150
5	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150
6	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150
7	20700.00	0.00	42920.81	1.752	131	1.752	145	130	1.150

Рис.3 «Модель режимов» ПК «Энергопортал»

Подмодуль «Диспетчерский график» (рис.4) предназначен для расчета задания по ведению диспетчерского графика генерации электрической энергии с учетом плана балансирующего рынка и внеплановых диспетчерских команд системного оператора ОРЭМ.

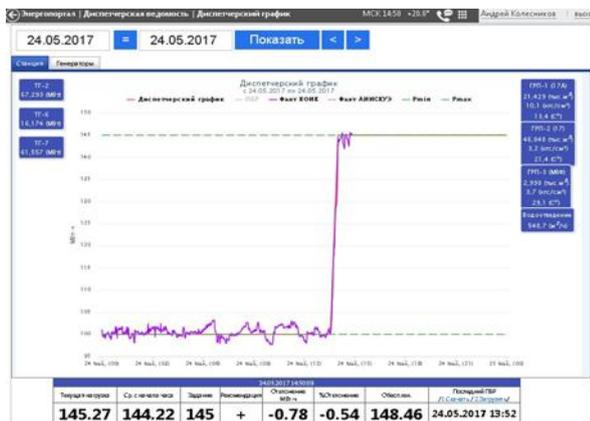


Рис.4 «Диспетчерский график» ПК «Энергопортал»

Также рассчитываются обеспечивающая нагрузка, позволяющая выполнить часовое задание ДГ. Отображается текущее выполнение задания ДГ, рассчитывается процент отклонения и превышения допустимых значений от задания.

Помимо этого, на основании текущих ценовых показателей ОРЭМ, выдаются рекомендации по величине и направлению отклонения фактической выработки электрической энергии от задания, с целью максимизации выручки от проданной электроэнергии.

Расчет рекомендаций:

$$\left. \begin{aligned} & \left( \begin{aligned} \min(C_{PCB} \cdot I_{BR}; C_{заявки}) - T_{составляющая} > T_{составляющая} - \max(C_{PCB}; I_{BR}; C_{заявки}) \rightarrow \\ \min(C_{PCB} \cdot I_{BR}; C_{заявки}) - T_{составляющая} < S_{небаланс} \rightarrow 1 \vee \\ \min(C_{PCB} \cdot I_{BR}; C_{заявки}) - T_{составляющая} > S_{небаланс} \rightarrow Y_{ДГ} * 2/100 \end{aligned} \right) \vee \\ & \left( \begin{aligned} \min(C_{PCB} \cdot I_{BR}; C_{заявки}) - T_{составляющая} < T_{составляющая} - \max(C_{PCB}; I_{BR}; C_{заявки}) \rightarrow \\ T_{составляющая} - \max(C_{PCB}; I_{BR}; C_{заявки}) < S_{небаланс} \rightarrow -1 \vee \\ T_{составляющая} - \max(C_{PCB}; I_{BR}; C_{заявки}) > S_{небаланс} \rightarrow \\ Y_{ДГ} * 2/100 > 10 \rightarrow -10 \vee Y_{ДГ} * 2/100 < 10 \rightarrow -Y_{ДГ} * 2/100 \end{aligned} \right) \end{aligned} \right\} (1)$$

где,  $C_{PCB}$  - цена заявки рынка на сутки вперед (далее-PCB);

$I_{BR}$  -индикатор балансирующего рынка;

$C_{заявки}$  -цена заявки участника;

$T_{составляющая}$  -топливная составляющая;

$Y_{ДГ}$  -усредненный диспетчерский график.

Подмодуль Система получения данных текущей работы НкТЭЦ-2 «TelegramMessage» предназначен для контроля текущей работы Новокуйбышевской ТЭЦ-2 и оповещения ответственных сотрудников АО «ННК» о плановых событиях и внештатных ситуациях (рис.5).

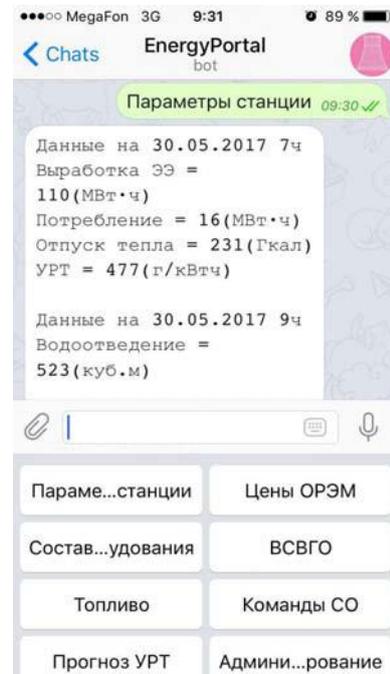


Рис.5 Система получения данных текущей работы НкТЭЦ-2 «TelegramMessage» ПК «Энергопортал»

С помощью данной системы реализован доступ к информации из ПК «Энергопортал» посредством команд приложения «Telegram». Также реализована рассылка уведомлений о событиях, индивидуально определяемая служебными полномочиями.

Подмодуль «ТЭП» (рис.6) предназначен для контроля и расчета в режиме реального времени основных технико-экономических показателей, к которым относятся: выработка и потребление электроэнергии, потребление двух видов натурального топлива и одного, выпускаемого АО «ННК», с фактической калорийностью, удельный расход топлива (далее-УРТ) на отпущенную тепловую и электрическую энергию.

Дата	Час	Объем ЭЭ (МВт)	Потребление (С/МВт)	Отпуск тепла (Гкал)	Расход натурального топлива			Расход условного топлива			Целевой расход топлива			Классификация		Объем ЭЭ (МВт)
					ГРП (тыс.т)	ГРП (тыс.т)	ГРП (тыс.т)	Мет (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	ТЭ (тыс.т)	
23.05.2017	1	118.83	17.08	358.88	19.24	47.54	2.8407	44.85	42.00	86.85	434.58	148.50	0.000,30	0.113,00	0.641,31	
23.05.2017	2	118.38	17.04	355.88	19.06	47.53	2.8010	44.54	41.84	86.38	435.18	148.50	0.000,30	0.113,00	0.641,30	
23.05.2017	3	118.71	17.05	362.80	19.63	47.36	2.7407	45.11	41.43	86.54	439.45	148.50	0.000,30	0.113,00	0.634,80	
23.05.2017	4	118.41	16.97	364.82	19.59	47.62	2.2510	46.35	39.36	85.64	451.81	148.50	0.000,30	0.113,00	0.622,18	
23.05.2017	5	120.85	16.98	367.80	19.95	47.48	2.4510	45.75	39.35	84.95	441.35	148.50	0.000,30	0.113,00	0.639,78	
23.05.2017	6	120.41	16.98	368.88	19.36	47.25	2.2714	45.54	39.36	84.96	440.27	148.50	0.000,30	0.113,00	0.640,88	
23.05.2017	7	120.32	17.02	368.06	18.43	47.21	2.5903	45.54	39.37	84.81	441.32	148.50	0.000,30	0.113,00	0.643,71	
23.05.2017	8	120.82	17.18	363.26	18.53	47.21	2.1957	46.49	39.59	85.87	441.15	148.50	0.000,30	0.113,00	0.670,33	
23.05.2017	9	120.57	17.27	363.02	18.85	47.29	2.4316	46.42	39.27	85.69	449.42	148.50	0.000,30	0.113,00	0.637,08	
23.05.2017	10	120.89	16.77	363.45	19.74	47.46	3.5900	49.23	38.59	87.88	471.37	148.50	0.000,30	0.113,00	0.707,72	
Итого		1202.81	176.35	2722.89	188.32	474.18	24.7150	459.59	390.82	858.51	445.49	148.50	0.000,30	0.113,00	45900.36	

Рис.6 «Часовой анализ» ПК «Энергопортал»

Одним из основных расчетных показателей является УРТ на отпуск электроэнергии, влияющий на себестоимость электроэнергии и предопределяющий эффективность работы на ОРЭМ. УРТ рассчитывается в соответствии с нормативами, указанными в инструкции Минэнерго России [1].

$$\sum B_{усл} = \frac{B_{ГРП} * Q_{ПГ}}{Q_{усл}} + \frac{B_{ГРП} * Q_{ПГ}}{Q_{усл}} + \frac{B_{ГРВ} * Q_{МВФ}}{Q_{усл}}; \quad (2)$$

$$B_{ТЭ} = \frac{Q * b_{ТЭ}}{1000}; \quad (3)$$

$$B_{ЭЭ} = \sum B_{усл} - B_{ТЭ}; \quad (4)$$

$$b_{ЭЭ} = \frac{B_{ЭЭ} * 1000}{N - СН}; \quad (5)$$

где,  $B_{усл}$  - расход условного топлива;

$B_{ГРП}$  -расход натурального топлива по ГРП;

$Q$  -отпуск тепла;

$Q_{ПГ}$  -калорийность природного газа;

$Q_{МВФ}$  -калорийность метано-водородной фракции;

$Q_{усл}$  - калорийность условного топлива;

$b_{ТЭ}$  -удельный расход топлива на выработку теплоэнергии;

$B_{ТЭ}$  -расход условного топлива на выработку теплоэнергии;

$b_{ЭЭ}$  - удельный расход топлива на выработку электроэнергии;

$B_{ЭЭ}$  -расход условного топлива на выработку электроэнергии;

$N$  - выработка электроэнергии;

$СН$  - потребление электроэнергии на собственные нужды.

Таким образом, мы имеем структурированную систему технико-экономических показателей, что позволяет придерживаться эффективной стратегии работы на ОРЭМ и оптимизировать работу НкТЭЦ-2.

**Подмодуль «Подача ценовых заявок в автоматическом режиме»** предназначен для ежедневной автоматизированной подачи заявок согласно макетам состава оборудования и рыночной конъюнктуры ОРЭМ. Согласно технико-экономическим показателям, рекомендациям и заданному составу оборудования ПК «Энергопортал» формирует ценовую заявку по установленным алгоритмам расчета с целью максимизации выручки и отправляет сформированную заявку ответственному сотруднику посредством мессенджера «Telegram». При нажатии кнопки «Принять» сформированная заявка отправляется в АО «АТС». При нажатии кнопки «Отказ» сформированная заявка становится доступна для редактирования и корректируется ответственным сотрудником АО «ННК» в ПК «Энергопортал».

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ.

Программный комплекс «Энергопортал» внес значительный вклад в улучшение технико-экономических показателей работы Новокуйбышевской ТЭЦ-2:

- Снижение удельного расхода условного топлива (рис.7) на выработку тепловой и электрической энергии (оптимизирование состава и параметров включенного генерирующего оборудования, снижение потребления электроэнергии на собственные нужды станции, сокращение пережогов топлива);



Рис.7 График удельного расхода топлива

- Повышение операционной эффективности деятельности на ОРЭМ (анализ конкурентного окружения, прогнозирование ценовых показателей рынка, расчет диспетчерского графика генерации и т.п.);
- Повышение надежности энергоснабжения (круглосуточный контроль за интегрированными автоматизированными системами (АСУГ, АСУТ, АИЙСКУЭ НкТЭЦ-2, АИЙСКУЭ АО «ННК», АИЙСТУЭ).

#### Список литературы

- [1] Инструкция по организации в Минэнерго России работы по расчету и обоснованию нормативов удельного расхода топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергию от тепловых электрических станций и котельных : приказ Минэнерго РФ от 30.12.2008г. №323.-М: Минюст РФ ,2009.-76с.

# СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ И ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ В СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Д.Е. Дулепов, Т.Е. Кондраненкова  
ГБОУ ВО "Нижегородский государственный инженерно-экономический университет"  
Княгинино, Россия  
E-mail: tat2192@mail.ru

## *Аннотация*

**Состояние вопроса:** Анализ структуры потерь электроэнергии в сельских электрических сетях показал, что потери в линиях 0,38 кВ составляют 31-33% от общих потерь. Поэтому снижение потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ позволит добиться снижения общих потерь в электрических сетях сельскохозяйственного назначения. Одним из способов достижения поставленной задачи является воздействие на показатели качества электрической энергии, а именно сокращение коэффициентов несимметрии обратной и нулевой последовательностей напряжения. Решение проблемы несимметричных режимов работы сельских распределительных электрических сетей позволит сократить объемы потребляемой электроэнергии, а так же создать благоприятные условия для долговечной и безотказной работы потребителей. Для решения этой проблемы может быть использовано симметрирующее устройство.

**Материалы и методы:** Работа предлагаемого симметрирующего устройства исследовалось на имитационной модели трехфазной электрической сети с разновеликими несимметричными нагрузками в среде Simulink (MatLab).

**Результаты:** Результаты исследования работы симметрирующего устройства показали, что коэффициенты несимметрии обратной и нулевой последовательностей напряжения могут быть снижены до значений, нормируемых ГОСТ, как следствие дополнительные потери при несимметричных режимах работы возможно сократить на 20 %.

**Выводы:** Применение предложенного симметрирующего устройства позволяет улучшить показатели качества электрической энергии и сократить потери при несимметричных режимах работы распределительных сетей 0,38 кВ.

**Ключевые слова:** потери электрической энергии, качество электрической энергии, несимметричный режим, несимметрия напряжений (токов), сельские электрические сети, симметрирующее устройство

## REDUCTION OF LOSS AND ENHANCEMENT OF ELECTRIC ENERGY QUALITY IN NON-SYMMETRIC REGIMES IN RURAL DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS

D.E. Dulepov, T.E. Kondranenkova  
Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University  
Knyaginino, Russian Federation  
E-mail: tat2192@mail.ru

## *Abstract*

**Background:** Analysis of the structure of energy losses in rural power grids showed that the losses in the lines 0.38 kV constitute 31-33% of the total losses. Therefore, the reduction of electricity losses in networks of 0.38 kV will allow to reduce the total losses in electric networks for agricultural purposes. One way of achieving the objectives is the impact on indicators of quality of electric energy, namely the reduction of the coefficients of asymmetry is negative and zero sequence voltage. The solution to the problem of asymmetric modes of rural power distribution networks will reduce the amount of electricity consumed, as well as to create favorable conditions for durable and reliable operation of consumers. To solve this problem can be used symmetric device.

**Materials and Methods:** The proposed symmetric device was studied on the model simulation of three-phase electrical networks with unbalanced load in simulink (MATLAB).

**Results:** The results of investigation of the symmetric device showed that the coefficients of asymmetry for negative and zero sequence voltage can be reduced to values of the normalized GOST, as a consequence of the additional loss in asymmetric modes can be reduced by 20 %.

**Conclusions:** The application of the proposed symmetric device allows to improve electric power quality and reduce losses during asymmetric modes of distribution networks 0,38 kV.

**Key-words:** losses of electric energy, quality of electrical energy, unsymmetry mode of operation, asymmetry of voltages (currents), rural electric networks, symmetric device.

## I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Анализ структуры потерь электроэнергии в действующих электрических сетях сельскохозяйственного назначения показал, что потери в линиях 0,38 кВ составляют 31...33 % от общих потерь.

На рис. 1 представлены графики изменения коэффициента дополнительных потерь мощности. Анализ полученных зависимостей показал, что наибольшее значение коэффициента  $K_p$  характерно для производственной нагрузки. Среднее значение  $K_p$  составляет 1,845, то есть потери мощности на 84,5% превышают соответствующие потери в симметричном режиме работы.

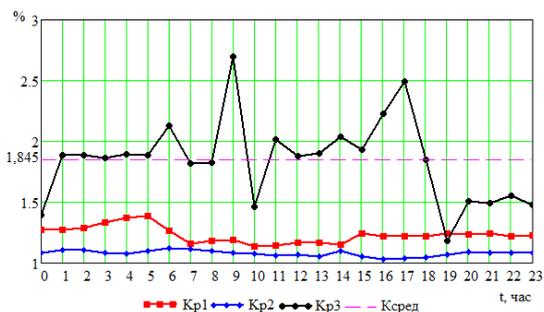


Рис. 1. Временные диаграммы изменения коэффициента дополнительных потерь мощности при различной нагрузке:  $K_{p1}$  – коммунально-бытовой;  $K_{p2}$  – административной;  $K_{p3}$  – производственной;  $K_{сред}$  – среднее значение коэффициента потерь

Поэтому снижение потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ позволит добиться снижения общих потерь в электрических сетях сельскохозяйственного назначения [4].

Одним из способов снижения потерь электрической энергии является воздействие на показатели качества электрической энергии [5]. Нормы и качество электрической энергии регламентирует ГОСТ 32144-2013, который устанавливает нормально и предельно допустимые значения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в распределительных сетях 0,38 кВ [1].

Для снижения уровня несимметрии токов и напряжений в распределительных сетях 0,38 кВ разработаны различные способы и технические средства. Применение симметрирующих устройств является одним из действенных способов снижения потерь электрической энергии в электрических сетях сельскохозяйственного назначения [7, 8].

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предложенное симметрирующее устройство (СУ) работает в функции уровня несимметрии фазных напряжений. Основными элементами данного устройства являются трансформаторы напряжения, дифференциальные дискриминаторы, также RS-триггеры.

Преимуществом данного СУ является то, что мощность устройства саморегулируется в функции уровня несимметрии фазных напряжений. Параметры предлагаемого устройства изменяются от несимметрии напряжений и токов в сети 0,38 кВ, имеющей место в данный момент времени. Оно обладает значительно большей эффективностью, оно не только само потребляет

меньше электроэнергии, но и снижает электропотребление из сети для электроприемников.

Функциональная схема, поясняющая принцип управления схемы СУ приведена на рис. 3. Ключи батареи конденсаторов 4, 5, 6 и ключ индуктивной катушки 12 и ключи ее ответвлений 10 и 11 разомкнуты. Устройство отключено от сети.

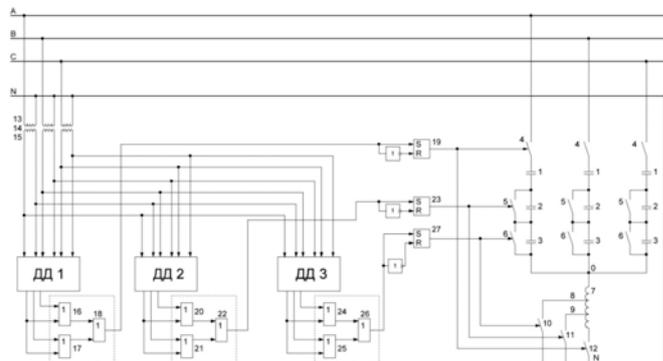


Рис. 2. Схема управления симметрирующим устройством

Для определения значений фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  применяются три трансформатора напряжения 13, 14, 15. Напряжения с этих трансформаторов поступают на дифференциальные дискриминаторы ДД1, ДД2 и ДД3. Дифференциальный дискриминатор, построенный на схеме 2ИЛИ-НЕ, вырабатывает на выходе логическую единицу в том случае, когда входное напряжение заключено между двумя порогами и равно логическому нулю во всех остальных случаях.

На выходе ДД1 логические нули получим в случае, если уровни фазных напряжений составляют 220 В (– 5 %). В этом случае на входы первого и второго логических элементов И (16, 17) приходит логический нуль. В соответствие с таблицей истинности логического элемента ИЛИ, если на входе элемента приходят нули, то на выходе элемента также будет нуль.

Если на вход элемента ИЛИ приходит хоть одна единица, такое может произойти, в том случае, если значения одного или двух (трех) фазных напряжения будут находиться в пределах 200...210 В, то на выходе также получим единицу. Сигналы с первого (16) и второго (17) элементов ИЛИ поступают на третий логический элемент ИЛИ (18), на выходе которого получаем нуль или единицу. С выхода третьего элемента ИЛИ сигнал поступает на RS-триггер (19). Если на RS-триггер 19 поступает единица, то происходит замыкание ключей 4 и 12. Устройство включается на минимальную мощность. Если значения линейных напряжений не выходит за нормально допустимое значение –5%, то на вход первого RS-триггера приходит нуль и устройство не включается.

При увеличении уровня несимметрии фазных напряжений включаются вторая и третья ступени устройства.

Для отключения ступеней СУ на R-вход RS-триггера должна поступить логическая единица. Это реализуется следующим образом: если на выходе ДД формируется логический нуль (значение фазного напряжение не отклоняется от значений, определяемых алгоритмом работы), то через инвертирующий элемент нуль преобразуется в единицу и подается на R-вход RS-

триггера, таким образом, на его выходе формируется логический нуль и ступень устройства отключается.

Для определения уровня снижения потерь при несимметричных режимах была создана виртуальная модель указанного симметрирующего устройства в пакете Simulink (Matlab) [3, 9].

При проведении опыта № 1 изменялась нагрузка в фазе А, опыта № 2 изменялась в двух соседних фазах и при проведении опыта № 3 изменялись нагрузки в фазах А, В и С.

Для определения уровня дополнительных потерь от несимметрии напряжений и токов регистрировались следующие параметры: действующие значения фазных напряжений и токов, и их начальные фазы.

Потери мощности, обусловленные несимметрией токов, в линии 0,38 кВ характеризуются коэффициентом потерь  $K_p$ , определяемым по формуле:

$$K_p = 1 + K_{2i}^2 + 4K_{0i}^2 \quad (1)$$

где  $K_{2i}$  и  $K_{0i}$  – коэффициенты токов по обратной и нулевой последовательности.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

На графиках рис. 3 определены уровни снижения потерь для опытов при включении СУ на различные мощности. По полученным графикам можно сделать вывод об уровне снижения потерь для принятых значений индуктивности каждой ступени СУ. Результаты сведены в таблицу 1.

Таким образом, для каждого уровня несимметрии существует возможность выбрать оптимальные параметры  $L$ , которые обеспечат минимум потерь. В условиях данного эксперимента потери электроэнергии возможно снизить на 21,5 %.

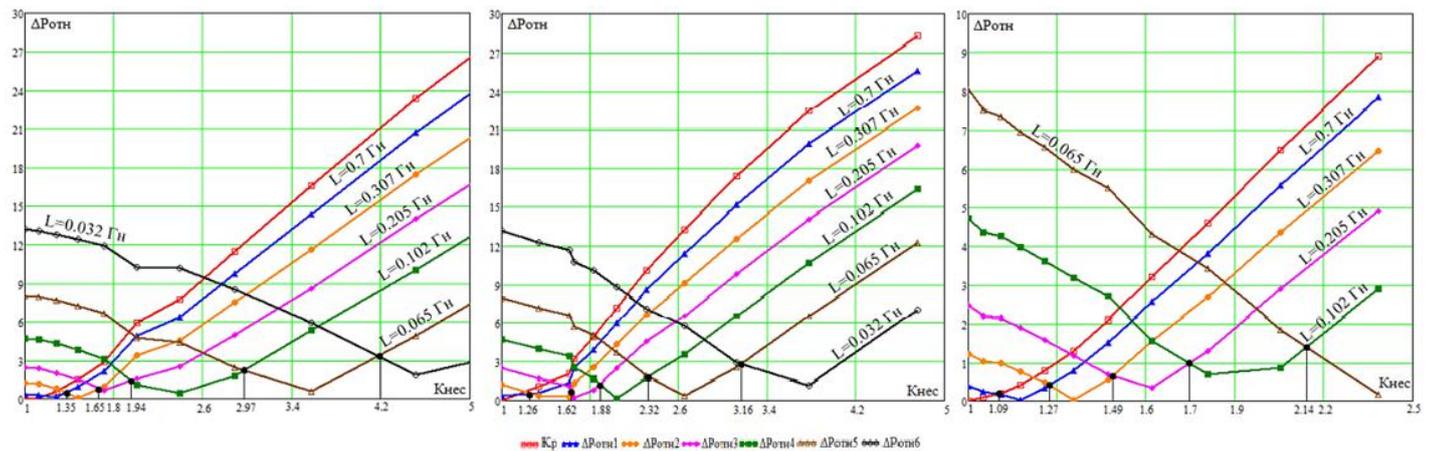


Рис. 3. Зависимость относительных потерь электрической энергии при включении СУ от уровня несимметрии и индуктивности

Таблица 1 – Уровень снижения потерь при включении СУ

№ опыта	Снижение потерь при индуктивности $L$ , Гн (в процентах)					
	0,032	0,065	0,102	0,205	0,307	0,7
1	21,5	16	7,263	2,5	1,401	0,6
2	21,26	13	7	3	1,686	0
3	–	8,7	3,9	2,872	1,275	0,385

Также по графику рис. 3 можно определить уровень несимметрии, при котором следует переключать СУ на более мощную ступень (момент переключений обозначен черной точкой), при этом также будет выполняться условие сокращения потерь.

Для достижения максимального эффекта снижения потерь в условиях резкого переменных нагрузок симметрирующие устройства должны выполняться регулируемые. Как видно из рис. 3.22 – 3.24 минимума потерь можно добиться, переключая ступени СУ в соответствии с уровнем несимметрии, который пропорционален уровню дополнительных потерь от несимметрии токов и напряжений. Число ступеней СУ по рис. 3 равно 5 – 6.

Увеличение числа ступеней СУ приводит к увеличению капитальных затрат на устройство, именно поэтому важно определить оптимальное количество ступеней СУ.

На рис. 4 зависимость максимального снижения потерь и цены реактивных элементов от индуктивности элементов, где по оси абсцисс отмечены значения индуктивности ступеней СУ. Минимальному значению индуктивности соответствуют максимальное значение снижения потерь электрической энергии, однако одновременно с этим и максимальная цена реактивных элементов СУ. По графику выберем оптимальные значения индуктивностей ступеней устройства в зависимости от уровня снижения потерь и цены реактивных элементов.

Анализируя график на рис. 4 следует сделать вывод, что сокращение потерь возможно при выборе оптимальных значений параметров СУ, причем, чем больше снижаются потери, тем выше капитальные затраты на устройство.

На рис. 4 закрашена область, соответствующая максимальному снижению потерь электроэнергии при минимальном росте цены реактивных элементов СУ.

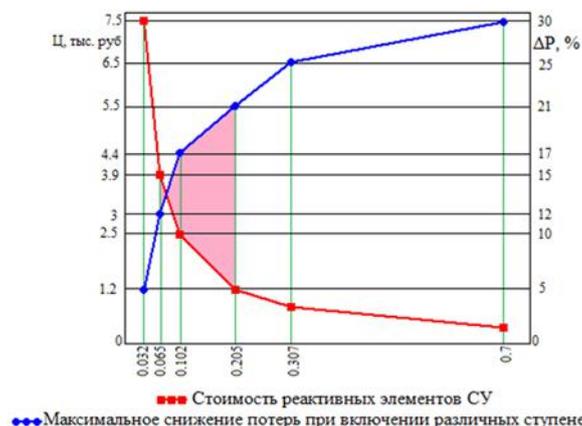


Рис. 4. Техничко-экономические показатели работы регулируемого симметрирующего устройства

При ступенчатом изменении индуктивности  $L = 0,065$ ;  $0,102$  и  $0,205$  Гн возможно обеспечить снижение потерь без существенного удорожания стоимости СУ, таким образом оптимальное количество ступеней регулируемого симметрирующего устройства составит 2 – 3. Кроме технико-экономических показателей при выборе оптимального количества ступеней СУ, следует руководствоваться показателями надежного функционирования СУ в зависимости от дискретности регулирования устройства и необходимой «глубины» изменения показателей качества электрической энергии при работе СУ.

#### IV. Выводы

Применение СУ в сельских распределительных сетях ведёт к сокращению дополнительных потерь по сравнению с режимом работы сети, когда СУ отсутствует. Применение предложенного симметрирующего устройства позволяет улучшить показатели качества электрической энергии и сократить потери при несимметричных режимах работы распределительных

сетей 0,38 кВ. Оптимальное количество ступеней регулируемого симметрирующего устройства составляет 2 – 3.

#### Список литературы

- [1] ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01
- [2] Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Текст]: федер. закон от 23.11.2009 г. №261-ФЗ
- [3] Дулепов Д.Е., Кондраненкова Т.Е. Моделирование работы симметрирующего устройства в сельских электрических сетях в среде Simulink (Matlab) [Текст] / Дулепов Д.Е., Кондраненкова Т.Е. // Вестник НГИЭИ. 2017. № 4 (71).
- [4] Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009.
- [5] Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст] / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- [6] Кондраненкова Т.Е. Алгоритм управления фильтросимметрирующим устройством для работы в сельских электрических сетях [текст] / Кондраненкова Т.Е. // Приоритетные научные направления: от теории к практике: сборник материалов XXXVII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2017. – С. 102-108.
- [7] Косоухов Ф.Д. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии в сельских сетях 0,38 кВ [Применение фильтросимметрирующего устройства] / Косоухов Ф. Д., Васильев Н. В., Горбунов А. О., Теремецкий М. Ю. // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. -2014.-N 6.-С. 16-20.-библиогр.: С.20.
- [8] Наумов И.В., Сукьясов СВ. Классификация способов и средств для улучшения качества электрической энергии [Текст]. — Иркутск, 2001. - С. 81-83.
- [9] Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

# Повышение энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи

В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн

ФБГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»  
Самара, Россия

*Аннотация* – в организации производства и эксплуатации погружных электродвигателей (ПЭД), как наиболее существенного элемента электропогружных установок (ЭПУ) в нефтяной отрасли необходим учет конкретных условий эксплуатации. Они определяются тем, в каких условиях происходит эксплуатация ЭПУ. Для полного представления о текущем состоянии парка ПЭД в нефтедобыче приведены результаты его статистического анализа. На текущий момент дана оценка эксплуатационных характеристик погружного оборудования, выпускаемого основными производителями. Констатируется, что стандартное оборудование не может обеспечить в полной мере эффективную эксплуатацию с помощью серийных УЭЦН, поэтому требуются разработки новых технологий и соответствующего оборудования. Инновационными изменениями современных ПЭД являются: использование вентильного привода, повышение частоты вращения 3000-6000 об/мин и номинального напряжения, схемные и параметрические изменения конструкций и др. Экономический фактор является немаловажным при выборе и внедрении в производство оборудования. Рассмотрен вопрос минимизации себестоимости ПЭД, организация и планирование ТОиР, увеличение МРП. Оцениваются достоинства и недостатки подходов организации эксплуатации парка ПЭД по наработке и фактическому состоянию при планировании и реализации ТОиР и целесообразность их комплексного применения. Обсуждается применение информационных методов и моделей для описания жизненных циклов ПЭД. Это позволяет прогнозировать граничные состояния типовых множеств и конкретных ПЭД при заданном времени наработки от начального ввода в эксплуатацию или капитального ремонта.

*Ключевые слова* – электропогружные установки, нефтедобыча, электрооборудование, погружные электродвигатели, гидрозащита, центробежные насосы, энергоэффективность, энергосбережения, минимизация потерь, система мониторинга, межремонтный период, жизненный цикл ПЭД.

## Improving the efficiency and reliability of submersible motors of oil production

V.S. Romanov, V.G. Goldstein

Samara State Technical University  
Samara, Russia

*Abstract*—In the organization of production and operation of submersible electric motors (PED), as the most essential element of electric submersible plants (ESP) in the oil industry, it is necessary to take into account specific operating conditions. They are determined by the conditions under which the EPU is operated. For a complete picture the current state of the SED fleet in oil production, the results of its statistical analysis are given. Currently, assessed the performance of submersible equipment produced by major manufacturers. It is stated that standard equipment can not fully ensure efficient operation with the help of serial ESPs, therefore new technologies and corresponding equipment are required to be developed. Innovative changes in modern SEM are: the use of a valve drive, an increase in the rotational speed of 3000-6000 rpm and nominal voltage, schematic and parametric changes in structures, etc. The economic factor is important when selecting and introducing equipment into production. Examined issues of minimizing a cost of SEM, organization and planning of MRO, increasing in MIP. Estimates advantages and disadvantages of the approaches to an organization of operation of the SEM fleet following operating time and actual state during a planning and implementation of MRO as well as an expediency of their integrated appliance. Discussed an application of information methods and models for describing the life cycles of SEM. This allows us to predict the boundary conditions of typical sets and specific SEDs at a given operating time from initial commissioning or major overhaul.

*Keywords*—installations; oil production; electrical equipment; submersible electric motors; hydroprotection; centrifugal pumps; energy efficiency; energy saving; loss minimization; monitoring system; overhaul period; life cycle of SEM.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Общий объем добываемой нефти во многих регионах России с помощью электропогружных установок (ЭПУ), приводом которых служит погружной электродвигатель (ПЭД), составляет более 80%. Применение этого метода

экономически оправдано как для новых месторождений, так и для тех, которые длительное время находятся в условиях интенсивной эксплуатации. При выборе способа эксплуатации скважин должны быть приняты во внимание многие факторы, такие как вязкость, содержание механических примесей, газовый фактор, экономическая целесообразность применяемого оборудования.

На основе классификации и сравнительного анализа статистики по парку основных ПЭД в отечественной нефтедобыче, можно утверждать, что более 20% скважин из всего фонда в России простаивают, так как стандартное оборудование не может обеспечить их эффективно эксплуатациюс помощью серийных ЭПУ как отечественного, так и дорогостоящего зарубежного производства, поэтому требуются разработки новых технологий и соответствующего оборудования. Основная цель работы заключается в исследовании современного парка ПЭД в нефтедобывающей отрасли России с выработкой конкретных предложений для повышения энергоэффективности и надежности всего технологического процесса нефтедобычи, ключевым звеном которого является энергетическая отрасль. Наиболее перспективным направлением снижения энергозатрат и повышения эффективности и надежности работы нефтегазодобывающих предприятий (НГДП) является создание условий для безотказного функционирования электропогружных установок (ЭПУ).

Проведенное исследование базируется на сложившихся к настоящему времени научных подходах в области использования ЭПУ в нефтедобыче. Теоретической основой изучения вопросов представленной работы явились труды отечественных и зарубежных специалистов. Изучению вопросов теории и методологии в ЭПУ нефтедобычи были посвящены исследования таких авторов, как А.Н. Китабов, В.Я. Чаронов, Т.А. Атакишев, Р.В. Бабаев, А.А. Барьюдин, В.П. Токарев, С.С. Шубин. С точки зрения анализа состояния парка погружного электрооборудования следует отметить большую и кропотливую работу по сбору данных эксплуатации ПЭД, проведенную в ОАО «Самаранефтегаз» В.П. Сотниковым.

## II. Постановка задачи

Исходя из вышеизложенного, возникает необходимость создания и исследования ЭПУ для работы в осложненных условиях с высоким КПД в основных режимах, с широким диапазоном подач и возможностью регулирования напора установки, которая обеспечивает синхронизацию параметров системы «пласт-скважина-установка». Снижение массогабаритных параметров подземной части установки значительно увеличит возможность беспрепятственного прохождения криволинейных участков скважин со сложной геометрией и малыми габаритами обсадных колон. Большой частью регионов нефтедобычи в России являются удаленные районы с резко-континентальными климатическими условиями.

Отдаленность нефтяных месторождений от производителей оборудования влечет за собой повышение затрат на доставку и хранение большой номенклатуры громоздких ЭПУ, что еще раз [1, 2], подчеркивает необходимость и актуальность снижения массогабаритных характеристик. Так же следует минимизировать потери в линии, питающей погружной электродвигатель с поверхности, обеспечить автоматическую адаптацию к изменяющимся условиям функционирования и оптимизацию режима работы насосной установки. Для этого необходима эффективная система мониторинга параметров УЭЦН, которая позволяет сократить межремонтные интервалы. Следует отметить, что важным аспектом при выборе и внедрение в

производство оборудования является минимизация себестоимости ПЭД.

## III. ТЕОРИЯ. ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ПЭД

Для более полного и эффективного представления о текущем состоянии ПЭД, используемых в отечественной нефтедобыче в настоящее время, необходим анализ данных эксплуатации их парка. Диаграмма на рис. 1 наглядно показывает распределение основных производителей рынка ПЭД, используемых в России.

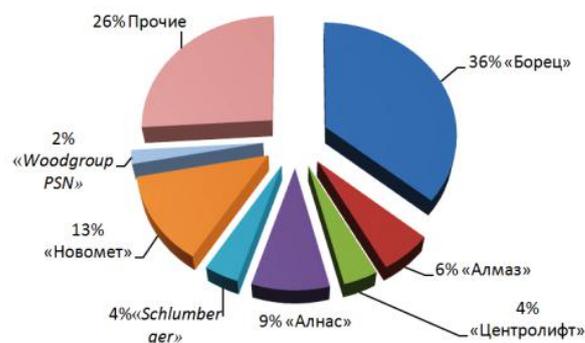


Рис. 1. Основные производители рынка ПЭД в России.

ПЭД компании «Борец» – это трехфазный короткозамкнутый маслonaполненный двухполюсной двигатель ручной намотки. Скорость вращения асинхронного двухполюсного двигателя при полной нагрузке составляет 3000 об/мин при частоте питания 50 Гц и 3600 об/мин при частоте питания 60 Гц. Двигатели наполнены высокой степени очистки диэлектрическим маслом, которое обеспечивает смазку подшипников и теплопроводность. Двигатель способен выдерживать экстремальные значения температур как на поверхности, так и в скважине, которые, как правило, являются причиной повреждений ЭЦН и даже могут вызвать преждевременную поломку насоса.

Компания «Алмаз» производит маслonaполненные ПЭД для УЭЦН серии ПЭД-Я мощностью от 22 до 360 кВт и двигатели параметрические погружные трехфазные маслonaполненные серии РППЭД-Я (русский параметрический ПЭД конструкции профессора Н.В. Яловеги). Основные отличия РППЭД-Я от обычных - это меньшие габариты, устойчивая работа в широком диапазоне питающих напряжений, регулирование скорости вращения ротора в широком диапазоне изменением питающего напряжения, увеличенная мощность, большой пусковой момент, устойчивая работа при значительных изменениях питающего напряжения. Двигатели выпускаются в габаритах 117 и 103 мм, в теплостойком и обычном исполнении. В номенклатурном ряду присутствуют секционные двигатели. Мощность выпускаемых двигателей от 28 до 340 кВт.

ЗАО «Новомет» выпускает ПЭД трехфазные, короткозамкнутые, маслonaполненные различных модификаций (для работы в осложнённых условиях эксплуатации, с установленными погружными блоками контроля параметров установки и т.д.). ПЭД выпускаются в одно-, двух- и трехсекционной компоновке и имеют форму конструктивного исполнения по способу монтажа 1М3631, предназначены для продолжительного режима работы S1 ГОСТ Р 52776-2007 от сети переменного тока частотой 50 Гц. Двигатель состоит из статора, ротора, головки и основания. Статор выполнен из трубы, в

которую запрессован магнитопровод, набранный из листов электротехнической стали с термостойким покрытием. Обмотка статора однослойная, протяжная, катушечная, выполнена термостойким обмоточным проводом с изоляцией из полиимидно-фторопластовых пленок. Фазы обмотки соединены в звезду. Ротор короткозамкнутый, секционный. Достоинства ПЭД: надёжность конструкции, применение высокотемпературных материалов, высокие показатели наработки, обеспечение технических требований заказчиков, постоянное совершенствование технологических процессов производства.

ОАО «Алнас» производит сертифицированные комплекты погружные насосные установки для добычи нефти, поддержания пластового давления, различное наземное оборудование, в том числе системы управления. Сертификат на это оборудование выдан Bureau Veritas Quality. ОАО «Алнас» подтверждает его соответствие требованиям ISO 9001:2000. Технология изготовления обуславливает высокое качество и надёжность ПЭД. Статор выполняется с закрытым пазом, повышающим чистоту внутренней полости двигателя, позволяет успешно применять пазовую изоляцию в виде трубки. Обмоточный провод статора изоляции фирмы «DuPont». В роторе ПЭД применены оригинальные подшипники, имеющие механическую фиксацию от проворота и сохраняющие при этом возможность легкого перемещения вдоль оси вала. Применение специальных электротехнических материалов позволяет эксплуатировать ПЭД при температуре пластовой жидкости до 120°C, в супертермостойком исполнении – до 160 °C.

Компания *Woodgroup PSN* производит ПЭД и многоступенчатые центробежные насосы. Основные достоинства: высокая стойкость к абразивному износу, материал вала изготавливается из nitronic 50, что существенно повышает коррозионную стойкость агрегата, применен ряд инновационных мер, направленных на уменьшение отказов ЭПУ.

Компания *Weatherford*, представительства которой работают во всех крупнейших нефтегазовых регионах мира. Эта компания производит высокоэффективные электродвигатели и многоступенчатые центробежные насосы, в которых применены современные регуляторы частоты вращения привода. Основным достоинством является минимальные требования к установке на поверхности, особенно в условиях низких температур, существенно понижен процент отказов ЭПУ, в следствии применения инновационных материалов и конструкций.

Компания *Reda (Schlumberger)*, которая выпускает инновационную быстроподключаемую конструкцию ПЭД, гидрозащит и датчиков системы *REDA Maximus*. Основные достоинства: нет необходимости в ответственных сборочных операциях, подверженных влиянию погодных условий; выполнение монтажных операций, такие как регулировка высадки валов, заполнение маслом электродвигателей и гидрозащит в контролируемых условиях производственных и сервисных центров компании; не требуется установка изоляции токоввода на устье; доставка на скважину компонентов системы *Maximus* готовыми к монтажу; надёжная установка в условиях экстремально низкой окружающей температуры; сокращение времени работ при монтаже установки; увеличение периода

эксплуатации установки; оптимальная производительность.

Компания *BakerHughes* (подразделение *Centrilift*) производит ЭПУ для эксплуатации в осложнённых условиях. Достоинствами этих конструкций являются: модульность; возможность замены отдельных узлов установки без нарушения соосности валов; существенное сокращение сроков ремонтных работ; экологичность, как результат отсутствия утечек в маслозаполненных узлах ЭЦН, низкого уровня шума и отсутствия вибрации системы; работа в высокотемпературных условиях; системы эффективного мониторинга; возможность эксплуатации в условиях повышенного содержания песка и др.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерными принципами инновационных изменений современных УЭЦН и, прежде всего, погружных электродвигателей (ПЭД), являются: использование вентильного привода, повышение частоты вращения 3000-6000 об/мин и номинального напряжения, схемные и параметрические изменения конструкций и др. Они стратегически направлены на повышение их энергоэффективности и энергосбережения, увеличение межремонтных промежутков. Каждая из выбранных стратегий инновационных изменений в УЭЦН и в частности ПЭД имеет свои достоинства и недостатки. Однако при выборе способа эксплуатации скважины необходимо индивидуально рассматривать каждый из предложенных способов исходя из местных условий для получения максимального экономического эффекта.

Одно из перспективных направлений энергосбережения и повышения энергоэффективности работы нефтегазодобывающих предприятий (НГДП) это – увеличение межремонтных периодов (МРП) ЭПУ [1] и, в первую очередь, ПЭД за счет минимизации числа аварийных отказов и нарушений. Надёжность и эффективность эксплуатации ПЭД [2, 3] в значительной мере зависят от организации технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которые в нефтяной отрасли реализуются двумя основными подходами:

- по времени эксплуатации ЭПУ (или отдельных ее составляющих) с отнесением ее к известной стандартной группе (например, ПЭД 63-117) с установленными для нее регламентами сроков и состава работ [2];
- по текущему техническому состоянию, которое определяется сравнением данных непрерывного контроля (который в настоящее время внедряется в отрасли) и технической диагностики с установленными граничными данными диагностических параметров [3 - 5].

В первом случае ТОиР предусматривает проведение плановых ремонтов и профилактических работ оборудования в соответствие с регламентными сроками, которые устанавливаются на основе инструктивных документов и опыта эксплуатации для конкретного типа ПЭД и фазы его жизненного цикла. При этом проверка состояния ПЭД производится по профилактическому принципу при выполнении техобслуживания, текущих и капитальных ремонтов.

Данный подход имеет ряд значительных недостатков, связанных, прежде всего, с технически неоправданными затратами. Так при формировании объема и состава планово-предупредительных работ ТОиР [2] для отдельных ПЭД и их групп часто по организационно-техническим причинам объединяются работы ТОиР для

ПЭД и их составляющих, имеющих разные временные регламенты, и ряд объектов включается в общий состав ТОиР ранее назначенных им сроков. Это приводит к недоиспользованию ресурсов электроустановок и, кроме того, при простоях из-за лишних продолжительных спуско-подъемных операций [2].

При этом характерны недобор нефти, значительное сокращение МРП и, как следствие увеличение убытков. Можно констатировать, что ТОиР по наработке в целом определяется типом ПЭД и не учитывает индивидуальные особенности эксплуатации ПЭД в условиях конкретных скважин. Кроме того даже при качественном выполнении ТОиР с тщательно выполненной разборкой, детальным анализом и заменой при необходимости изношенных узлов и деталей не удастся избежать нарушений их совместимости (что увеличивает возможности появления новых дефектов и нарушений) и гарантировать отсутствие внезапных отказов в МРП [2].

Эффективность эксплуатации ЭПУ можно повысить, организовав ТОиР в целом с определением времени, состава и графика по текущему состоянию ПЭД, иначе говоря, с учетом рационального использования внутренних запасов стойкости его отдельных элементов и в целом всей ЭПУ, то есть технического ресурса. Отметим, что и при этой организации ТОиР, как и в предыдущем случае, имеет место недоиспользование ов электроустановок, поскольку при выполнении ремонта конкретного элемента ЭПУ целесообразно расширение состава работ для работоспособных составляющих, имеющих значительный износ.

При этом необходимо обеспечить полномасштабное определение фактического технического состояния ПЭД по имеющемуся составу диагностических параметров (ДП), достаточному по содержанию, качеству и достоверности информации [4-6]. Далее на основе сравнения ДП с их граничными допустимыми значениями принимается решение о возможности дальнейшей работы установки и необходимом объеме ТОиР.

Пределным частным случаем этого подхода является ликвидация последствий внезапных аварийных нарушений и отказов. В этих ситуациях особенно важен анализ предаварийного состояния ПЭД, поскольку это позволяет получить необходимую информацию о динамике развития дефектов с целью их оперативной диагностики, локализации, прогнозирования и, как следствие, уменьшения аварийного ущерба [3-6].

## V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа данных эксплуатации по парку ПЭД ОАО «Самаранефтегаз» установлено, что проведение плановых ремонтов и профилактических работ оборудования в соответствие с регламентными сроками имеют место технически неоправданные затраты. Они вызваны тем, что ряд объектов включается в общий состав ТОиР ранее назначенных им сроков. Это приводит к недоиспользованию ресурсов электроустановок и недобору нефти. При организации ТОиР по текущему состоянию ПЭД с учетом рационального использования

их внутренних запасов стойкости в ряде случаев также недостаточно используются ресурсы погружного оборудования. Для повышения эффективности необходимо полномасштабное определение фактического технического состояния ПЭД на основе развернутой диагностики.

Сказанное выше можно обобщить следующими выводами.

1. Анализ серийных ЭПУ, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями показывает, что в сложных условиях современной нефтедобычи они не обеспечивают в полной мере высокие требований современной эффективной эксплуатации. Необходима разработка новых технологий и соответствующего оборудования.

2. Необходимо широкое внедрение ЭПУ для работы в осложненных условиях с высоким КПД в режимах с широким диапазоном подач и возможностью регулирования напора установки с обеспечением синхронизации параметров системы «пласт-скважина-установка».

3. Снижение массогабаритных параметров подземной части ЭПУ значительно увеличит возможность беспрепятственного прохождения криволинейных участков скважин со сложной геометрией и малыми габаритами обсадных колонн.

4. В организации эксплуатации и управления параметрами жизненных циклов ПЭД нефтяной отрасли целесообразна комплексная организация ТОиР, использующая совместно в качестве основных положений данные и по наработке, и по текущему состоянию.

Высокая энергоемкость отрасли добычи нефти, необходимость снижения энергозатрат и повышение эффективности работы предприятий нефтяной отрасли, а также короткий срок службы ПЭД требуют системного учета и обработки эксплуатационных данных по специфическому погружному электрооборудованию на основе информационных технологий.

## Список литературы

- [1] Гирфанов А.А. Электромагнитная совместимость погружного электрооборудования предприятий нефтедобычи и разработка комплекса мер по повышению надежности его работы. Дис. канд. техн. наук, СамГТУ, г. Самара. 2005 г.
- [2] Замиховский Л.М., Калявин В.П. Техническая диагностика погружных электроустановок для добычи нефти. Ив.-Франк. гостехуниверситет нефти и газа. – Сиятын: Прут Принт, Иванов-Франковск. 1999 г. – 234 с.
- [3] Китабов А.Н., Токарев В.П. Информационно-измерительная система диагностики погружного электродвигателя. – Вестник УГАТУ. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – Уфа, УГАТУ 2011 г. т. 15, №1 (41).с. 163-164.
- [4] Пошвин Е., Агеев Ш., Санталов А. Правильный выбор. Тернистый путь инноваций «Новомет», // «НГВ-Технологии», №9, 2015.
- [5] Чаронов В.Я. Автоматизация работы основного оборудования и проблемы энергосбережения на объектах нефтегазодобычи. Альметьевск: ТатАСУнефть, 1998.
- [6] Шубин С.С. Методическое и экспериментальное обеспечение определения технического состояния установок электроцентробежных насосов в процессе эксплуатации. Дис. канд. тех. наук, УГНТУ, г. Уфа. 2014 г

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В.М. Дашков, М.Р. Лукьянов  
ФБГОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
Самара, Россия

**Аннотация** - Вопросам энергосбережения в последние годы уделяется значительное внимание. Во многих нормативных документах и научных работах приводится перечень энергосберегающих мероприятий. Однако внедрить на практике некоторые предлагаемые мероприятия невозможно. Основная цель работы - показать невозможность практической реализации некоторых энергосберегающих мероприятий. По результатам энергетических обследований многих объектов рассмотрены особенности нескольких энергосберегающих мероприятий (применение энергосберегающих силовых трансформаторов; замена малоагруженных трансформаторов; выравнивание нагрузок в системах электроснабжения до 1 кВ; регулирование напряжения в системах освещения помещений). Показано, что в некоторых случаях предлагаемые энергосберегающие мероприятия реализовать в жизнь весьма сложно, а во многих случаях практически невозможно.

**Ключевые слова** — экономия электроэнергии, мероприятия, практическая реализация, нагрузки фаз, выравнивание нагрузки, трансформаторы энергосберегающие.

## ANALYSIS OF PRACTICAL REALIZATION OF ENERGY-SAVING MEASURES

V.M. Dashkov, M.R. Lukyanov  
Samara State Technical University  
Samara, Russia

**Abstract** - In recent years energy-saving problems have received a considerable attention. A list of energy-saving measures is provided in many regulations and scientific works. However, some of them are impossible in practice. In this work the main goal is to show that using such measures is not possible. Features of several energy-saving measures (using energy-saving transformers, replacing low-loaded transformers, load balancing in power supply systems under 1 kV, voltage control in lightning systems) are considered according to results of researching many sites. It is shown that in some cases using energy-saving measures is quite difficult but mostly it is impossible.

**Keywords** — energy saving, measures, practical realization, phase loads, load balancing, energy-saving transformers.

Во многих нормативных документах и научных работах приводится перечень (реестр мероприятий по уменьшению электропотребления [1,2]. Однако внедрить на практике некоторые предлагаемые мероприятия невозможно (нереально) или экономически нецелесообразно.

Основная цель данной статьи – показать невозможность практической реализации и не целесообразность реализации некоторых энергосберегающих мероприятий.

Одним из таких мероприятий, предлагаемых в работах [1,2,3], является выравнивание нагрузок в фазах трехфазных четырехпроводных электрических сетей. Автор работы [3] предлагает для снижения потерь ЭЭ «... создание профильного подразделения в обязанности которого должно входить обследование подстанций 10(6)/0,4 кВ для определения степени несимметричности загрузки, разработка и осуществление мероприятий по симметрированию нагрузки и расчет их экономической эффективности...».

Действительно, характерной особенностью значительной части электрических сетей напряжением до 1кВ большинства зданий медицинских учреждений, учебных

заведений и т.п. является неравномерное значение токов в фазах.

Установлено, что неравномерная нагрузка фаз увеличивает потери ЭЭ в фазных проводах, так как

$$I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 \geq 3 \cdot I_{cp}^2, \quad (1)$$

где  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  – соответственно значения токов фаз А, В и С;  $I_{cp}$  – среднее значение токов фаз А, В и С, которое определяется по формуле (2)

$$I_{CP} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}. \quad (2)$$

Для здания А (учебный корпус) с учетом формул (1) и (2) для времени суток 7<sup>00</sup> получается соотношение:

$$109,34^2 + 161,86^2 + 129,25^2 > 3 \cdot \left( \frac{109,34 + 161,86 + 129,25}{3} \right)^2 \\ 54859,36 > 54334,7.$$

Для этого же здания при максимальной нагрузке (11 часов) получается соотношение

$$285,8^2 + 344^2 273,63^2 > 3 \cdot \left( \frac{285,8 + 344 + 273,63}{3} \right)^2$$

$$274891 > 271932.$$

Расчеты, выполненные по результатам инструментальных обследований, проведенных в рамках энергоаудита нескольких объектов, показывают, что значения коэффициента неравномерности в разное время суток и для одного и того же момента времени разных дней недели различны.

В работе [3] приводится описание комплекса поэлементного учета и управления энергопотреблением «АРГУС», в котором применяются технологии, разработанные компанией CES (Израиль). Одной из базовых функций комплекса, по утверждению авторов работы [3], является «...автоматическая балансировка фаз...», которая автоматически, без нарушения электроснабжения, переключает абонентов (потребителей) с целью равномерного распределения нагрузки по фазам. Внедрение установки комплексов «АРГУС» позволяет снизить асимметрию нагрузок с 20-25% до 5%.

Однако, стоимостные данные, сроки окупаемости и другие экономические показатели о комплексе в указанной работе не приведены

По нашему мнению, данное мероприятие для организаций бюджетной сферы, таких как школы, высшие учебные заведения, больницы, административные здания и т. п., является труднореализуемым и во многих случаях экономически нецелесообразным. Это обусловлено тем, что для электрических сетей указанных объектов различие в величине токов фаз обусловлено тем, что основными потребителями электроэнергии в них являются однофазные электроприемники различной мощности (осветительные приборы, холодильники, кондиционеры, лабораторное оборудование, компьютеры и т. п.), которые включаются и выключаются из-за различных причин независимо друг от друга хаотически.

Другой причиной, затрудняющей обеспечение равномерной загрузки фаз в указанных видах (характерных) помещений являются дополнительные электроприемники, приобретаемые для улучшения условий труда сотрудников, персонала, учащихся и т.п. (кондиционеры, холодильники и т.п.), для выполнения новых исследований, и т.п. Часто подключение дополнительных электроприемников выполняется без необходимых расчетов.

Поэтому, прежде чем включить указанное мероприятие в план электросберегающих мероприятий конкретного объекта, необходимо рассмотреть возможность технической реализации энергосберегающего мероприятия.

Другим энергосберегающим мероприятием, который рекомендуется многими авторами и нормативными документами, является замена традиционных масляных силовых трансформаторов (СТ) энергосберегающими трансформаторами. [2, 5, 6]

Для расчета экономии электроэнергии при использовании энергосберегающих трансформаторов (за счет уменьшения постоянных и нагрузочных потерь) целесообразно применять следующую формулу

$$\Delta W_{TP} = (\Delta P_{XX.11} - \Delta P_{XX.12}) \cdot T_{BKЛ} + (\Delta P_{K3.11} - \Delta P_{K3.12}) \cdot K_3^2 \cdot \tau,$$

где  $\Delta P_{XX.11}$  и  $\Delta P_{XX.12}$  - соответственно потери холостого хода для конкретного трансформатора обычного исполнения и энергосберегающего, Вт;  $T_{BKЛ}$  - продолжительность включения трансформатора под напряжение, час;

$\Delta P_{K3.11}$  и  $\Delta P_{K3.12}$  - соответственно потери короткого замыкания для конкретного трансформатора обычного исполнения и энергосберегающего, Вт;  $K_3$  - фактический коэффициент загрузки трансформатора;  $\tau$  - время максимальных потерь, час.

Экономия ЭЭ при применении одного энергосберегающего трансформатора мощностью 1000 кВА 12-й серии в системе электроснабжения машиностроительного завода при коэффициенте мощности 0,9 и коэффициенте загрузки 0,7 составит (для трансформаторов, выпускаемых компанией «Электроцит-Самара»):

$$\begin{aligned} \delta \Delta W_{1000} &= (1550 - 1100) \cdot 8760 + \\ &+ (10800 - 10500) \cdot 0,7^2 \cdot 3200 = 4412,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

В приведенных расчетах величина  $\tau$  принята 3200 ч.

Средняя стоимость энергосберегающего трансформатора мощностью 1000 кВА составляет 400 000 рублей (по данным УП «МЭТЗ им. В.И.Козлова»), при суммарной экономии электроэнергии от использования данного трансформатора 4412,4 кВт\*ч вместо традиционного. Таким образом, данное мероприятие как энергосберегающее целесообразно внедрять только на тех объектах, где реально необходима замена СТ из-за старения, аварийного состояния и т.п. Также применение энергосберегающих СТ экономически оправдано для вновь сооружаемых объектов, так как дополнительные затраты обусловленные большей стоимостью СТ, окупаются за 2-3 года за счет значительного снижения стоимости годовых потерь.

### Список литературы

- [1] Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов. В семи разделах// Под общей редакцией О.Л. Данилова, П.А. Костюченко.-М: Технопромстрой, 2006 – 688с.
- [2] Гольдштейн В.Г., Кубарьков Ю.П., Молочников Е.А., Халилов Ф.Х. Снижение потерь электроэнергии в системах электроснабжения в свете пересмотра нормативов инструкций и методик по их расчету и обоснованию. Электроэнергетика глазами молодежи: Науч.тр. III междунар. науч.-техн. конф., Т.Г.-Екатеринбург:2013 – 373-378 с.
- [3] Новоселов Н.А. Контроль качества электроэнергии как мера повышения энергоэффективности// Энергетика глазами молодежи: Науч. тр III Междунар. науч.-техн.конф. Т.2. – Екатеринбург: УрФУ, 2012.- С. 407-411.
- [4] Авербух М.А., Жилин Е.В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик, 2016, №6. – С.54-57.
- [5] Высогорец С.П., Никонов Д.И. Силовые трансформаторы . Технические решения для повышения энергоэффективности сети // Новости электротехники. – 2015. - №3 (93).
- [6] Слываков М.О. Применение энергосберегающих трансформаторов в сетях напряжением 10-0,4 кВ. Наука. Технологии. Инновации// Сб.научных трудов в 9ч. / под ред. Доц. О.В.Боруш. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – часть 4. – С.44-46.
- [7] Киреева Э.А. Полный справочник по электрооборудованию и электротехнике (с примерами расчетов) Э.А. Киреева, С.Н. Шерстнев: -М.: Кнорус, 2013. – 864 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

6. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ И ЭКОНОМИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ	
<i>А.С. Лысова, А.Г. Васьков</i> Исследование влияния температуры на КПД солнечных модулей	6
<i>Е.А. Кротков, М.В. Сапунов</i> Ценообразование на реактивную мощность для субъектов рынка системных услуг	10
<i>В.В. Дубайлова, Н.Д. Мухлынин</i> Оценка влияния режима работы распределенной генерации на график нагрузки питающей подстанции	13
<i>О.М. Стефановская, А.В. Чемезов</i> Топливные элементы использования водорода в энергетике	17
<i>А.И.Гаврилов, М.Е. Гольдштейн</i> Схемы выдачи мощности и присоединения к энергосистеме «малых» синхронных генераторов с варьируемой скоростью вращения	20
<i>Д.С. Крупнев, Н.А. Шамарова</i> Оценка надежности систем электроснабжения при интеграции возобновляемых источников энергии	24
<i>А.В. Проничев, Е.О. Солдусова, Е.М. Шишков</i> Оценка перспектив применения гибридного сетевого накопителя электроэнергии на основе Ni-Cd аккумуляторов и топливных элементов	28
<i>П.А. Максимов, М.Д. Сенюк, И.В. Чунарев, С.А. Шевчук</i> Определение резерва активной мощности в энергосистеме с высокой долей СЭС	31
<i>Е.Б. Исаева</i> Порядок взаимодействия предприятия с подрядными организациями в области экологии, промышленной безопасности и охраны труда	35
<i>Н.С. Фроленко, Е.Г. Сёма, А.В. Тенешев, Е.А. Толстихина</i> Исследование возможности работы малой генерации в энергосистеме Республики Хакасия	37
<i>С.А. Ерошенко</i> Модель интеллектуальной системы оценки эффективности внедрения объектов распределённой генерации	41
<i>В.Д.Свистунов, М.С.Богомолова</i> Создание мобильного демонстрационного стенда «возобновляемые источники энергии»	45
<i>А.С. Ведерников, Е.А. Керженцева</i> Анализ потребления и возможных потерь электроэнергии в распределительных сетях	49
<i>И.Д. Кубарьков, А.С. Блинов, Ю.П. Кубарьков</i> Интеллектуальный город – создание платформы для анализа взаимодействия элементов энергетической инфраструктуры	51
<i>Г.В. Дерюгина, Н.Д. Карпов, Д.А. Чернов</i> Влияние низких температур на показатели энергоэффективности ВЭУ в составе ветро-дизельного комплекса	55
<i>Ю.В. Жилкина</i> Зарубежный опыт энергоснабжения субарктических территорий	57
<i>A.S. Dmitrieva</i> Synchronous operation of a customer's on-site generator under the condition of no power output. Methods to meet the condition when contingencies occur	61
<i>Н. В. Харламова, А.И. Хальясмаа, С.А. Ерошенко</i> Оценка ветроэнергетического потенциала для электроснабжения удалённых промышленных потребителей	64
<i>К. В. Перевалов, П. В. Илюшин</i> Особенности участия объектов распределенной генерации в регулировании напряжения	68
<i>А.С. Ведерников, Е.А. Балукова, Е.А. Комасова</i> Построение нейронных сетей для прогнозирования электропотребления собственных нужд тэц	72
<i>В.Д.Свистунов, М.С.Богомолова, А.С.Лысова</i> Создание источника электропитания на основе термоэлектрического генератора	78
<i>В.А. Дьячков, И.С. Окшин</i> Требования к генерирующему оборудованию в части предоставления системных услуг по регулированию напряжения	80
<i>О.С.Атрашенко, А.Г.Сошинов, В.С. Галуцак, С.А. Петренко</i> Исследование возможности питания бытовых приборов постоянным током	84
<i>Н.В. Ременюк, В.А. Минина В.А., О.В. Самойленко</i> Оптимальная стратегия электропотребления при наличии собственной фотоэлектрической генерации	86
<i>К.С. Смирнов</i> Методический подход для комплексной оценки сравнительной эффективности проектов экспорта электроэнергии в условиях неопределенности развития	90

электроэнергетической системы региона	
<i>Ю.П. Кубарьков, Я.В. Макаров, К.А. Голубева</i> Методологический подход при решении основных задач оптимизации электрической сети для эффективного решения распределения заданных параметров схем электроснабжения	94
<i>А.И. Юлдашева, А.В. Малафеев</i> Стратегия участия в торгах на оптовом рынке электроэнергии энергосбытовой компании, действующей в крупном промышленном энергетическом узле	98
<i>А.А. Юдина, Е.М. Шишков</i> Проблемы принятия инвестиционных решений при создании инфраструктуры глобального энергетического интернета	102
<i>А.А. Татевосян, М.М. Сангов, В.С. Мищенко</i> Экспериментальное исследование и математическое моделирование тихоходного синхронного генератора	106
<i>Е.О. Солдусова, А.В. Проничев, Е.М. Шишков</i> Алгоритм управления электрическим режимом изолированной микросети	110
<i>Э.Цэрэндолгор, Г.В.Дерюгина</i> Анализ ветроэнергетического потенциала Монголии	112
<i>И.С. Зонов, Е.А. Пономарева</i> Оценка оптимальной мощности солнечной электростанции, работающей в составе дизель-фотоэлектрической гибридной энергосистемы	116
<i>Е.В. Щербаков, М.В. Кяри, Е.А. Толстихина, К.А.Никишин</i> Технико-экономическое обоснование строительства малых ГЭС в республике Хакасия	120
<i>Д.Н. Кургунов</i> Использование геоинформационных систем для поиска перспективного места строительства малых гидроэлектростанций в Республике Хакасия	124
<i>Е.В. Уколова, И.Н. Шушпанов</i> Анализ экономической и экологической эффективности применения источников альтернативной энергии для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов	128
<i>В.В.Бочков, А.Р.Игамов</i> Сбережение электроэнергии при использовании велогенератора	132
<i>О.И. Горте, В.М. Зырянов, Н.Г. Кирьянова, Г.А. Пранкевич</i> Метод выбора параметров накопителя энергии при резкопеременной нагрузке	135
<i>Д.А.Снегирев, Р.Т. Валиев, С.А.Ерошенко, А.И. Хальясмаа</i> Особенности прогнозирования выработки электроэнергии солнечными электростанциями	139
<i>Г.О. Арсентьев, Ю.Н. Булатов, А.В. Крюков</i> Применение энергоузелов в системах электроснабжения с распределенной генерацией	143
<i>Д.О. Герасимов, К.В. Суслов, Е.В. Уколова</i> Имитационное моделирование мульти-энергетических систем	147
<i>С.М. Минько, И.А. Рахматуллин</i> Рекуперационно-тепловая маховиковая воздушно-аккумулирующая электростанция	151
<i>В.С. Зубарев, А.В. Паздерин, Д.А. Фирсова, И.В. Шевелев</i> Расчет тарифов на передачу электрической энергии в сетях энергосистем на основе технико-экономической модели	155
<i>А.С. Ануфриев, Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников</i> Особенности проектирования синхронных генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок	159
<i>Ю.П. Гусев, П.В. Субботин</i> Применение накопителей для снижения потерь электроэнергии в линиях электропередачи и в трансформаторном оборудовании распределительных электрических сетей	161
<i>А.С. Грицай, Д.А. Тюньков, Р.Н. Хамитов, Д.Д. Дугин, Г.Э. Синицин</i> Гибридный метод краткосрочного прогнозирования электропотребления в условиях оптового рынка электроэнергии	163
<i>В.И. Пантелеев, С.С. Труфакин</i> Локальные системы автоматического управления распределенной генерацией	167
<i>Д.С. Левин, С.В. Прокопченко</i> Отбор мощности от фазного провода воздушной линии электропередачи	171
<i>А.Г. Фишов, Н.А. Карджаубаев</i> Децентрализация регулирования напряжения в электрических сетях	173
<i>Д.С. Левин</i> Анализ процедуры изменения эксплуатационного состояния генерирующего оборудования в условиях правил оптового рынка	177

<i>И.И. Дорофеев</i> Исследование возможности применения ветроэлектростанций для электроснабжения потребителей на Ямале	179
<i>К. Ф. Шарафеддин, С.А. Цырук, Х.С. Сангов</i> Разработка системы автоматического регулирования напряжения асинхронного генератора ветроэнергетической установки	181
<i>В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн</i> Услуги Жигулевской ГЭС, оказываемые на рынке электроэнергии и мощности в ЕЭС РФ по обеспечению системной надежности	185
<i>Р.В. Майдак</i> Устранение отклонения графика генерации электростанций от заявленного максимума	189

## 7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

<i>А.И.Тухватуллин, А.Ю.Кузьмин</i> Ориентированная довузовская подготовка учащихся для ПАО «Русгидро»	192
<i>А.С. Королев, Л.Г. Мигунова</i> Программа профориентации и подготовки «Школа-вуз-предприятие»: итоги и перспективы	194
<i>М.В. Чечуй, Д.И. Нестерец, Г.В. Булавкин</i> Разработка и составление развернутой тепловой схемы первого контура энергоблока ВВЭР-1000	196
<i>М.С. Панкратов</i> Визуализация подстанционного оборудования для создания учебных трехмерных моделей энергообъектов	201
<i>А.О. Егоров, А.А. Ларионова</i> Учебная понижающая подстанция 110 кВ в масштабе 1/10	202
<i>Н.О. Разуваев, Н.С. Железов, В.А. Субаш, Г.В. Булавкин</i> Результаты исследования аварийных режимов работы энергоблока ВВЭР-1000 на ФАТ и ПМТ с исходными событиями во втором контуре	206
<i>Д.Н. Гура, В.М. Пасторов, А.Л. Корольков, Ф.В. Михайленко</i> Опыт подготовки кадрового резерва из числа студентов очной формы обучения в операционной зоне ОДУ Юга	210
<i>М.А. Вольман</i> Психолого-педагогическое сопровождение использования полномасштабного тренажера энергоблока АЭС в вузовской подготовке	212
<i>Н.С. Железов, Н.О. Разуваев, Г.В. Булавкин</i> Результаты исследования аварийных режимов работы энергоблока ВВЭР-1000 на ФАТ и ПМТ с исходными событиями в первом контуре	214
<i>А.В. Сидоров, И.А. Москвин, Д.Н. Кормилицын, А.А. Братолобов</i> Обновление программного обеспечения по курсу «Переходные процессы в ЭЭС»	218
<i>О.В. Белоусова, И.М. Груздев, О.Ю. Малоземова</i> Инженерные соревнования по оперативно-диспетчерскому управлению среди специалистов-стажеров в филиалах АО «СО ЕЭС»	220
<i>Н.П. Алексеев, А.В. Деревянко, Д.А. Денищук, К.С. Фоменко</i> Программный комплекс лабораторных работ «ЭкоЛаб» по дисциплине «природоохранные технологии на ТЭС»	224

## 8. ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

<i>К.В. Духанина, В.М. Зырянов, В.С. Стрижов, Е.И. Эрекайкин</i> Влияние осветительной нагрузки на качество электрической энергии	228
<i>А.В. Радченко</i> Исследование динамики подвешенного железоотделителя как объекта управления с массивным магнитопроводом	232
<i>П.М. Ревенко, М.В. Жуков, А.И. Гринь</i> Выявление погрешности метода средних нагрузок при определении потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях	236
<i>Д.Г. Рандин, С.С. Володин, И.И. Ашимов</i> Исследование эффективности системы активной виброзащиты энергетического оборудования на основе линейных двигателей	240
<i>Е.О. Шмакова, В. П. Шойко</i> Применение алгоритма роя частиц для оптимизации компенсации реактивной мощности	242
<i>А.О. Егоров, А.А. Губарев</i> Влияние несинусоидальности напряжения на учет электрической энергии индуктивным и электронным счетчиками	246
<i>А.И. Федотов, А.Н. Кривов, А.Р. Ахметшин</i> Методика расчета электрических нагрузок жилых и общественных зданий по фактическим данным	248

<i>Н.Д. Мухлынин, А.В. Паздерин</i> Интервальная оптимизация различных субъектов распределительных сетей	250
<i>С.В.Казаков, Т.Ю.Дунаева</i> Изучение питания дуг в ДСП от независимых источников	254
<i>А.Е. Ольховский, И.В. Колесник, Э.Н. Фоминич</i> Установки гарантированного питания статического типа в специальном исполнении	258
<i>Ю.Н. Половинкина, Ю.Л. Шаненкова</i> Исследование способа нанесения медного покрытия на подложки с помощью высокоскоростной плазменной струи	262
<i>С.А. Ложкин, Д.И.Близнюк, П.Ю. Банных, В.О. Самойленко, А.В. Паздерин</i> Устройство мониторинга нагрузки и интеллектуального контроля «УМНИК»	266
<i>Л.А. Сагитова, А.Г. Салов</i> Анализ производства тепловой и электрической энергии энергетическими предприятиями Самарской области	270
<i>М.С. Балабанов, Р.Н. Хамитов</i> Перспективы развития ферросплавных печей	274
<i>И.С.Николаев, Т.Ю.Дунаева</i> СВЧ ЭТУ периодического действия для сушки растительного сырья и плодоовощной продукции	278
<i>А.С. Ведерников, Е.А. Керженцева</i> Поиск путей снижения энергоемкости ВВП РФ	280
<i>С.А.Бутков, Т.Ю.Дунаева, А.О. Мантуров</i> Использование метода эквивалентных схем для изучения кинетики СВЧ сушки	282
<i>А.О. Егоров, А.А. Губарев, Е.А. Люханов, М.Д. Черепанова</i> Анализ стоимости режима ожидания бытовых электроприемников	286
<i>А.А. Дмитриев, В.И. Горбунков</i> Электротехнический комплекс фотомодификации сред в жидком и твердом состояниях	288
<i>Д.Ю. Середкин, А.Д. Купчинов</i> Влияние частотного пуска асинхронного двигателя на падение напряжения и потери электроэнергии в системах собственных нужд электрических станций	292
<i>А.А. Савельев, А.И. Орлов, С.В. Волков</i> Устройство выравнивания нагрузки для трехфазных распределительных электрических сетей 0,4 кВ	296
<i>А.А. Губарев, А.О. Егоров, Е.А. Люханов, С.Н. Шелюг</i> Исследование электрических режимов работы ускорителя элементарных частиц	300
<i>А.Ю. Росляков</i> Рекуперация тепла в системах приточно-вытяжной вентиляции посредством обратимого термодинамического цикла	304
<i>Д.А. Денищук</i> Использование конденсационных теплообменников в системах глубокой утилизации теплоты дымовых газов при сжигании серосодержащего топлива	310
<i>А.А. Костин, П.Е. Мезенцев, В.П. Обоскалов</i> Анализ функциональных возможностей программно-вычислительного комплекса «КАПРЭС» в контексте решения задач развития ЭЭС	314
<i>А.В. Крюков, А.П. Куцый, А.В. Черепанов</i> Улучшение качества электроэнергии в сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции	318
<i>Д.Н. Гура, В.М. Новиков, В.Я. Яловой, А.Л. Корольков</i> Транспортировка электрической энергии на основе СВЧ-луча и ректенн	322
<i>С.А.Авдонькин, А.А.Колесников</i> Реализация системы диспетчеризации и мониторинга топливно — энергетических ресурсов на базе программного комплекса «Энергопортал»	324
<i>Д.Е. Дулепов, Т.Е. Кондраненкова</i> Снижение потерь и повышение качества электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях	328
<i>В.С. Романов, В.Г. Гольдштейн</i> Повышение энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи	332
<i>В.М. Дашков, М.Р. Лукьянов</i> Анализ возможности практической реализации мероприятий по экономии электроэнергии	336

*Научное издание*

# ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2017

Материалы VIII Международной молодежной  
научно-технической конференции  
02 – 06 октября 2017 года

Том 3

Печатается в авторской редакции.

Компьютерная верстка Е.М. Шишкова  
Дизайн обложки П.О. Качинской

Подписано в печать 18.09.2017.  
Формат 60x84/8. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 39,92. Уч.-изд. л. 42,93.  
Тираж 60 экз. Рег. № 157/17. Заказ № 671

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии  
Самарского государственного технического университета  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус № 8

