

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ: НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

15 мая 2025 г.

КАЗАНЬ 2025 г.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ: НАДЕЖНОСТЬ,
БЕЗОПАСНОСТЬ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ**

Международная научно-практическая конференция
(Казань, 15 мая 2025 г.)

Материалы конференции

Казань 2025

УДК 621.317.3:537.8

ББК 31.221.02-53я73

Э45

Рецензенты:

М.Ш. Гарифуллин, д.т.н., проф. каф. «Электроэнергетические системы и сети»,

Казанский государственный энергетический университет

Макаров В.Г., д.т.н., зав. каф. «Электропривода и электротехники»,

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Редакционная коллегия:

О.В. Воркунов (отв. редактор), В.В. Максимов

Э45. Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты»: матер. конф. (Казань 15 мая 2025 г.) / редкол. О.В. Воркунов (отв. редактор), В.В. Максимов. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2025. 476 с.

ISBN 978-5-89873-698-9

Электронное издание

Опубликованы материалы V международной научно-практической on-line конференции «Электрические сети: Надежность, Безопасность, Энергосбережение и Экономические аспекты». Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в области энергетики, а также для обучающихся образовательных учреждений энергетического профиля.

Материалы публикуются в авторской редакции. Ответственность за их содержание возлагается на авторов.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.316.925.1

РАБОТА УСТРОЙСТВ СИНХРОНИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Бахмисов Д. Е.¹, Яковкина Т. Н.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «БрГУ», г. Братск, Россия
¹fr-air@yandex.ru, ²jatano@yandex.ru

В работе представлен способ снижения высших гармонических составляющих в цепях отбора напряжения, организованных по высокочастотным каналам связи высоковольтных линий электропередач напряжением 110 и 220 кВ.

Ключевые слова: высшие гармоники, искажение формы кривой напряжения, нелинейная вольт-амперная характеристика, компенсирующие фильтры.

OPERATION OF SYNCHRONIZATION DEVICES IN THE PRESENCE OF HIGHER HARMONIC COMPONENTS

Bakhmisov D. E.¹, Yakovkina T. N.²
^{1,2} BrSU, Bratsk, Russia
¹fr-air@yandex.ru, ²jatano@yandex.ru

The paper presents a method for reducing higher harmonic components in voltage sampling circuits organized via high-frequency communication channels of 110 and 220 kV high-voltage power lines.

Keywords: higher harmonics, distortion of the shape of the voltage curve, nonlinear volt-ampere characteristic, compensating filters.

Как известно, высшие гармонические составляющие (ВГС) токов, генерируемые электроприемниками с нелинейной вольт-амперной характеристикой приводят к негативным влияниям в системах защит и автоматики, телекоммуникационных системах связи и управления [1].

Гармоники могут нарушать работу релейной защиты и автоматики (РЗА) или ухудшать её параметры. Характер нарушения зависит от принципа работы устройства и режима работы электроэнергетической системы [2]. В аварийных и ненормальных режимах ВГС оказывают существенное влияние на некоторые виды РЗА. Так, например, на электрических станциях, где широко применяется подключение цепей

синхронизации с помощью трансформаторов отбора напряжения (ТОН) к конденсаторам связи (КС) типа СМР 110 (0,0064 пФ) и СМР 55 (0,0044 пФ) при наличии ВГС подобное включение может привести к перегрузке цепей отбора напряжения и, следовательно, к выходу из строя самих трансформаторов отбора. В дальнейшем при росте ВГС в определенном режиме работы энергосистемы может произойти недопустимое повышение напряжения, что, в свою очередь, может привести к пробоем разрядника (Р) в шкафу отбора напряжения (ШОН) (см. рис.1).

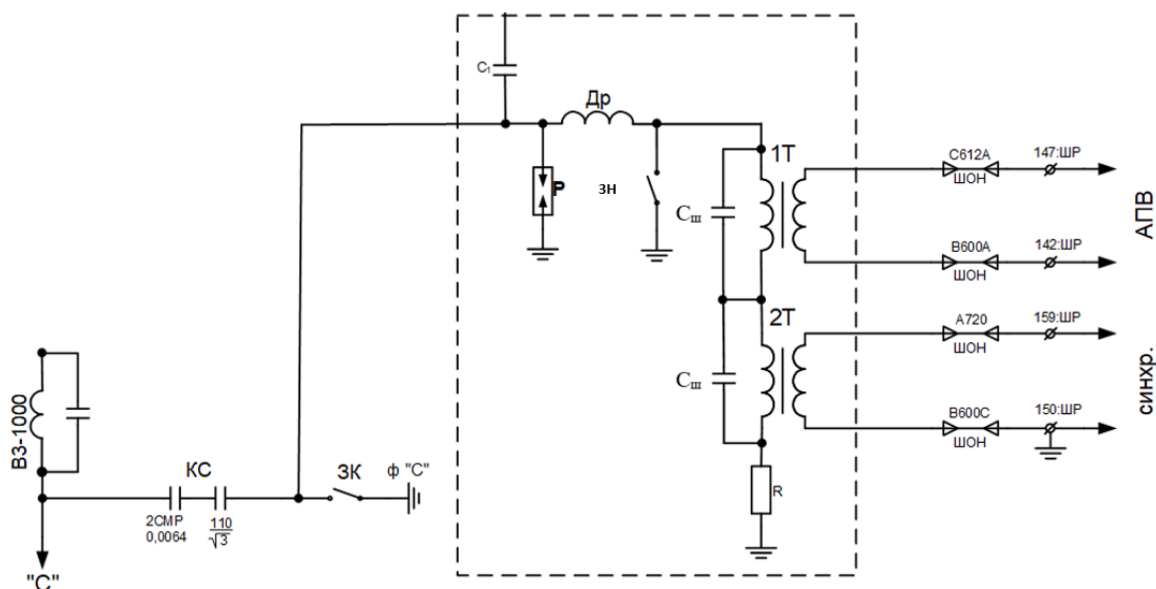


Рис. 1. Принципиальная схема ШОН и цепей синхронизации

Способы снижения степени несинусоидальности формы кривой токов (напряжений) условно можно разделить на 3 группы [3]:

- применение узкополосных резонансных фильтров или активных фильтров;
- использование «ненасыщающихся» трансформаторов или многофазных преобразователей;
- схемные решения. В частности, подключение нагрузки к системе с большой мощностью или распределение нагрузки (выделение нелинейной нагрузки на отдельную секцию или систему шин).

Один из способов защиты обмотки ТОН от перегрузок токами ВГС – подключение шунтирующей емкости $C_{ш}$ параллельно первичной обмотке ТОН. Для эффективного подавления ВГС емкость во вторичной цепи ТОН и на шинах синхронизации, предназначенную для регулировки параметров при наладке, устанавливать не следует. Регулировку необходимо производить с помощью шунтирующей емкости, которая обуславливает сдвиг фаз векторов токов в обмотке ТОН и в цепи КС [4].

По условиям работы устройств синхронизации сдвиг векторов токов на основной частоте должен компенсировать существующую разность аргументов (угол α) токов в обмотках реле контроля синхронизма.

Исходная величина шунтирующей емкости определяется по следующему выражению:

$$C_{\text{ш}} = \frac{1}{314 \cdot \left[X_{T1} + \frac{R_T}{\text{tg} \alpha} \right]}, \quad (1)$$

где R_T и X_{T1} – активная и индуктивная составляющие полного сопротивления, измеренного на основной частоте 50 Гц со стороны первичной обмотки ШОН при полностью собранной схеме цепей синхронизации, Ом.

Рассчитанная емкость $C_{\text{ш}}$, как указано выше, подключается параллельно первичной обмотке ТОН и регулируется величиной емкости в пределах 15-20%. Для оценки эффективности рассмотренного способа защиты устройств синхронизации можно применить формулу определения кратности подавления высшей гармоники v :

$$m_v = \left| \sqrt{\left(\frac{X_{Cv} - X_{Tv}}{X_{Cv}} \right)^2 + \left(\frac{R_T}{X_{Cv}} \right)^2} \right|, \quad (2)$$

где X_{Cv} и X_{Tv} – реактивное сопротивление шунтирующей емкости и сопротивление, измеренное с первичной стороны ТОН на частоте гармоники v , Ом.

Для определения действующего значения напряжения, приложенного к первичной обмотке ТОН, воспользуемся следующим соотношением:

$$U_{\text{д}}^2 = \sum_{v=1}^n \left(\frac{I_{0v}}{m_v} \cdot Z_{Tv} \right)^2, \quad (3)$$

где I_{0v} – действующее значение v -ой гармоники тока до подключения шунтирующей емкости, А; n – номер гармоники в спектре тока, I_{0v} ; Z_{Tv} – полное сопротивление ТОН на частоте гармоники v , Ом.

В соответствии с представленной методикой была рассчитана и опробована защита устройства синхронизации в электрической схеме ООО «ЭН+ГИДРО» филиал Братская ГЭС. Спектр первичных токов ШОН при наличии ВГС представлен в таблице 1.

Таблица 1.
Спектр первичных токов в ШОН на Братской ГЭС

Номер гармоники, ν	Частота, Гц	Ток гармоники, относительно основной, %
1	50	100
3	150	0,8
5	250	1,56
7	350	6,25
9	450	4,69
11	550	17,19
13	650	21,86
15	750	5,47
17	850	8,6
19	950	22,66
21	1050	25
23	1150	337,5
25	1250	99,23
27	1350	3,13
29	1450	2,34
31	1550	3,91
33	1650	1,56
35	1750	24,22
37	1850	50
39	1950	3,91
41	2050	2,34
43	2150	1,56
45	2250	3,13
47	2350	3,13
49	2450	3,13

Номинальный ток первичной обмотки для ШОН типа 301С с допустимым отклонением тока $\pm 5\%$ составляет 0,128 А [5]. При допустимом отклонении номинальный ток должен входить в диапазон от 0,122 до 0,134 А. Как видно из таблицы 1 в спектре первичного тока в процентном соотношении преобладает 23-я и 25-я гармоники, а также наблюдается увеличенные значения гармонических составляющих 11-, 13-, 19-, 21-, 35-, 37-ой. Это обусловлено режимом работы ШОН при работе высоковольтной линии 220кВ на холостом ходу.

Разность аргументов токов в устройстве синхронизации составило 7° . Величина полного входного сопротивления Z_{T1} на частоте основной гармоники, измеренного со стороны первичной обмотки ТОН при полностью собранной схеме цепей синхронизации, составила $8220 + j430$ Ом.

В соответствии с этим, расчетная величина шунтирующей емкости по соотношению (1) $C_{ш} = 0,046$ мкФ.

После окончательной регулировки установленная емкость составила 0,05 мкФ. Осциллограммы вторичного напряжения ТОН до и после установки шунтирующей емкости на объекте исследования представлены на рис. 2, 3.

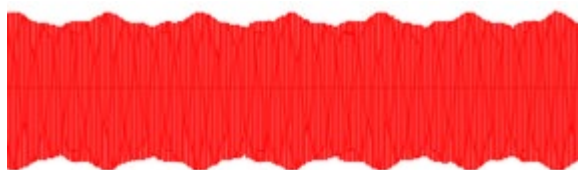


Рис. 2. Осциллограмма вторичного напряжения ТОН до установки шунтирующей емкости

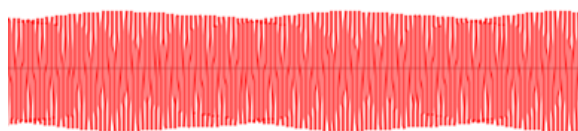


Рис. 3. Осциллограмма вторичного напряжения ТОН после установки шунтирующей емкости

Спектр первичных токов ШОН при наличии ВГС в электрической сети Братского энергорайона после установки шунтирующей емкости представлен в таблице 2.

Из табл. 2 и рис. 3 следует, что в результате работы шунтирующей емкости в спектре первичного тока отсутствуют какие-либо гармоники (отличные от основной), превышающие допустимые пределы.

Таблица 2.

Спектр первичных токов в ШОН на Братской ГЭС после установки шунтирующей емкости

Номер гармоники, v	Частота, Гц	Ток гармоники, относительно основной, %
1	50	100
3	150	0,8
5	250	3,13
7	350	1,56
9	450	0,8

11	550	1,56
13	650	1,18
15	750	0,8
17	850	0,8
19	950	0,8
21	1050	0,8
23	1150	0,8
25	1250	1,18
27	1350	0,8
29	1450	0,8
31	1550	0,8
33	1650	0,8
35	1750	1,18
37	1850	0,8
39	1950	0,8
41	2050	0,8
43	2150	0,8
45	2250	0,8
47	2350	0,8
49	2450	0,8

Высокий уровень ВГС в электрической сети приводит к перегрузке токами высших гармоник цепей синхронизации.

Подключение шунтирующих емкостей в первичные цепи обмоток ТОН устраняет перегрузку цепей синхронизации и обеспечивает работоспособность устройств РЗиА при несинусоидальных режимах электрической сети.

Источники

1. Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции. (Москва, 25 декабря 2020 г.) – М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга»», 2020. – 108 с.: ил.

2. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н., В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / Жежеленко И. В. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2004. - 358 с.

4. Схемы АПВ в электрических сетях: использование емкостного отбора напряжения: Практическое пособие / Сост. Е.Г. Дорохин, Т.Н. Дорохина. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 80 с.: ил.

5. Технический паспорт ШОН-301С. АВЛБ.436122.003, 2022. – 15 с.

ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ АВАРИЙНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СИЛОВЫХ МАСЛОПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

¹ Грунтович Н.В., ² Грунтович Н.В.

¹ ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», г. Минск, Республика Беларусь

² ГГТУ имени П.О.Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь
gruntovich@tut.by

В статье со ссылкой на работы различных авторов приводятся причины повреждений силовых маслонаполненных трансформаторов. Замена маслонаполненных вводов на вводы с RIP-изоляцией не повысило безотказность трансформаторов. В статье отмечается, что в белорусской энергетике возникают неоднократные разрушения вводов с RIP-изоляцией. Впервые высказана гипотеза, что причиной продолжающихся повреждений силовых маслонаполненных трансформаторов является электрическая дуга внутри бака трансформатора. В статье сформулировано физическое подобие электрического разряда в атмосфере и в баке маслонаполненного трансформатора. Предложена методика исследования электрической дуги в баке трансформатора

Ключевые слова: трансформатор, масло, частичные разряды, локальный перегрев, электрическая дуга, возгорание вводов, разрыв бака, макет трансформатора

MAIN CAUSES OF EMERGENCY DAMAGES OF OIL-FILLED POWER TRANSFORMERS

¹ Hruntovich M. V., ² Hruntovich N.V.

¹ GIPK "GAZ-INSTITUTE", Minsk, Republic of Belarus

² Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus
gruntovich@tut.by

The article, with reference to the works of various authors, provides the causes of damage to oil-filled power transformers. Replacing oil-filled bushings with RIP-insulated bushings did not improve the reliability of transformers. The article notes that in the Belarusian power industry there are repeated failures of RIP-insulated bushings. For the first time, a hypothesis has been put forward that the cause of ongoing damage to oil-filled power transformers is an electric arc inside the transformer tank. The article formulates the physical similarity of an electric discharge in the atmosphere and in the tank of an oil-filled transformer. A method for studying an electric arc in a transformer tank is proposed.

Keywords: transformer, oil, partial discharges, local overheating, electric arc, bushing ignition, tank rupture, transformer model

На балансе только Гомельских электрических сетей находится 64 подстанции 35-330 кВ. В том числе 330 кВ- 3 подстанции, 220 кВ – 2 подстанции, 110 кВ – 65, 35 кВ – 3 подстанции. Значительная часть трансформаторов отработала свой нормативный срок, а отдельные трансформаторы находятся в эксплуатации более 50 лет. По мнению

специалистов по управлению надежностью ГПО «Белэнерго» основными причинами отказов электрооборудования являются: старение оборудования и изоляции – 26%; дефекты нового оборудования – 46%; дефекты монтажа и наладки – 20%; прочие причины – 8%. Такая ситуация возможна, при плохой организации технического диагностирования на предприятиях ГПО «Белэнерго». Автор статьи [1] называет три основные причины повреждения трансформаторов:

- взрывы высоковольтных вводов;
- внутренние замыкания обмоток под воздействием розовых и частичных разрядов;
- интенсивное образование частичных разрядов в местах деформации обмоток.

Это характерно для конструкции трансформаторов выпуска 70-х годов. По мнению авторов статьи, причиной внутреннего замыкания обмоток могут быть незавершенные пробой изоляции после высоковольтных испытаний. По данным специалистов Гомельских кабельных сетей около 18% повреждения изоляции кабелей – это незавершенный пробой. Подобные физические процессы происходят в изоляции электрических двигателей и трансформаторов. Все больше специалистов сходится во мнении, что высоковольтные испытания изоляция это пережитки прошлого. Нами предлагается методика определения степени старения изоляции без испытаний. Некоторые авторы [2,3] по степени риска повреждения на первое место ставят локальные перегревы, на 10 место – частичные разряды. В Белорусской энергосистеме вероятность локальных перегревов составляет 0,3, частичных разрядов – 0,5-0,6 [4]. На рисунке 1 представлено оплавление соединительной шпильки трансформатора, выполненное авторами с места аварии.

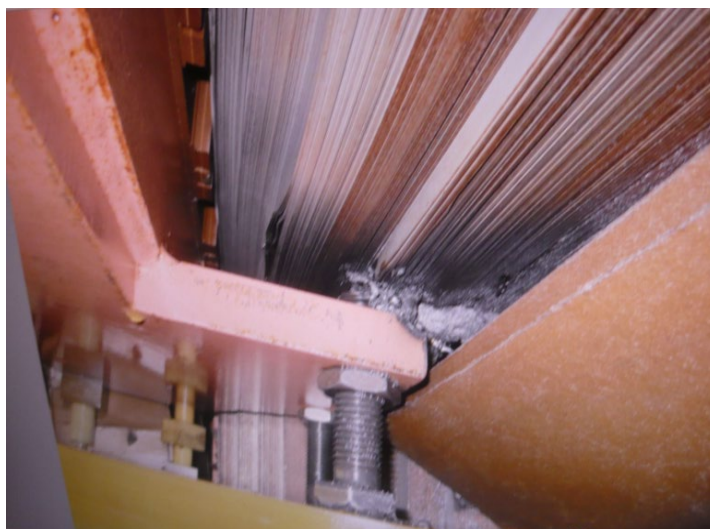


Рис. 1. Оплавление стяжной шпильки трансформатора при нарушении изоляции в результате электродуговых разрядов в баке трансформатора

В таблице 1 представлены данные американских страховых компаний [5]. Как следует из табл. 1, вероятность взрыва трансформаторов составляет 0,3. Трансформаторы взрываются и горят во всех странах мира, в том числе в Белорусской энергосистеме (рис. 2).



Рис. 2. Возгорание трансформатора под воздействием электрической дуги внутри бака трансформатора

Следует отметить, что температура воспламенения трансформаторного масла в закрытом объеме 350-450 °С. Ни ЗТЗ «Сервис», ни российские научные статьи не объясняют при каких условиях возникает такая температура во вводах. Хроматографический анализ трансформаторного масла перед взрывом ввода с RIP-изоляцией показал, что накануне взрыва в масле бака были мощные дуговые разряды. Параметры масла нам не известны.

Таблица 1.

Данные по повреждению силовых трансформаторов американских страховых компаний

Причина возникновения повреждения	Количество	Экономический ущерб, \$США
Повреждения изоляции	24	149 967 277
Проектирование, материал, установка	22	64 696 051
Неизвестно	15	29 776 245

Загрязнение масла	4	11 836 367
ПЕРЕГРУЗКА	5	8 568 768
Возгорание/взрыв	3	8 045 771
Сетевые перенапряжения	4	4 959 691
Ошибки при обслуживании	5	3 518 783
Заливание водой	2	2 240 198
Плохие контакты	6	2 186 725
Удар молнии	3	657 935
Увлажнения изоляции	1	175 000
Итого	94	286 628 811

Частичные разряды (ЧР) имеют свои особенности:

- не стационарный характер по месту возникновения (плавающий дефект), по амплитуде и частоте сигнала;
- ЧР способствуют быстрому образованию и увеличению горючих газов в масле;
- в определённых условиях ЧР переходят в электрическую дугу с большими повреждениями трансформаторов;
- ЧР вызывают возгорание маслонаполненных вводов и разрушает вводы с RIP – изоляций;
- ЧР представляют большую опасность для изоляции из-за быстрого её разрушения в локальных зонах с последующей пробоем изоляции.

В лабораторных условиях частичные разряды регистрировались от 20 кГц до 90 МГц в зависимости от примесей. Кроме того было установлено, что частичные разряды могут уничтожать первопричину их возникновения. Поэтому они регистрируются в трансформаторе и в кабеле в разных местах. Так как высоковольтные маслонаполненные вводы горели периодически, то было принято решение перейти на вводы с сухой изоляцией. В России стали выпускать вводы с RIP-изоляцией. Взрывы вводов с RIP-изоляцией и повреждения бака происходят периодически, но без возгорания масла. На рис. 3 представлено повреждение бака трансформатора электрической дугой.



а

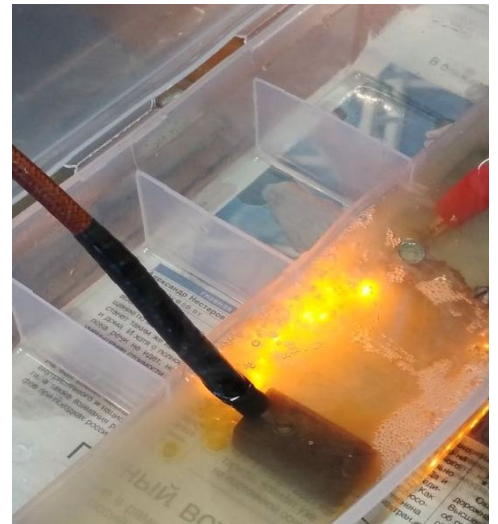


б

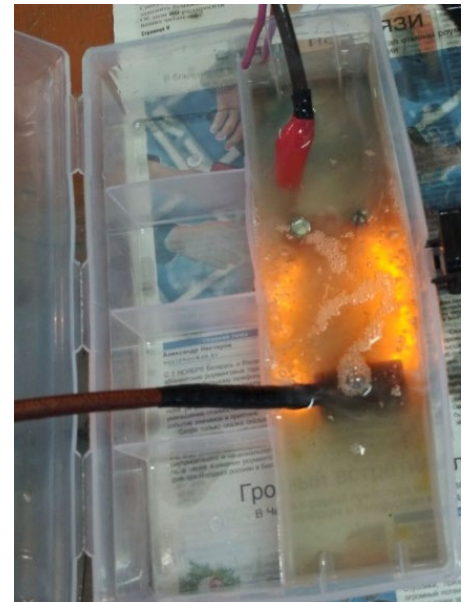
Рис. 3. Повреждения трансформаторов электрической дугой внутри бака трансформатора:

а — повреждение бака трансформатора под воздействием электрической дуги; *б* — обгоревшая магнитная система трансформатора

На одном предприятии было возгорание ввода и масла в баке трансформатора. При этом ввод 220 кВ вырвало из бака. После того как погасили горящее масло провели осмотр внутри бака трансформатора. Специалисты пришли к мнению, что трансформатор поврежден электрической дугой. Однако электрическая дуга не может образоваться в трансформаторном масле при сопротивлении $5 \cdot 10^{10}$ Ом/м. Следовательно в масле бака трансформатора в какой то момент происходят процессы, которые способствуют развитию электрической дуги. С использованием российского прибора АИД-70 создана экспериментальная установка по моделированию электрической дуги в трансформаторном масле. В зависимости от количества примесей в масле может возникнуть один или два электропроводящих канала (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. Экспериментальная установка по исследованию электрической дуги в трансформаторном масле на основе прибора АИД–70 и варианты формирования электрической дуги а– по одному электропроводящему каналу; б-по двум электропроводящим каналам.

На основе выполненных лабораторных исследований и анализа электрического разряда в атмосфере было установлено, что эти явления подобны. Подобие этих явлений заключается в следующем [6]:

1. Наличие заряда определенной величины (облако; высоковольтный ввод)
2. Наличие условий для формирования стримера, как в атмосфере, так и в трансформаторном масле (наличие заряженных микрочастиц)

3. Заземление в баке трансформатора.

Для определения физической природы электрической дуги и параметров защиты трансформатора от электрической дуги необходимо исследовать на макете трансформатора 110 кВ (рисунок 5).

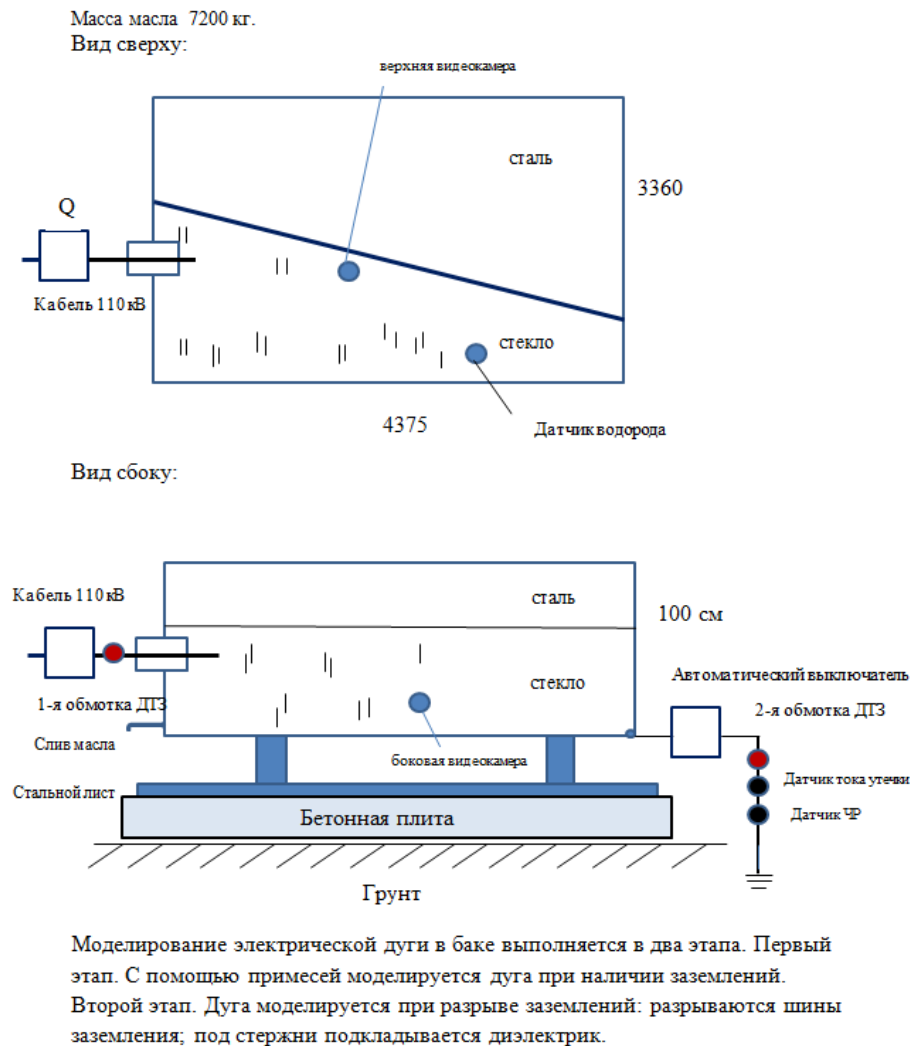


Рисунок 5 – Макет трансформатора 110 кВ для исследования электрической дуги

Это сложно и возможно дорого. Но стоимость одного трансформатора в среднем 1 млн. дол. США. Одной из задач данного эксперимента является определение влияния заземления трансформатора в развитии электрической дуги в баке трансформатора.

Таким образом, для разработки новой защиты силовых трансформаторов необходимо провести натурные исследования на макете трансформатора для определения физической природы электрической дуги в баке трансформатора.

Источники

1. Хлебников А. Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях. «Электричество» №7 2006г. с. 17-24.
2. Ванин Б.В., Ловов Ю.Н., Ловов М.Ю. О повреждении силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации. и др. «Электростанции», 2001 №9 с. 53-58.
3. Гун И.Г., Салганик В.М., Евдокимов С.А., Сарлибаев А.А. Основные неисправности и методы диагностирования трансформаторов в условиях эксплуатации. Вестник МГГУ им Г.И. Носова №7, 2012, с. 102-105.
4. Закономерности образования внутренней электрической дуги в силовых маслонаполненных трансформаторах. Грунтович Н.В., Грунтович Н.В. Энергетическая стратегия. 2022. № 1 (85). С. 21-24
5. Бартли, У. Обзор повреждений трансформаторов / У. Бартли // Энергия и Менеджмент. – 2011. – № 1. – С. 40–43.
6. Физический энциклопедический словарь [Текст]. — М.: Советская энциклопедия, 1978. — Т. 4. — 451 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЗЕРБАЙДЖАНСКИХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

Гаджибалаев Н.М.¹, Джаббарова С.М.², Ширинова А.Я.³.

^{1,2,3} СГУ, Сумгаит, Азербайджан

nadir.hacibalalayev@sdu.edu.az

В статье рассматриваются основные направления развития энергетической системы Азербайджана: расширение использования возобновляемых источников энергии, внедрение технологий Smart Grid и модернизация инфраструктуры. Отмечаются законодательные реформы, направленные на переход к конкурентному рынку электроэнергии. Особое внимание уделяется вопросам энергоэффективности, снижению потерь и обеспечению энергоснабжения на освобожденных территориях. Приведены данные о производстве электроэнергии и инвестиционном потенциале сектора ВИЭ.

Ключевые слова: энергетическая система, Азербайджан, возобновляемые источники энергии, Smart Grid, интеллектуальные сети, электроэнергия, модернизация инфраструктуры, энергоэффективность, энергетическая безопасность.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AZERBAIJANI ELECTRIC GRIDS

Gadjibalaev N.M.¹, Jabbarova S.M.², Shirinova A.Y.³,

^{1,2,3} SGU, Sumgait, Azerbaijan

nadir.hacibalalayev@sdu.edu.az

This article outlines the main trends in Azerbaijan's energy sector development, including renewable energy expansion, Smart Grid implementation, and infrastructure modernization. It highlights recent legislative reforms supporting the transition to a competitive electricity market. Emphasis is placed on energy efficiency, reduced losses, and power supply improvements in liberated territories. The article also presents data on electricity production and investment potential in renewables.

Keywords: energy system, Azerbaijan, renewable energy sources, Smart Grid, intelligent networks, electricity, infrastructure modernization, energy efficiency, energy security.

Существует несколько основных направлений развития электросетей Азербайджана:

Увеличение использования возобновляемых источников энергии: Увеличение использования возобновляемых источников энергии, таких как ветер, солнце и биомасса, обеспечит устойчивость и непрерывность электросетей.

Внедрение технологий интеллектуальных сетей: Внедрение технологий интеллектуальных сетей важно для повышения гибкости управления сетями и обеспечения более эффективного использования энергии. Это также сократит потери энергии и поможет быстро обнаружить сбои в работе сети.

Модернизация инфраструктуры: Модернизация инфраструктуры и внедрение автоматизированных систем для обеспечения эффективного управления электросетями являются одними из главных приоритетов.

Укрепление международных отношений: Азербайджану следует повысить стабильность электросети и сделать энергоснабжение более гибким и надежным за счет расширения энергообмена с соседними странами.

Распоряжения Президента Азербайджанской Республики господина Ильхама Алиева о «Государственной программе по развитию топливно-энергетического комплекса Азербайджанской Республики (2005-2015 годы)» и «Дополнительных мерах по улучшению обеспечения электроэнергией в Азербайджанской Республике» знаменуют начало нового периода развития энергетического сектора Азербайджана. Это наглядно видно на представленной ниже диаграмме производства электроэнергии (млрд кВтч) за 2015-2024 годы.

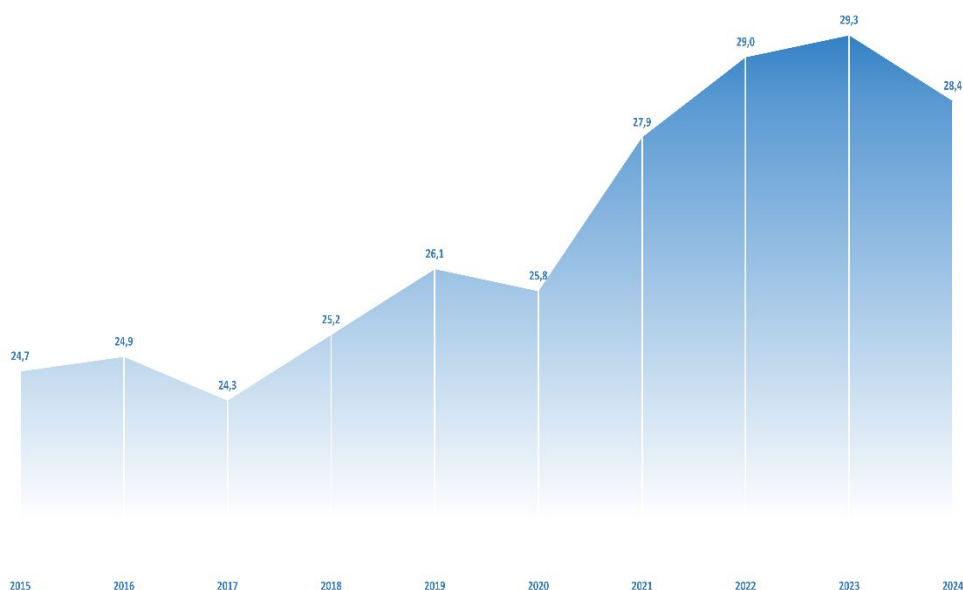


Рис. 1. Производство электроэнергии в 2015-2024 гг. (млрд кВтч)

Основными тенденциями развития энергетической системы Азербайджана являются расширение использования возобновляемых источников энергии, создание интеллектуальных сетей и повышение энергоэффективности. В этих областях реализуется ряд проектов, и эти работы будут продолжены в будущем.

Основными задачами, стоящими перед энергетической системой Азербайджана, являются сокращение потерь в электросетях, обновление устаревшей инфраструктуры, расширение использования возобновляемых источников энергии и повышение энергоэффективности. Для реализации этих задач государством приняты и реализуются соответствующие программы.

С этой целью был принят Закон Азербайджанской Республики № 858 VIQ от 11 апреля 2023 года «Об электроэнергетике», вступивший в силу с 1 января 2024 года.

Закон устанавливает, что процесс внедрения элементов рынка электроэнергии должен состоять из трех этапов и осуществляться в следующие сроки в целях адаптации субъектов электроэнергетики и потребителей к изменениям на рынке электроэнергии, в том числе к внедрению отношений свободной конкуренции и ликвидации субсидий:

- первый этап продлится со дня вступления в силу настоящего Закона, то есть с 1 января 2024 года по 30 июня 2025 года;
- второй этап продлится с 1 июля 2025 года по 30 июня 2028 года;
- третий этап начнется 1 июля 2028 года.

Заключение

1. Энергетическая система Азербайджанской Республики за последние годы получила значительное развитие. Однако ряд проблем все еще существует. Государство принимает соответствующие меры для решения этих проблем и дальнейшего развития энергетической системы. Расширение использования возобновляемых источников энергии, создание интеллектуальных сетей и повышение энергоэффективности являются основными направлениями будущего развития энергетической системы Азербайджана.

2. Электросети Азербайджана, зависящие как от внутренних ресурсов, так и от международных поставщиков энергии, играют важную роль в обеспечении энергоснабжения страны. Модернизация сетевой инфраструктуры, интеграция возобновляемых источников энергии и внедрение технологий Smart Grid приведут к более эффективному управлению электросетями и повысят надежность энергоснабжения. Эти разработки позволят энергетическому сектору Азербайджана стать более устойчивым и эффективным в будущем.

Внедрение технологий SMART Grid на освобожденных территориях позволяет вывести энергоснабжение этих регионов на современный уровень, повысить устойчивость и сократить потери. Это не только способствует социально-экономическому развитию региона, но и способствует использованию экологически чистой энергии.

На рисунке ниже показан потенциал инвестиций в возобновляемые источники энергии в общем энергобалансе Азербайджана за счет применения технологий SMART Grid.

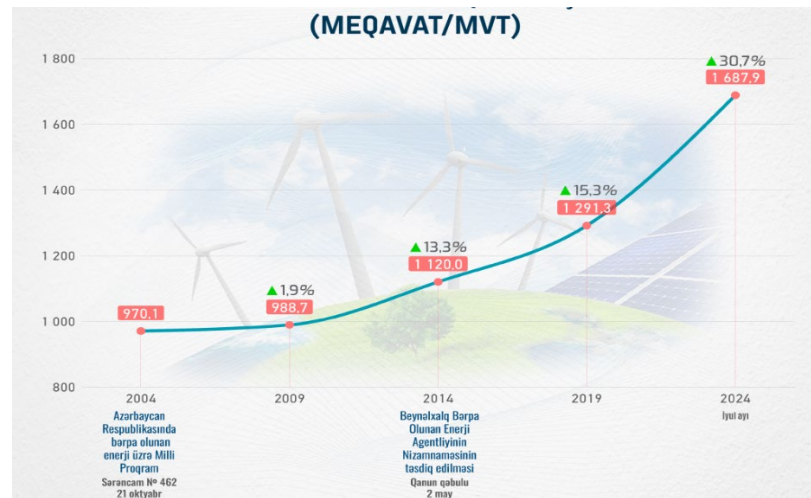


Рис. 2. Инвестиционный потенциал возобновляемой энергетики в общем энергобалансе Азербайджана с применением технологий SMART Grid

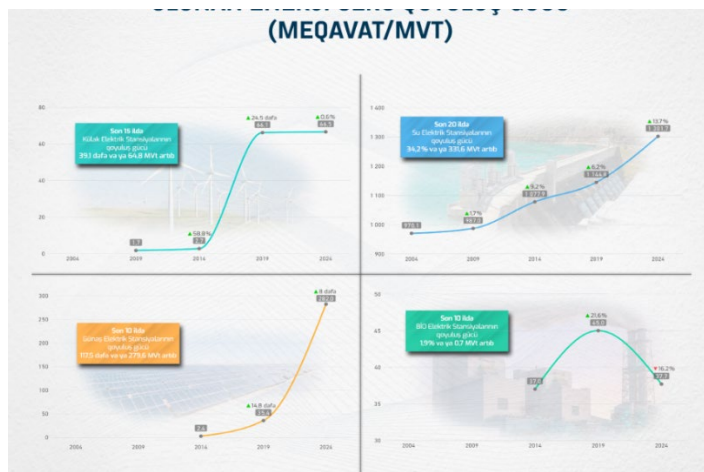


Рис. 3. Инвестиционный потенциал возобновляемой энергетики в общем энергобалансе Азербайджана (MEGAWAT)

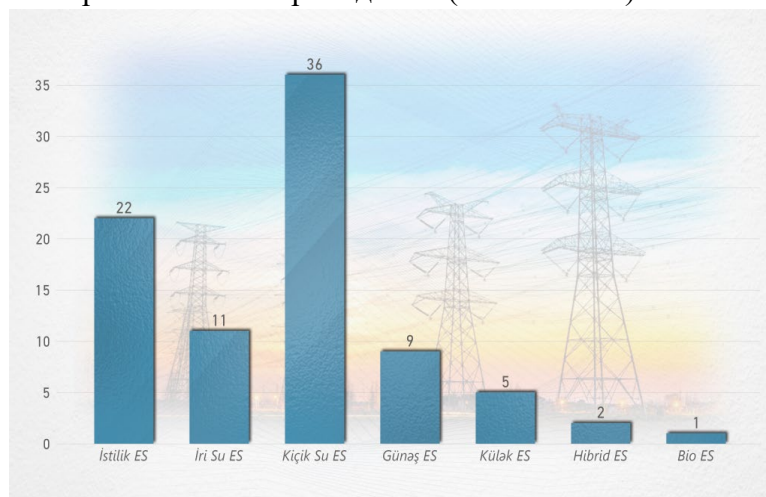


Рис. 4. Наименование и количество электростанций, действующих в Азербайджане в 2024 году

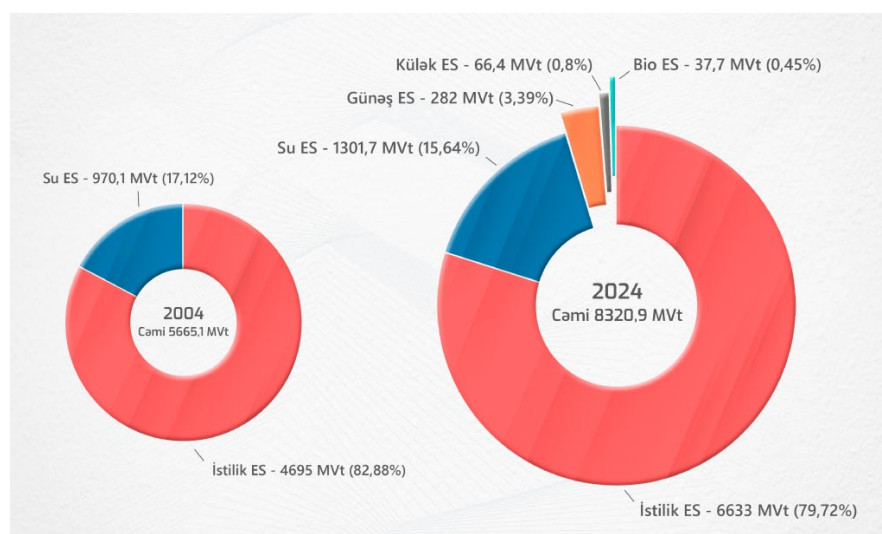


Рис. 5. Изменения в общем энергетическом балансе Азербайджана за последние 20 лет

Источники

1. Гаджибалаев Н.М., Джаббарова С.М., Джавадова А.И.. Альтернативный (возобновляемый) энергетический потенциал в азербайджане. Материалы X Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» КГЭУ, 2025. 31 с.
2. Гаджибалаев Н.М., Джавадова А.И. Альтернативная энергия азербайджана на освобожденных территориях. Материалы Международной научно-практической on-line конференции Электрические сети: надежность, безопасность, Энергосбережение и экономические аспекты КГЭУ, 2024. 42 с.
3. Устойчивое энергетическое будущее Азербайджана // URL: <https://eenergy.media/news/21756?ysclid=ma4aig8ps0487665191> [Электронный ресурс]

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Зарипов Д.К.

ФГБОУ ВО КГЭУ, г. Казань, Россия

dzaripov@list.ru

Накопление загрязнения на изоляторах может приводить к их перекрытию во влажных условиях. Данная работа посвящена изучению влияния увлажнения загрязненной поверхности стеклянных и полимерных изоляторов на их температурные контрасты в лабораторных условиях. В ходе исследований было показано, что тепловизорами можно диагностировать даже легко загрязненную изоляцию в смоченном состоянии. Среднее и среднеквадратичное значения температурных контрастов на термограммах изоляторов могут служить признаками загрязнения. Предложена методология построения системы контроля изоляции на воздушных линиях и алгоритм автоматизированной обработки данных.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; подвесные изоляторы; термограммы; увлажнение изоляции; диагностирование загрязнения тепловизором; температурные контрасты.

DIAGNOSTICS OF INSULATION CONTAMINATION BY THERMAL RADIATION

Zaripov D.K.

FSBEI HE, Kazan, Russia

dzaripov@list.ru

The accumulation of contamination on insulators can lead to their overlap under humid conditions. This work is devoted to the study of the effect of wetted contaminated surface of glass and polymer insulators on their temperature contrasts in laboratory conditions. It has been shown that thermal imaging cameras can diagnose even lightly contaminated insulation in the wetted state. Mean and RMS values of temperature contrasts on thermograms of insulators can serve as signs of contamination. The methodology of building a system of insulation control on overhead lines and an algorithm of automated data processing are proposed.

Keywords: overhead power lines; suspended insulators; thermograms; insulation wetting; thermal imaging fouling diagnostics; temperature contrasts.

По мере совершенствования производства высоковольтных изолирующих конструкций на первый план выходят отказы оборудования, связанные с внешними факторами, влияющими на изоляцию, такими как загрязнения. Количество отключений воздушных линий из-за загрязнений может варьироваться в зависимости от региона, климатических условий и состояния инфраструктуры электросети [1-3]. По различным оценкам, доля отключений из-за загрязнений может составлять от 20% до 40% от общего числа отключений воздушных линий. Загрязнение изоляторов включает в себя накопление солей, пыли, промышленных загрязнений и биологических материалов, что снижает их диэлектрическую прочность и увеличивает риск перекрытия. Вероятность перекрытия загрязненной изоляции зависит от типа и степени загрязнения, а также климатических условий : влажность воздуха, температура и осадение влаги на поверхность изоляторов. Поскольку перечисленные факторы во многом носят непредсказуемый характер, то для снижения вероятности отказов необходимо обеспечить непрерывный контроль состояния изоляции.

Методы, применяемые в системах контроля за состоянием изоляции разнообразны [4]. Тепловизионный не является самым распространённым из них. Однако, по мере повышения надежности и снижения стоимости тепловизоров они все больше находят применение как еще одни камеры видеонаблюдения за состоянием высоковольтного оборудования [5, 6]. Преимущества тепловизионных камер очевидны. Достаточно провести визуальный анализ термограмм и отпадает необходимость в сложной системе обработки данных, которую требуют другие методы [7].

В данной работе описываются результаты лабораторных экспериментов по тепловизионному диагностированию загрязнения подвесных стеклянных и полимерных изоляторов с имитацией различных внешних условий функционирования. Цель исследования заключается в изучении влияния увлажнения загрязненной поверхности стеклянных и полимерных изоляторов на их температуру и оценке возможности применения тепловизионного метода для диагностирования загрязненного состояния изоляторов. Методология построения системы тепловизионного контроля и алгоритм автоматизированной обработки полученных данных могут помочь в создании автоматизированной системы контроля состояния изоляции.

В процессе работы под переменным напряжением изолирующая конструкция, состоящая из гирлянды изоляторов или цельного полимерного изолятора, нагревается в следствие диэлектрических потерь, величина которых определяется не только активным сопротивлением, но и емкостью.

Ситуация аналогична поведению гирлянды подвесных фарфоровых изоляторов при наличии внутренних дефектов [8]. Она характеризуется непредсказуемым разбросом мощностей тепловыделения на отдельных изоляторах. Только в нашем случае она определяется неравномерностью поверхностного загрязнения и увлажнения.

Поскольку загрязнение и увлажнение заведомо неравномерно, то предлагается загрязненное состояние отличить по изменению пространственного распределения интенсивности теплового излучения по всей конструкции [9,10]. Величинами, характеризующими распределение, являются среднее и среднеквадратическое отклонение. Для определения состояния загрязнения необходимо одновременно использовать обе эти характеристики распределения.

Описанный принцип изначально был разработан для диагностирования подвесных и опорных фарфоровых изоляторов. Однако, может быть экстраполирован на выявление поверхностных загрязнений стеклянных и полимерных изоляторов. Фактически загрязнение — это тот же дефект.

Моделирование работы гирлянды стеклянных изоляторов и полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана проводилось с применением экспериментальной камеры «тумана» [11, 12].

В ходе лабораторных экспериментов исследовалась ситуация с легким загрязнением в соответствии с международной классификацией по ГОСТ Р 56735-2015 (IEC/TS 60815-1:2008).

В центре камеры устанавливалась изолирующая конструкция, представляющая собой гирлянду из трех стеклянных изоляторов ПС-70Е или полимерный изолятор ЛК-70/35, которая подключалась к испытательной установке.

Туман, генерируемый пьезоэлектрическими элементами 2-х ультразвуковых увлажнителей, подавался внутрь камеры через два отверстия, находящиеся сверху и/или внизу задней стенки камеры. Скорость подачи пара для всех испытаний была около 300 мл/ч.

Токи утечки по поверхности гирлянды изоляторов регистрировались при помощи цифрового осциллографа TDS2022C.

Загрязнение изоляторов проводилось в соответствии с методом предварительного загрязнения (ПЗ). В качестве загрязняющего вещества применялся раствор, содержащий 40 граммов каолинового порошка и от 0 до 40 грамм (в разных экспериментах) поваренной соли (NaCl) на 1 литр водопроводной воды. Удельная электропроводность воды составляла около 200 мкСм/см. Полученная суспензия распылялась на поверхность изоляторов

пульверизатором. Загрязнённый изолятор оставался подсыхать на срок более 24 часов до начала экспериментов.

Измеренная эквивалентная плотность солевого отложения изоляторов (ESDD) составляла от 0,0034 (только водопроводная вода) до 0,04 мг/см² (водопроводная вода и 40 граммов соли). Данные уровни характеризуют легкое загрязнение.

В двух экспериментах (базовых) стеклянные и полимерный изоляторы оставались чистыми.

Исследования проводились длительным приложением к изолятору переменного напряжения 30 кВ с непрерывным увлажнением в камере в течение одного часа. Напряжение на изолирующую конструкцию подавалось за несколько минут до подачи пара в камеру. Выключение напряжения также осуществлялось через некоторое время после окончания увлажнения, когда разрядная деятельность значительно снижалась.

Всего было проведено 30 экспериментов со стеклянными и полимерными изоляторами. В ходе экспериментов непрерывно измерялись значения амплитуд синусоидальной составляющей и импульсов тока утечки, протекающего по поверхности загрязненной изоляции. После завершения измерений в камере и выключения напряжения, тепловизором снимались термограммы изолирующих конструкций.

Результаты экспериментов отображены на графиках (рис. 1-4). Примеры термограмм приведены на рис. 5 [13].

На рисунках 1 – 4 значения среднего ΔT_{cp} и среднеквадратического отклонения $D(\Delta T_i)$ в распределении температур изоляторов на термограммах представлены в виде зависимостей от степени солёности загрязняющего раствора.

Анализ тепловизионных изображений и графиков показывает:

1. Распределение температур вдоль изолирующей конструкции хаотично. Таким образом при анализе загрязнения по термограммам следует опираться на статистические характеристики (ΔT_{cp} , $D(\Delta T_i)$).

2. Для гирлянды изоляторов диапазон изменения ΔT_{cp} от 2,87 °С до 11,37 °С, а $D(\Delta T_i)$ от 0,54 °С до 5,35 °С. Характерна тенденция к росту ΔT_{cp} при увеличении засолённости раствора (с солью в растворе средняя по экспериментам $\Delta T_{cp} = 6,58$ °С, а без нее (только каолин) $\Delta T_{cp} = 3,71$ °С). $D(\Delta T_i)$ средняя по экспериментам также изменяется примерно в той же пропорции (с 2,0 °С до 0,8 °С соответственно).

3. Для полимерного изолятора тепловые контрасты ниже (меньше общий ток). Так диапазон изменения ΔT_{cp} от 2,12 °С до 3,9 °С, а $D(\Delta T_i)$ от 0,72 °С до 1,34 °С. Также характерна тенденция к росту ΔT_{cp} при увеличении

засоленности раствора (с солью в растворе средняя по экспериментам $\Delta T_{\text{ср}} = 3,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, а чистого $\Delta T_{\text{ср}} = 1,19\text{ }^{\circ}\text{C}$). $D(\Delta T_i)$ средняя по экспериментам также изменяется примерно в той же пропорции (с $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0,52\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно).

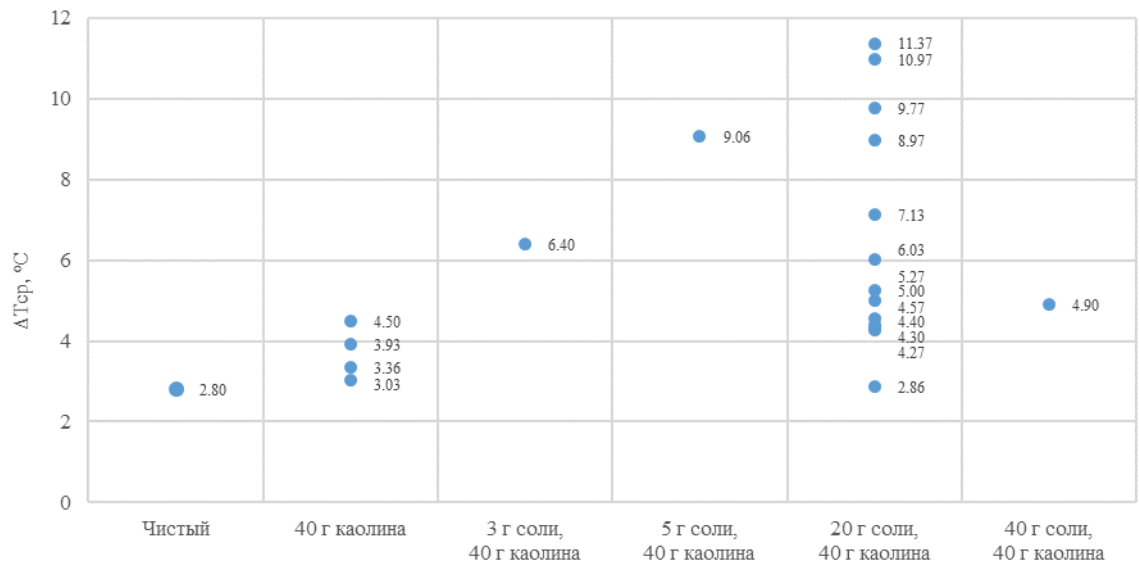


Рис. 1. График зависимости $\Delta T_{\text{ср}}, ^{\circ}\text{C}$ гирлянды стеклянных изоляторов от засоленности раствора [13]

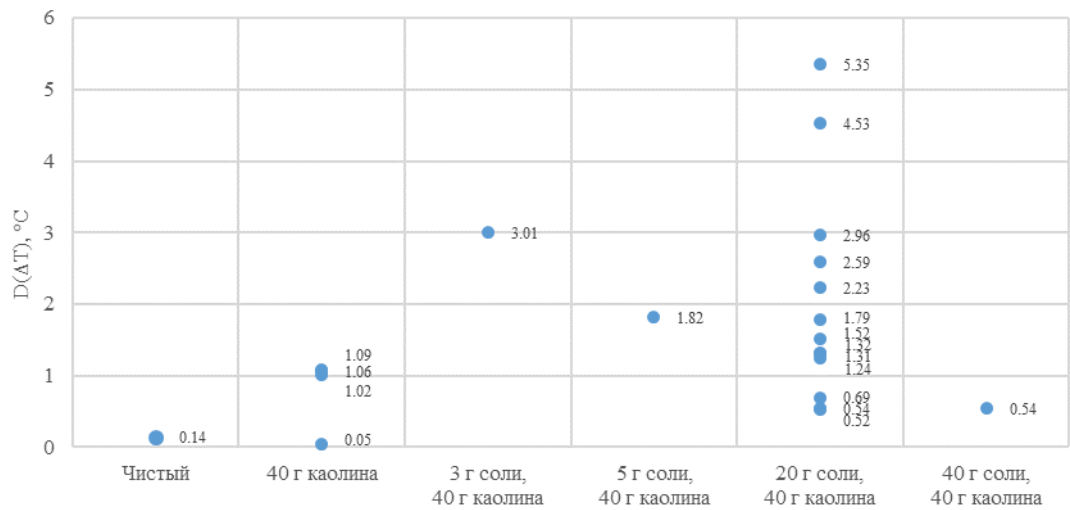


Рис. 2 График зависимости $D(\Delta T), ^{\circ}\text{C}$ гирлянды стеклянных изоляторов от засоленности раствора [13]

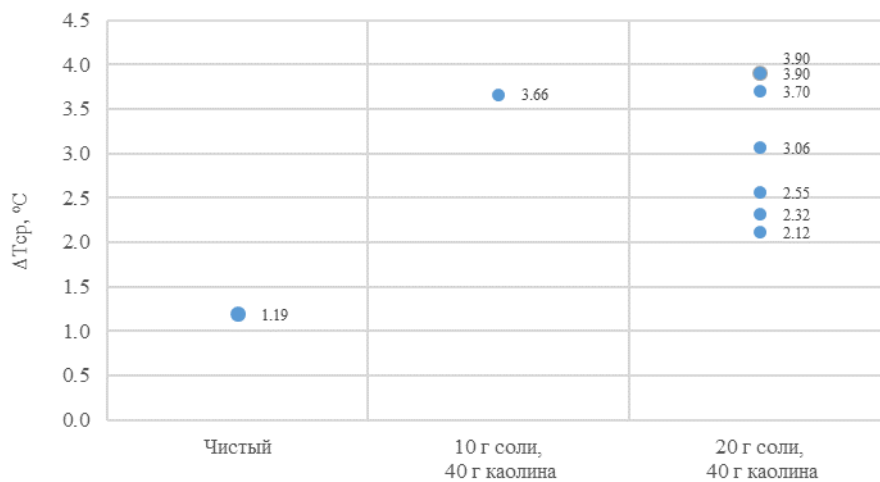


Рис. 3. График зависимости $\Delta T_{ср}, ^\circ\text{C}$ полимерного изолятора от засоленности раствора [13]

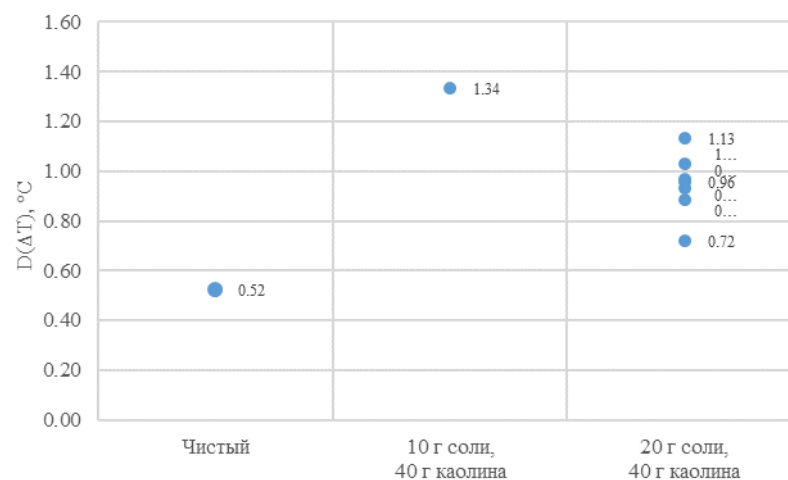


Рис. 4. График зависимости $D(\Delta T), ^\circ\text{C}$ полимерного изолятора от засоленности раствора [13]

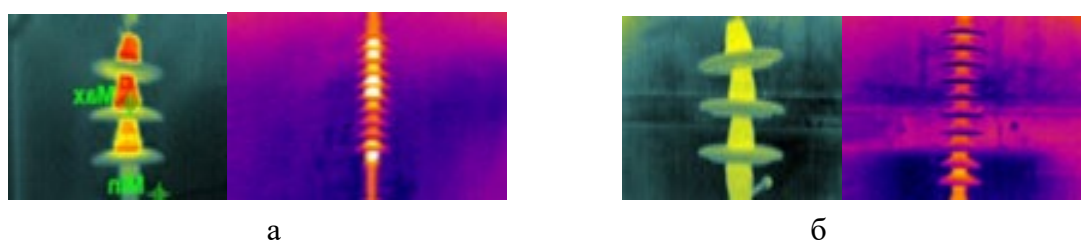


Рис. 5. Примеры термограмм изоляторов с загрязнением (а) и чистых (б) [13]

4. В ходе экспериментов не было выявлено существенной разницы в результатах при равномерном и неравномерном предварительном загрязнении. Вероятной причиной этого является то, что данные воздействия оказывают лишь временный эффект. В ходе часового эксперимента за счет увлажнения происходит выравнивание тепловых неоднородностей. Это подтверждается наблюдениями за разрядной деятельностью и электрическими измерениями, проводившимися в ходе тех же экспериментов и описанными в статьях ранее [11,12].

В целом легко загрязненную гирлянду и полимерный изолятор ($ESDD \sim 0,04 \text{ мг/см}^2$) можно отличить от незагрязненной как по термограмме, так и по вычисленным значениям ΔT_{cp} и $D(\Delta T_i)$.

Эксперименты показали, что с помощью тепловизора можно диагностировать загрязнение изолирующих конструкций ВЛ и подстанций. Необходимое условие - хорошее смачивание поверхности изоляторов в тумане или росой. Данные условия возникают во внешней среде, где работают изоляторы периодически в весенне-летне-осенний период. Однако, поскольку предугадать время выпадения конденсата на поверхность практически сложно, необходимы системы непрерывного контроля. Десяток непрерывно работающих тепловизоров, установленных на опоры ВЛ в определенном районе, могут дать достаточную информацию для обслуживающего персонала сетей о состоянии загрязнения изоляции отдельной линии и района.

Методика оценки загрязнения изоляции может быть следующий:

1. Выделение на термограмме всех изоляторов в гирлянде или отдельных стержневых и опорных изоляторов;
2. Вычисление среднего и среднеквадратического отклонения в распределении температур точек в выделенных зонах.
3. Определение загрязненной изоляции по превышению полученных значение среднего или среднеквадратического отклонений температур над значениями для чистой изоляции, снятой в тех же условиях.

Процесс по данному алгоритму может быть автоматизирован и использоваться при разработке онлайн систем тепловизионного контроля оборудования ВЛ и подстанций.

Источники

1. Research Provided Insight into Unexplained Line Outages [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures/> (дата обращения: 22.08.2024).
2. Investigating Unexplained Reclosures on Power Grid [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures/> (дата обращения: 22.08.2024).
3. Bapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system // 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). – IEEE, 2020. – С. 1-6
4. Maraaba L. et al. Contamination level monitoring techniques for high-

voltage insulators: a review //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – С. 7656.

5. Wang Y., Yin Y., Ren J. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image // Advances in Mechanical engineering. – 2019. – Т. 11. – №. 4. – С. 1687814019828551.

6. Астапова М. А., Лебедев И. В. Обзор подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – №. 4. – С. 38-39.

7. Ullah I. et al. Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 392.

8. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 288. – С. 01070.

9. Зарипова А.Д., Зарипов Д.К., Усачев А.Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19(5-6):51-57.

10. Зарипов Д.К. Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006; № 3-4. стр. 56-60.

11. Zaripov D. K., Zakirov D. F., Zakharov A. V. Dynamics of development of discharges on the contaminated surface of insulators in the process of wetting as a diagnostic sign // Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). – SPIE, 2024. – Т. 12986. – С. 149-155.

Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023; 25(5):20-29.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ИНДУКЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО С БЕГУЩИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Миронов Е. А.¹, Качанов А. Н.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия
gen996@mail.ru

В статье приведен анализ применения индукционных устройств с бегущим электромагнитным полем в промышленности. Предложено использование энергоэффективного индукционного устройства с бегущим электромагнитным полем для предварительного нагрева под закалку валков прокатных станов, позволяющее одновременно совместить в себе функции нагрева и вращения валков с возможностью раздельного управления их режимами, которые были исследованы с использованием программного продукта ELCUT. Проведено технико-экономическое сравнение предварительного нагрева валков прокатных станов с использованием газовой печи, электропечи и энергоэффективного индукционного устройства с бегущим электромагнитным полем.

Ключевые слова: индукционная закалка, бегущее электромагнитное поле, валок прокатного стана, непрерывно-последовательный способ нагрева, программный продукт ELCUT.

ENERGY-EFFICIENT INDUCTION DEVICE WITH A TRAVELING ELECTROMAGNETIC FIELD FOR PRE-HEATING OF ROLLING MILLS ROLLS

Mironov Y. A.¹, Kachanov A. N.²

^{1,2} FSBEI HE «OSU named after I.S. Turgenev», Oryol, Russia
gen996@mail.ru

The article presents an analysis of induction devices with a running electromagnetic field apply in industry. It is proposed to use an energy-efficient induction device with a running electromagnetic field for preheating for hardening of rolling mill rolls, which allows simultaneously combining the functions of heating and rotating rolls with the ability to separately control their modes, which were studied with the ELCUT software product. A technical and economic comparison of preheating of rolling mill rolls using a gas furnace, an electric furnace and an energy-efficient induction device with a traveling electromagnetic field is carried out.

Keywords: induction hardening, traveling electromagnetic field, rolling mill work roll, scan heating method, program software ELCUT.

В настоящее время индукционный нагрев широко используется в различных отраслях экономики благодаря таким свойствам как высокая энергоэффективность, универсальность и экологичность. Индукционные устройства с бегущим электромагнитным полем (БЭМП) успешно применяются в промышленности для решения различных технологических задач, например, в качестве магнитогидродинамических насосов и электромагнитных сепараторов в металлургии, низкотемпературных нагревателей для одновременного нагрева и перемещения электропроводящих тел и сред в химической, целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности и др [1-4]. Широкому внедрению устройств с БЭМП способствует их специфическая особенность, обеспечивающая одновременный нагрев и перемещение нагреваемых объектов.

Перспективным направлением применения устройств с БЭМП для повышения энергоэффективности может стать процесс предварительного нагрева под индукционную закалку валков прокатных станов. Валки прокатных станов являются крупногабаритными изделиями, масса которых может достигать десятков тонн. На конечной стадии изготовления валков их рабочие части (бочки) подвергаются индукционной поверхностной закалке. Индукционный способ закалки крупногабаритных валков реализуется при помощи индукторов различной конструкции [5], которые перемещаются вдоль нагреваемой бочки валка, при этом сам валок приводится во вращение с помощью дополнительного привода для повышения равномерности распределения температурного поля в бочке валка.

Накопленный опыт изготовления и промышленной эксплуатации валков прокатных станов позволил выявить, что для повышения эксплуатационной стойкости и предотвращения отслоения закаленного слоя необходимо использовать предварительный нагрев бочки валка с целью получения градиента температуры между поверхностью и сердцевиной не более 500 °С, что позволяет увеличить толщину переходной зоны от закаленного слоя к сердцевине после этапа охлаждения [6, 7]. Предварительный нагрев бочки валка может осуществляться в печи сопротивления или газопламенным способом, после которых подогретый валок переносится в индукционную установку для последующей закалки. Эти энергоемкие способы позволяют обеспечивать исключительно поверхностный нагрев и передачу теплоты вглубь валка только за счёт теплопроводности металла. Также, газопламенный нагрев может вызывать пережог и обезуглероживание нагреваемой поверхности. Индукционный

способ нагрева лишен подобных недостатков. Он осуществляется в одной закалочной установке в два этапа: предварительный нагрев бочки валка на промышленной частоте, а затем нагрев до температуры закалки на повышенной частоте.

Применение индукционного устройства с БЭМП на промышленной частоте для предварительного нагрева позволяет совместить две функции в одном устройстве: нагрев и вращение валка с возможностью раздельного управления их режимами, что повышает энергоэффективность. Таким образом, возникает задача исследования данных режимов, представляющая собой научно-практический интерес.

Энергоэффективное устройство с БЭМП состоит из нескольких трёхфазных индукторов с БЭМП, основные элементы конструкции которых приведены на рисунке 1. Исследования режимов нагрева и вращения валков были проведены с использованием лицензионного программного продукта ELCUT [8]. Для этого были разработаны математические модели систем «индуктор(-ы) с БЭМП – цилиндрическая загрузка», эскизы которых приведены на рисунке 2. Для автоматизации расчетов при проведении исследований использовался встроенный инструмент параметризации LabelMover.

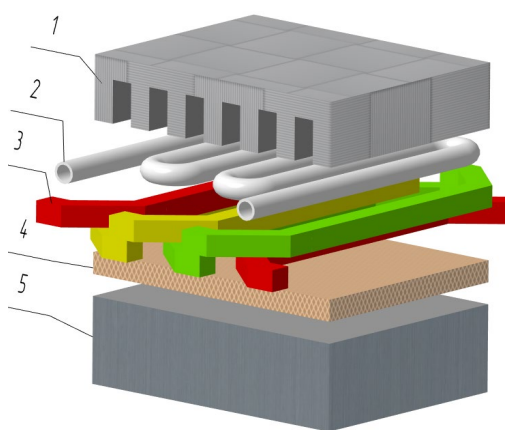


Рис. 1. Основные элементы трёхфазного индуктора с БЭМП:

1 – магнитопровод; 2 – трубка системы охлаждения обмотки; 3 – трёхфазная обмотка; 4 – футеровка; 5 – загрузка

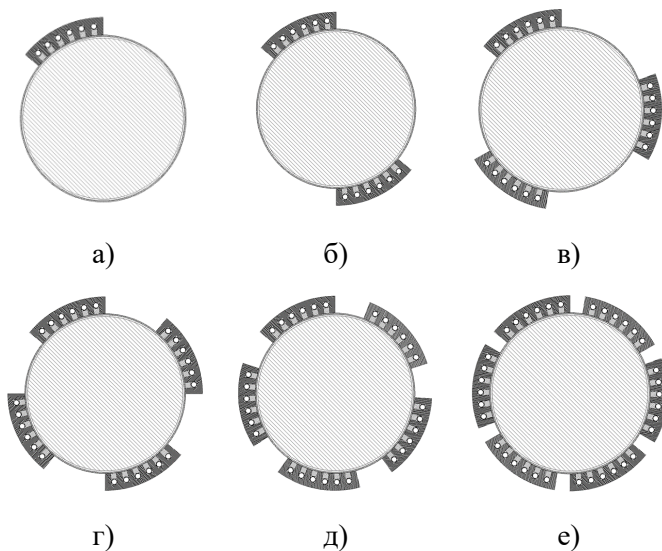


Рис. 2. Эскизы исследуемых систем «индуктор(-ы) с БЭМП – цилиндрическая загрузка»:

а) 1 индуктор; б) 2 индуктора; в) 3 индуктора; г) 4 индуктора; д) 5 индукторов; е) 6 индукторов.

На рисунке 3 приведены полученные зависимости мощности тепловыделения P_{2T} (а) и вращающего момента M (б) от количества согласно включенных индукторов с БЭМП и токов в них на холодной и горячей стадии нагрева. (цифра на графике возле каждой кривой обозначает

количество согласно включенных индукторов, работающих: без штриха – в холодном режиме, со штрихом – в горячем режиме).

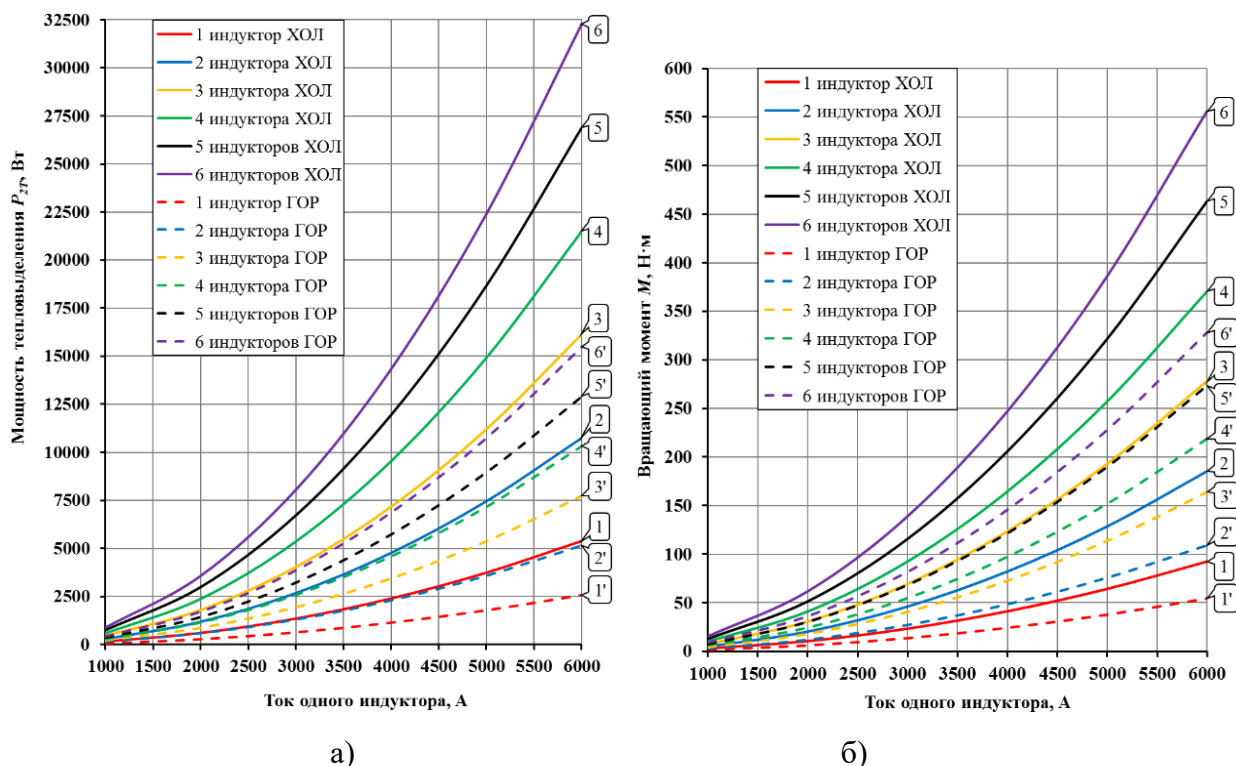


Рис. 3. Зависимость мощности тепловыделения P_{2T} (а) и вращающего момента M (б) от количества согласно включенных индукторов с БЭМП и токов в них на холодной и горячей стадии нагрева

Анализируя приведенные зависимости можно сделать вывод, что добиться расширения диапазона управления режимами нагрева и вращения загрузки можно путем увеличения количества индукторов, входящих в систему при этом результирующие значения P_{2T} и M в загрузке прямо пропорциональны суммарному значению данных величин от всех индукторов, входящих в систему. Также, при каждом добавлении в систему нового индуктора требуется использовать меньшие значения силы тока в обмотках индукторов на 8-30 % для достижения тех же значений P_{2T} и M в загрузке.

На рисунке 4 приведены зависимости частоты вращения загрузки $n_{загр}$ от вращающего момента M при различном количестве согласно включенных индукторов с БЭМП на холодной и горячей стадии нагрева. Приведенные графики позволяют сделать выводы о том, что для осуществления ступенчатого регулирования $n_{загр}$ и M при сохранении величины P_{2T} на заданном уровне требуется наличие возможности переключения порядка чередования фаз индукторов. Также, изменяя количество согласно включенных индукторов возможно компенсировать падение создаваемого

ими вращающего момента при переходе режима нагрева из холодной в горячую стадию. Добиться плавного регулирования можно путем изменения величины в обмотках индукторов, однако одновременно это повлечёт за собой изменение P_{2T} в загрузке, что необходимо учитывать при подборе оптимального режима нагрева.

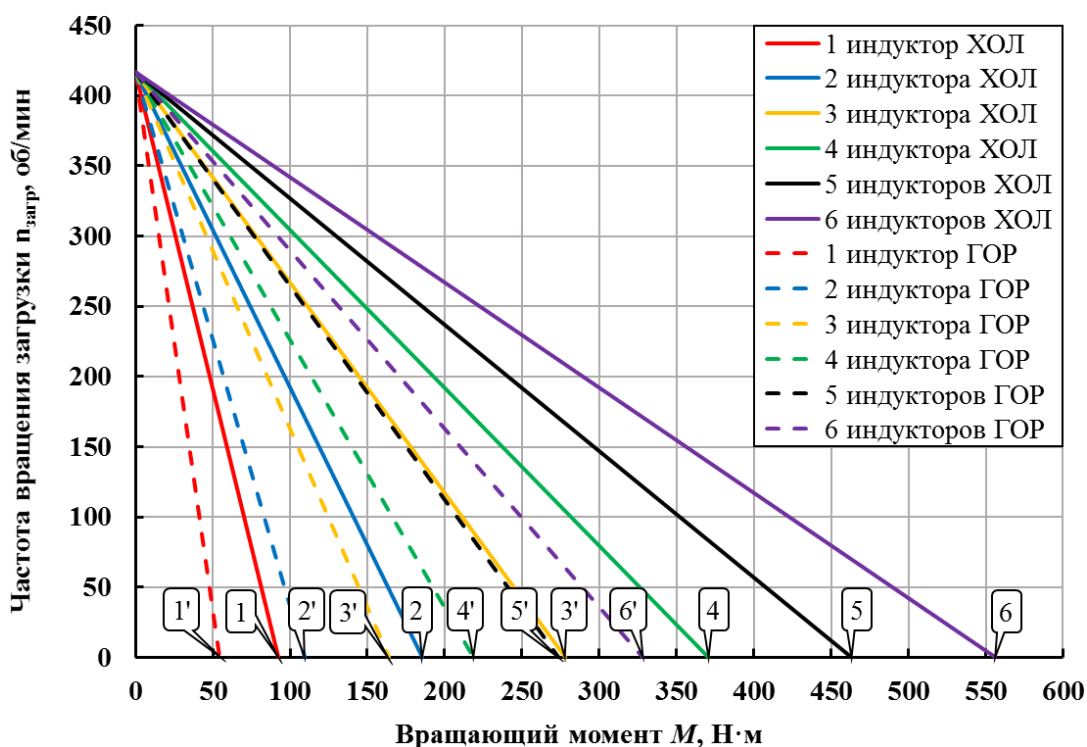


Рис. 4. Зависимость частоты вращения загрузки от вращающего момента M (б) при различном количестве согласно включенных индукторов с БЭМП на холодной и горячей стадии нагрева

Проведено технико-экономическое сравнение предварительного нагрева вала прокатного стана «Дуо-Кварто» (длина вала – 2725 мм, диаметр бочки вала – 550 мм) с помощью газовой печи шахтного типа ПГТ 20.10.50/11Ш, электропечи сопротивления с выдвижным подом ПВП 10.30.10/12,5М, а также с использованием энергоэффективного индукционного устройства с БЭМП (таблица 1). Выбор оборудования для нагрева производился исходя из массогабаритных размеров вала. По результатам проведенного технико-экономического сравнения в расчёте на нагрев одного вала установлено, что нагрев при помощи энергоэффективного индукционного устройства с БЭМП позволяет сократить время нагрева на 18 % по сравнению с нагревом в печи сопротивления и на 13 % по сравнению с нагревом в газовой печи. По количеству потребленных энергоресурсов на предварительный нагрев одного вала энергоэффективное индукционное устройство с БЭМП требует на 52 %

меньше энергоресурсов по сравнению с нагревом в печи сопротивления и на 42 % меньше по сравнению с нагревом в газовой печи.

Таблица 1

Технико-экономическое сравнение в расчёте на нагрев одного вала

Вид нагрева Показатель	Нагрев в газовой печи ПГТ 20.10.50/11Ш	Нагрев в электропечи ПВП 10.30.10/12,5М	Нагрев при помощи энергоэффективного индукционного устройства с БЭМП
Мощность, кВт	160	150	112,6
Время нагрева до заданной температуры, с	7658	8169	5900
Потребление энергоресурсов, т.у.т.	$98,1 \cdot 10^{-3}$	$117,3 \cdot 10^{-3}$	$63,4 \cdot 10^{-3}$

Таким образом, оптимальным способом по совокупности рассматриваемых показателей является индукционный нагрев при помощи энергоэффективного индукционного устройства с БЭМП, который позволяет осуществлять предварительный нагрев вала в закалочной установке без использования дополнительных нагревательных устройств, таких как газовые и электропечи, применение которых требует значительных капитальных вложений, обеспечивая при этом его вращение с заданной частотой, что повышает энергоэффективность в целом.

Источники

1. Коняев, А.Ю. Особенности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями / А. Ю. Коняев, С. Л. Назаров // Электротехника. – 2013. – № 3. – С. 61-66.
2. Угольников, А.В., Горелова, А.Е. Использование эффекта бегущего магнитного поля при обезвоживании ферромагнитных пульп / А.В. Угольников, А.Е. Горелова // Фундаментальные исследования – 2017. – № 5. – С. 83-87.
3. Патент 2257017 РФ, М. Кл. H05B6/34. Индукционное устройство для нагрева и перемешивания жидких сред / Кувалдин А.Б., Качанов Н.А., Качанов А.Н.; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский

энергетический институт (технический университет) (ГОУВПО «МЭИ)(ТУ)» – №2002134670/09; заявл. 10.07.2004; опубл. 20.07.2005, Бюл. №20 – 5 с.

4. Патент Республики Казахстан № 7227 «Сушилка для шпона и длинномерных волокнистых материалов». / Качанов А.Н., Чукумов М.Н., Королева Т.Г., Качанов Н.А., Иващенко В.В. // Национальное патентное ведомство Республики Казахстан, 15.02.1999, бюл. №2.

5. Демидович В.Б. Индукторы для закалки валков прокатных станов / В.Б. Демидович, Ю.Ю. Перевалов // Электричество. – 2019. – №3. – С. 65–70.

6. Гедеон, М.В. Термическая обработка валков холодной прокатки / М.В. Гедеон, Г.П. Соболев, И.В. Паисов. – М.: Металлургия, 1973. – 344 с.

7. Вафин, Р.К. Прочность термообрабатываемых прокатных валков / Р.К. Вафин, А.М. Покровский, В.Г. Лешковцев. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 264 с.

8. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя // СПб.: ООО «ТОР», 2021.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЛЭП 6-10 кВ С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ И ПИТАЮЩЕЙ ЕЕ СЕТИ ПОСРЕДСТВОМ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Чернышов В.А.¹, Астафьев Н.А.², Коренков Д.А.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

¹blackseam78@mail.ru, ²astafiev.nikita@yandex.ru, ³dimas.corenkov@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования способа гальванического разделения воздушной электрической сети (ВЭС) 6-10 кВ и питающейся от нее линии электропередачи (ЛЭП), имеющей однофазное замыкание на землю (ОЗНЗ), выполненные с использованием возможностей лабораторного стенда Галсен. Разработанный способ обеспечивает устранение перенапряжений в ВЭС 6-10 кВ с ОЗНЗ, достигаемое автоматическим переводом питающейся от нее ЛЭП на работу через высоковольтный разделительный трансформатор. В ходе лабораторных исследований разработанного схемотехнического решения, было установлено, что в процессе автоматического замыкания нормально разомкнутых контактов четырехполюсного коммутационного аппарата, коммутирующих соединение первичной и вторичной обмоток разделительного трансформатора по схеме «звезда», в момент размыкания нормально замкнутых контактов трехполюсного коммутационного аппарата, пофазно разшунтирующих его входные и выходные выводы, в ЛЭП 6-10 кВ наблюдается кратковременное исчезновение напряжения, что может негативно повлиять на жизнедеятельность ее потребителей. Кроме этого, установлено, что задействование четырехполюсного коммутационного аппарата, оснащенного автоматической системой дистанционного управления, значительно снижает надежность работы данного способа и потребует существенных капитальных вложений при его реализации и последующей эксплуатации, что может ограничивать перспективы его массового внедрения. В целях повышения эффективности функционирования разработанного способа и его инвестиционной привлекательности, было принято решение отказаться от использования четырехполюсного коммутационного аппарата и производить шунтирование и разшунтирование входных и выходных выводов разделительного трансформатора при глухом подключении его первичной и вторичной обмоток по схеме «звезда».

Ключевые слова: воздушная электрическая сеть 6-10 кВ с изолированной нейтралью, воздушная линия электропередачи 6-10 кВ, однофазное замыкание на землю, ограничение перенапряжений, разделительный трансформатор, технико-экономическое обоснование.

LABORATORY STUDY OF THE METHOD OF GALVANIC SEPARATION OF 6-10 kV POWER TRANSMISSION LINES WITH SINGLE-PHASE EARTH FAULT AND THE NETWORK FEEDING THEM THROUGH AN ISOLATING TRANSFORMER

Chernyshov V.A.¹, Astafyev N.A.², Korenkov D.A.³

^{1,2,3} OSU named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

¹blackseam78@mail.ru ²astafiev.nikita@yandex.ru, ³dimas.corenkov@yandex.ru

The article presents the results of a study on the method of galvanic separation of a 6-10 kV air electrical network (AEN) and the power transmission line (PTL) fed from it, which has a single-phase earth fault (SPEF), conducted using the capabilities of the Galsen laboratory stand. The developed method ensures the elimination of overvoltages in the 6-10 kV AEN with SPEF, achieved by automatically switching the PTL to operate through a high-voltage isolating transformer. During laboratory studies of the proposed circuit solution, it was established that during the automatic closure of normally open contacts of a four-pole switching device, which connects the primary and secondary windings of the isolating transformer in a "star" configuration, a brief disappearance of voltage is observed in the 6-10 kV PTL at the moment of opening normally closed contacts of a three-pole switching device, which shunts its input and output terminals phase by phase. This can negatively affect the operation of its consumers. Additionally, it was found that the use of a four-pole switching device equipped with an automatic remote control system significantly reduces the reliability of this method and would require substantial capital investments for its implementation and subsequent operation, which may limit its prospects for mass adoption. To improve the efficiency of the developed method and its investment attractiveness, it was decided to abandon the use of the four-pole switching device and to carry out shunting and unshunting of the input and output terminals of the isolating transformer while directly connecting its primary and secondary windings in a "star" configuration.

Keywords: 6-10 kV air electrical network with isolated neutral, 6-10 kV overhead power line, single-phase earth fault, overvoltage limitation, isolating transformer, technical and economic justification.

В ходе выполнения инициативной НИР на тему «Оптимизация процессов проектирования и функционирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения потребителей» [1], утвержденной приказом ректора ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» № 1409 от 01.12.2022, магистрантами и сотрудниками кафедры электрооборудования и энергосбережения был разработан способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети

с изолированной нейтралью [2]. Принципиальная электрическая схема реализации данного способа представлена на рисунке 1.

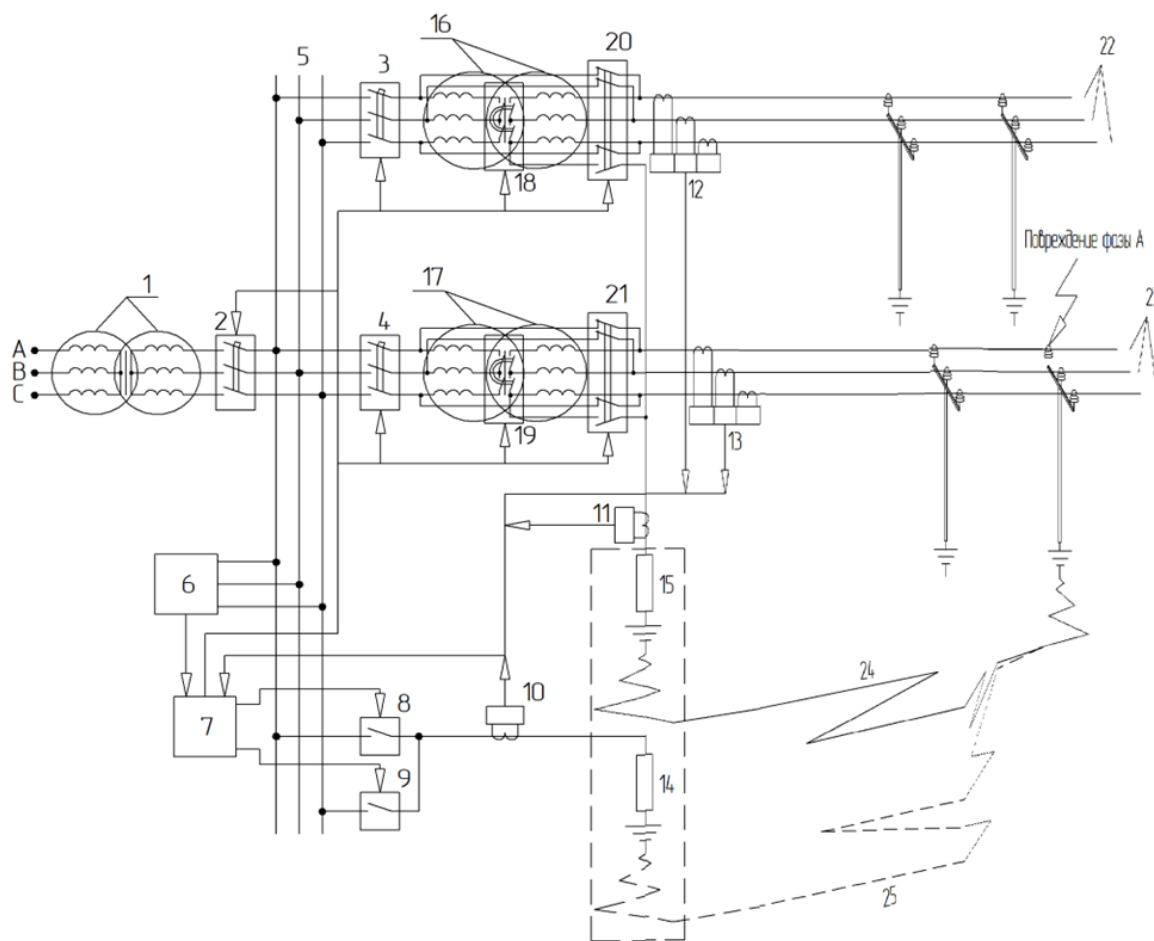


Рис. 1. Принципиальная схема способа автоматического устранения перенапряжения при ОЗНЗ в ВЭС 6-10 кВ с изолированной нейтралью

Схема содержит: трансформатор 1; аппараты автоматической защиты 2 – 4; шинопровод 5; устройство неселективного контроля изоляции 6; блок автоматического управления 7; однофазные выключатели 8 и 9; датчики тока 10 – 13; низкоомный резистор 14; высокоомный резистор 15; разделительные трансформаторы 16 и 17; коммутационные аппараты 18 и 19 с нормально разомкнутыми контактами; коммутационные аппараты 20 и 21 с нормально замкнутыми контактами; ЛЭП 22 и 23; путь 24 протекания тока ОЗНЗ при высокоомном резистивном замыкании нейтрали высокоомного резистора 15; путь 25 кратковременного протекания тока при ДЗНЗ через низкоомный резистор 14.

Идея способа заключается в автоматическом подключении ЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ к сети через высоковольтный разделительный трансформатор и

автоматической коммутации его первичной и вторичной обмоток по схеме Y/Y (рисунок 2).

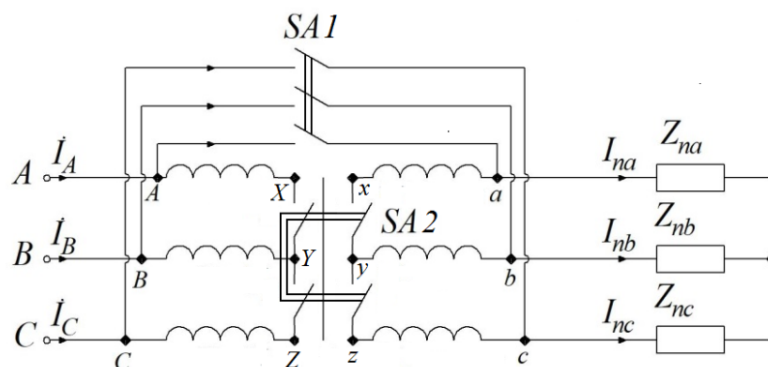


Рис. 2. Принципиальная схема включения силового разделительного трансформатора согласно разработанному способу [5]

В штатном режиме работы ЛЭП 6-10 кВ входные и выходные выводы первичной и вторичной обмоток высоковольтного разделительного трансформатора зашунтированы (пофазно) посредством 3-х размыкающих контактов дистанционно управляемого коммутационного аппарата SA1, а выводы первичной и вторичной обмоток, соединяемые по схеме соединения «звезда» отделены друг от друга посредством 4-х замыкающих контактов коммутационного аппарата SA2. В случае возникновения в ЛЭП 6-10 кВ ОЗНЗ контакты коммутационного аппарата SA1 автоматически размыкаются, а контакты коммутационного аппарата SA2, соответственно замыкаются. И хотя подключение ЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ к сети через высоковольтный разделительный трансформатор не обеспечивает защиту ее неповрежденных фаз от воздействия перенапряжения, изоляция неповрежденных фаз гальванически не связанной с ней ВЭС 6-10 кВ будет продолжать свою работу в штатном режиме. Разработанный способ уменьшает вероятность возникновения ДЗНЗ, так как теперь, они, вероятнее всего, могут развиваться на ЛЭП 6-10 кВ, продолжающей работать с ОЗНЗ. Способ обеспечивает повышение надежности работы ВЭС 6-10 кВ и бесперебойности электроснабжения ее потребителей.

Приняв ряд допущений, необходимых для реализации данного способа в лабораторных условиях, с учетом функциональных возможностей, имеющихся у лабораторного стенда Галсен [3, 4], авторами была разработана принципиальная электрическая схема, представленная на рисунке 3. При разработке схемы, имитирующей гальваническое разделение ЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ и питающей её ВЭС посредством высоковольтного разделительного трансформатора, были приняты следующие допущения:

1) ОЗНЗ происходит только на одной ЛЭП 6-10 кВ, моделируемой линией напряжением 380 В, нагрузка которой имитируется глухо подключенным к ней асинхронным короткозамкнутым электродвигателем.

2) процесс кратковременного формирования броска тока искусственного ДЗНЗ, формируемого однофазным выключателем 8 и 9 по команде устройства 6 неселективного контроля изоляции, фиксирующего наличие в ВЭС 6-10 кВ ОЗНЗ, имитируется в ручном режиме путем кратковременного нажатия кнопки SB и соответственно кратковременным свечением светосигнального индикатора Л1.

3) Работу блока управления 7 имитируют магнитные пускатели К1-К5, замыкающие контакты которых после нажатия кнопки SB формируют схему соединения «звезда» для первичной и вторичной обмоток высоковольтного трансформатора, а размыкающие контакты отключают ЛЭП 6-10 кВ от ВЭС 6-10 кВ, при этом ЛЭП 6-10 кВ подключается к ней через высоковольтный разделительный трансформатор.

4) Сигнал о возникновении на линии устойчивого ОЗНЗ, формируемый устройством неселективного контроля изоляции 6, имитирует светосигнальный индикатор Л2.

5) Светосигнальные индикаторы Л2 и Л3 имитируют контрольные функции блока управления 7, сигнализируя о работе линии соответственно через разделительный трансформатор (при ОЗНЗ) или в обход него (при отсутствии ОЗНЗ).

6) Мультиметры, не показанные на схеме (рис. 3), но представленные на фотографии (рис. 4) внешнего вида экспериментальной установки, собранной на базе лабораторного стенда «Галсен», имитируют выполнение контрольных функций блока управления 7.

Перечень блоков лабораторного стенда Галсен [3, 4], задействованных при реализации принципиальной электрической схемы, обеспечивающей гальваническое разделение ЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ и питающей ее сети посредством разделительного трансформатора представлен в таблице 1, а монтажно-коммутационная схема их соединения на рисунке 4.

Физическое моделирование и последующий анализ принятого схемотехнического решения позволили установить несколько аспектов, ограничивающих потенциальные возможности предлагаемого способа.

1. Установлено, что автоматическое асинхронное замыкание контактов 4-х полюсного коммутационного аппарата SA2, при реализации автоматического размыкания контактов 3-х полюсного коммутационного аппарата SA1, инициирует кратковременное исчезновение напряжения в ЛЭП 6-10 кВ, что может иметь для потребителей негативные последствия.

2. Применение 4-х полюсного коммутационного аппарата SA2, оснащенного автоматической системой дистанционного управления, в случае реализации разработанного способа потребуют существенных капитальных вложений и эксплуатационных издержек, что может ограничивать перспективы его массового внедрения.

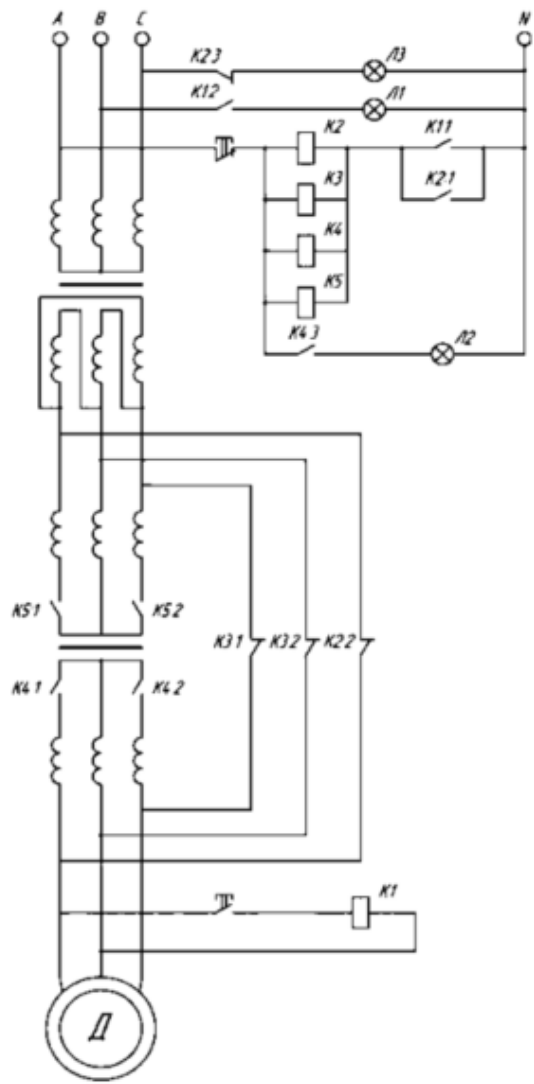


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема включения силового разделительного трансформатора согласно разработанному способу

Таблица 1

Перечень блоков лабораторного стенда Галсен, задействованных при реализации схмотехнического решения, представленного на рис. 3

№	Кол-во	Наименование
201.4	1	Трехфазный источник питания

333.2	1	Преобразовательный трансформатор 320 В·А
303	1	Модель участка электрической сети 380 В / 0,5 А
360	1	Автоматический трехполюсный выключатель 230/440 В / 10 А
364	4	Магнитный пускатель 660 В / 4 А 380 В / 10 А
310	1	Модель замыкания на землю 380 В / 0,5 А
106	1	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
359	1	Автоматический однополюсный выключатель 230 В / 0,5 А
3350	1	Трехфазный двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения 80 ВА, 380 В / 220 В
364	1	Блок мультиметров
370	1	Промежуточное реле 220 В / 50 Гц
355.1	1	Блок световой сигнализации
354.1	1	Кнопочный пост управления

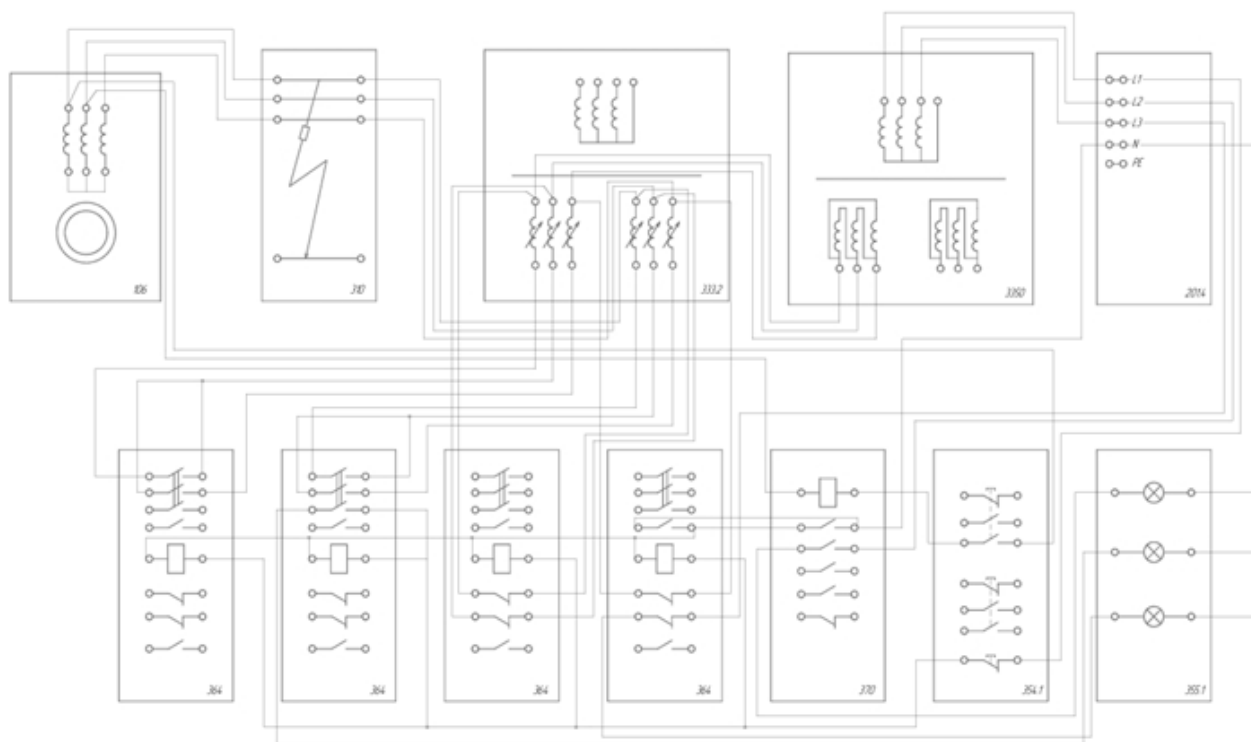


Рис. 4. Монтажно-коммутационная схема соединений лабораторных блоков Галсен, выполненная согласно разработанному схемотехническому решению (см. рис. 3)

В целях повышения эффективности функционирования разработанного способа и его инвестиционной привлекательности, было принято решение исключить из схемы коммутационный аппарат SA2 и осуществлять (пофазно) шунтирование внешних выводов первичной и вторичной обмоток разделительного трансформатора при глухом подключении выводов его первичной и вторичной обмоток по схеме соединения «звезда» (рис. 6).

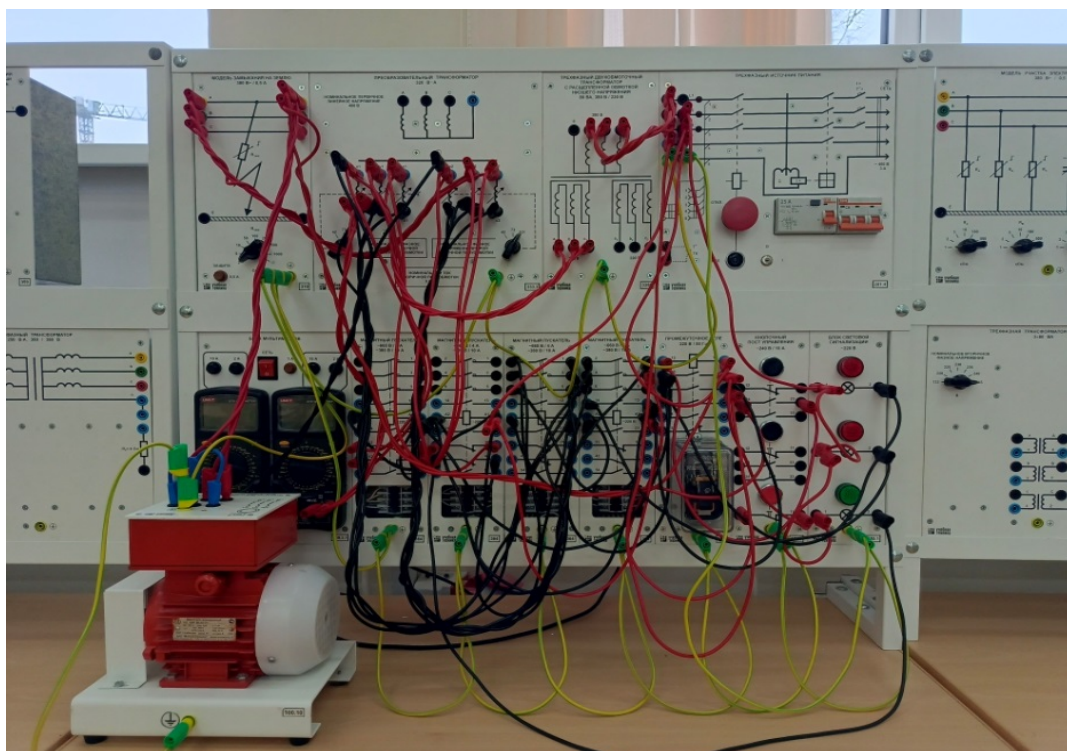


Рис. 5. Внешний вид экспериментальной установки, собранной на лабораторном стенде «Галсен»

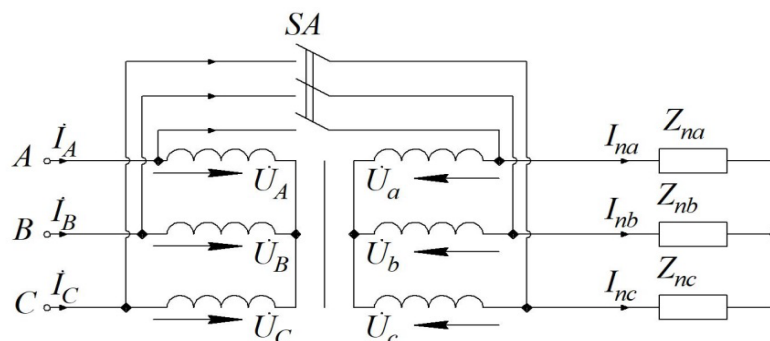


Рис. 6. Принципиальная схема включения силового разделительного трансформатора согласно при глухом соединении его первичной и вторичной обмоток по схеме «звезда»

Разработанный метод, основанный на использовании высоковольтного разделительного трансформатора, позволяет эффективно устранять перенапряжения и поддерживать стабильную работу системы. Тем не менее, выявленные недостатки, такие как кратковременное исчезновение напряжения и необходимость значительных капитальных вложений, требуют дальнейшего анализа и оптимизации. Отказ от сложных коммутационных аппаратов в пользу более простых решений может повысить инвестиционную привлекательность

предложенного метода. Настоящее исследование открывает новые горизонты для практического применения в области электротехники и создает основу для будущих разработок и улучшений в системах электроснабжения [5].

Источники

1. Инициативная НИР. Оптимизация процессов проектирования и функционирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения потребителей". – утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» № 1409 от 01.12.2022.

2. Патент № 2798464 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16. Способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью: № 2022133602: заявл. 20.12.2022: опубл. 23.06.2023 / А.Н. Качанов, В. А. Чернышов, А.С. Даровых, Г.В. Лукьянов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева".

3. Карпеш, М.А., Сенигов, П.Н. Электрические станции и подстанции. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭСиП.001 РБЭ (998.1). - Челябинск: Иженерно-производственный центр «Учебная техника», 2012. - 155 с.

4. Сенигов, П.Н. Режимы нейтрали и заземляющие устройства в электрических установках. Руководство по выполнению базовых экспериментов. РНЗУЭУ.001 РБЭ (999) - Челябинск: ИПЦ «Учебная техника», 2012. - 57 с.

5. Качанов, А. Н. К вопросу оценки эффективности функционирования воздушных электрических сетей напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью / А. Н. Качанов, В. А. Чернышов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 11. – С. 24-29.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.316.726: 536.5

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОНСТРУКЦИЮ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРАТОРА

Алиева Т.Р.¹, Гаджибалаев Н.М.²
^{1,2} СГУ, г. Сумгаит, Республика Азербайджан
aliyevaturkan679@gmail.com

В статье предложена транспортировка, ориентация, смешивание, позиционирование, ускорение и т. д. Применение вибрационных устройств в составе инструментов и устройств, обеспечивающих технологические процессы, такие как: Влияние температуры играет важную роль в проектировании низкочастотных электромагнитных виброприводов. Этот эффект важен как с точки зрения изменения физических свойств материалов, так и с точки зрения поддержания общей производительности устройства [1]. С повышением температуры модуль упругости материалов уменьшается, что может привести к изменению резонансно частоты. Для длительной и стабильной работы электромагнитных вибраторов необходимо проектировать систему отвода тепла и охлаждения (пассивную или активную). Могут быть добавлены системы воздушного или водяного охлаждения, что особенно важно в системах, работающих с высоким напряжением и током [2].

Ключевые слова: Изоляционные материалы, рассеивание тепла, тепловое охлаждение, моделирование и имитация активных систем охлаждения.

ON THE DESIGN OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC VIBRATOR CURRENT STATE OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE

Aliyeva T.R.¹, Hajibalaev N.M.²
^{1,2} SGU, Sumgait, Republic of Azerbaijan
aliyevaturkan679@gmail.com

Transportation, orientation, mixing, positioning, acceleration, etc. Application of vibration devices as part of tools and devices that provide technological processes, such as: The influence of temperature plays an important role in the design of low-frequency electromagnetic vibration drives. This effect is important both in terms of changing the physical properties of materials and in terms of maintaining the overall performance of the device [1]. As the

temperature increases, the elastic modulus of the materials decreases, which can lead to a change in the resonant frequency. For long-term and stable operation of electromagnetic vibrators, it is necessary to design a heat removal and cooling system (passive or active). Air or water cooling systems can be added which is especially important in systems operating with high voltage and current [2].

Keywords: Insulation materials, heat dissipation, thermal cooling, active cooling systems modeling and simulation

Влияние температуры считается важной инженерной проблемой при проектировании виброприводов электромагнитного типа. Этот эффект влияет как на срок службы компонентов, так и на общую производительность системы [3]. Рассмотрим этот вопрос в основных аспектах:

1. Влияние температуры на производительность электромагнитных систем. С повышением температуры увеличивается электрическое сопротивление меди или других проводящих материалов, используемых в обмотке. Это приводит к потере тока и рассеиванию тепла. Длительное воздействие высоких температур может привести к снижению амплитуды вибрации, поскольку электромагнитная сила падает. Уровень насыщения и магнитная проницаемость ферромагнитных сердечников, используемых в электромагнитах, изменяются в зависимости от температуры. Это может вызвать изменение электромагнитной силы.

2. Влияние на выбор материала. Изоляционные материалы могут разрушаться при повышении температуры. Это может привести к короткому замыканию обмоток и выходу устройства из строя. Гистерезис и потери на вихревые токи в сердечниках увеличиваются с температурой. Поэтому следует выбирать материалы, устойчивые к высоким температурам (например, пермаллой, феррит и т. д.).

3. Резонанс и механическое поведение. Повышение температуры влияет на модуль упругости материалов. Это вызывает изменение механической резонансной частоты вибратора. С повышением температуры увеличивается гашение вибраций, что отрицательно влияет на эффективность.

4. Тепловая безопасность и охлаждение. Температура контролируется датчиками, и устройство автоматически останавливается в случае возникновения опасности.

5. Моделирование и имитация. Современное проектирование использует комбинированные термо-электромагнитно-механические модели (мультифизическое моделирование). COMSOL Multiphysics, ANSYS и т. д. С помощью этих программ можно одновременно моделировать электромагнитное поле, температуру и механическую вибрацию [4]. Как

известно, отчет вибратора электромагнитного типа с заданной конструкцией включает конструктивные размеры, данные обмоток, ток, частоту, усилие и т.д. Такие вопросы, как выбор активных, изоляционных и конструкционных материалов для получения параметров, являющихся показателями качества отчета, нахождение параметров, обеспечивающих характеристики его необходимых режимов работы и получение высоких технико-экономических показателей и т.д.[5].

Если при проектировании виброударников электромагнитного типа не учитывать температурный фактор, сокращается срок службы устройства, снижается эффективность, увеличивается риск внезапного отказа. По этой причине решающее значение имеют управление тепловым режимом, выбор материалов и тепловое моделирование.

Источники

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной техники, Часть 1, Теоретические основы вибрационной техники, М., 1993.
2. Бабичев А.П. Основы вибрационной техники, часть 2. Технология вибрационной обработки, М., 1994.
3. Мамедов Ф.И., Гусейнов Р.А., Мамедов Д.Ф. Однотактный электромагнитный вибратор. Публикация сведений о заявках на изобретения. Официальный бюллетень промышленной собственности, 1999.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ОТ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Новрузова Х.И.¹, Мамедзаде Р.К.²

^{1,2} СГУ, г. Сумгаит, Республика Азербайджан

novruzovahazare75@gmail.com

В статье предложена защита энергетических объектов приобретает особое значение в условиях стремительного развития современных технологий. Это особенно актуально в контексте защиты от предельных напряжений, которые могут представлять угрозу устойчивости энергетических сетей и приводить к значительным материальным убыткам. Электрические линии, трансформаторы и другие элементы инфраструктуры чувствительны к высоким напряжениям, поэтому их защита важна не только с технологической, но и с экономической и экологической точки зрения.

Развитие технологий защиты от перенапряжений охватывает новые подходы, направленные на повышение надежности и устойчивости энергетических объектов. С этой целью усиливаются средства защиты, обеспечивая соответствие энергетических систем современным стандартам.

Ключевые слова: энергетические объекты, перенапряжение, высокое напряжение, средства защиты, устойчивость.

PROTECTION OF ENERGY FACILITIES: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF OVERVOLTAGE PROTECTION TECHNOLOGIES

Novruzova H.I.¹, Mammadzadeh R.K.²

^{1,2} SGU, Sumgait, Republic of Azerbaijan

novruzovahazare8@gmail.com

The article proposes a Protection of energy facilities, in parallel with the development of modern technologies, is of great importance. This especially includes issues of protection against overvoltages, since high voltages can threaten the stability of energy networks and cause significant material damage. Power lines, transformers and other energy infrastructure elements are sensitive to high voltages, therefore their protection is very important not only from a technological point of view, but also from an economic and environmental point of view. The development of overvoltage protection technologies includes new approaches aimed at increasing the reliability and stability of energy facilities. To this end, protection means are strengthened and protection of the network and energy systems in accordance with modern standards is ensured.

Keywords:Energy facilities, protection technologies, overvoltages, protection systems, energy network

Защита энергетических объектов является одной из актуальных задач современности. Быстрое развитие производства и распределения электроэнергии требует совершенствования защитных систем для обеспечения безопасности этих объектов. Надежное электроснабжение имеет большое значение как для экономики, так и для населения. С этой точки зрения, защита энергетических объектов не только повышает устойчивость инфраструктуры, но и способствует обеспечению социального благополучия и охране окружающей среды. Вопросы безопасности энергетических объектов особенно актуальны при высоких напряжениях и в аварийных ситуациях. Поэтому современные технологии и оборудование, такие как электростатическая защита, автоматические защитные устройства и системы динамического мониторинга давления, играют важную роль в обеспечении безопасности этих объектов. Эти технологии устраняют неисправности в энергетических сетях и обеспечивают стабильность системы. Эффективность защитных систем обеспечивается не только правильной установкой оборудования, но и профессиональной подготовкой персонала, а также применением грамотных стратегий управления. Для предотвращения утечек тока применяются передовые системы мониторинга и защиты, что повышает надежность и безопасность энергосетей. В данном исследовании рассматривается применение современных технологий в защите энергетических объектов, а также существующие решения для предотвращения утечек тока.

В заключение можно отметить, что совершенствование систем защиты на энергетических объектах приводит не только к повышению надежности электроснабжения, но и к положительным социально-экономическим результатам. Исследования и выводы данной работы обеспечат внедрение новых подходов к развитию энергетических систем и решение существующих проблем.

Источники

1. Marzband, M., Azarinejadian, F., Savaghebi, M., Pouresmaeil, E., Guerrero, J. M., Lightbody, G. The concept of intelligent transactional energy in networked microgrids with independent and coalition operation. *Renewable Energy*, (2018). № 126, pp. 95 – 106.
2. Bilgin, E., Caramanis, M. C., Paschalidis, I. C., Cassandra, C. G. Provision of regulatory services by smart buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, (2016). № 7(4), pp.1683–1693.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ: УСТОЙЧИВЫЙ ПОДХОД К ПРОМЫШЛЕННЫМ И БЫТОВЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ

Павра К.К.

МКБУ, Бхавнагар, Гуджарат, Индия.

В этой статье рассматривается, как современные технологии способствуют повышению энергоэффективности как промышленных, так и бытовых электрических сетей. В условиях глобальной озабоченности по поводу потребления энергии, углеродного следа и изменения климата энергоэффективность является не только технической необходимостью, но и моральным и экологическим императивом. В отчете рассматриваются устойчивые практики, интеллектуальные сети, автоматизация и интеграция возобновляемых источников энергии, которые в совокупности обеспечивают надежное, безопасное и экономически выгодное использование энергии. Практические примеры и анализ на основе данных показывают, как интеграция технологий в повседневное использование и промышленные структуры может привести к ощутимой экономии и экологическим выгодам.

Ключевые слова: Энергоэффективность, интеллектуальная сеть, возобновляемые источники энергии, индустрия 4.0, Устойчивое развитие, интернет вещей, умный дом, EMS, энергосбережение, изменение климата

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY THROUGH MODERN TECHNOLOGIES: A SUSTAINABLE APPROACH FOR INDUSTRIAL AND DOMESTIC ELECTRICAL NETWORKS

Pavra K.K.

MKBU, Bhavnagar, Gujarat, India.

This report explores how modern technologies contribute to enhancing energy efficiency in both industrial and domestic electrical networks. With global concerns about energy consumption, carbon footprints, and climate change, energy efficiency is not only a technical necessity but also a moral and environmental imperative. The report investigates sustainable practices, smart grids, automation, and renewable integrations that together ensure reliable, safe, and economically viable energy use. Real-world case studies and data-driven analysis emphasize how integrating technology into daily usage patterns and industrial frameworks can result in measurable savings and environmental benefits.

Keywords: Energy Efficiency, Smart Grid, Renewable Energy, Industry 4.0, Sustainability, IoT, Smart Home, EMS, Power Saving, Climate Change

The rise of global industrialization and urbanization has exponentially increased energy demand. Traditional energy systems, though foundational, often lead to significant losses in transmission, distribution, and consumption. Modern technologies offer solutions that can transform energy consumption habits, reduce wastage, and promote sustainable living. This report aims to analyze these technologies and propose a roadmap for their widespread implementation in both industrial and domestic sectors.

Energy efficiency reduces the cost of energy services, decreases environmental impact, and enhances energy security. It leads to:

- Lower electricity bills
- Reduced greenhouse gas emissions
- Extended lifespan of appliances and machines
- Decreased dependency on fossil fuels

Smart grids utilize digital communication to detect and react to local changes in usage. Benefits include demand response, real-time monitoring, and efficient load distribution. Industrial automation using sensors and Internet of Things (IoT) devices ensures processes operate only when required. Predictive maintenance and smart control systems optimize energy usage. EMS allows industries to track and manage energy performance, leading to targeted actions for energy saving. Replacements of conventional motors with energy-efficient alternatives significantly reduce electricity use in manufacturing and production.

Smart meters provide real-time data on electricity consumption, allowing users to understand and modify usage patterns. Replacing traditional bulbs with LED lighting reduces energy consumption by up to 80%. Smart thermostats, timers, and connected appliances reduce standby consumption and ensure optimal energy usage.

Domestic renewable energy sources help reduce dependence on grid electricity and promote cleaner energy usage. Investing in modern energy-efficient technologies has an upfront cost but leads to significant long-term savings. Governments and organizations are offering subsidies, tax rebates, and low-interest loans to encourage adoption.

In Gujarat, several industries have adopted energy-efficient motors, solar rooftops, and smart control systems. As a result, power consumption decreased by 12% over three years, contributing to both cost savings and emission reductions.

Modern technologies are pivotal in reshaping energy consumption patterns across sectors. By integrating smart solutions and renewable sources into industrial and domestic networks, we can pave the way for a sustainable and energy-secure

future. Stakeholder collaboration, supportive policies, and community awareness are key to success.

КОНСТРУКТИВНАЯ СТРУКТУРА И РАСЧЕТ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО МОДУЛЯ РТК

Ахмедова Т.А.

СГУ, г. Сумгаит, Республика Азербайджан

tamilla.ahmedova@edu.sdu.az

В статье в производственном модуле создан информационно-измерительный преобразователь технологического оборудования РТК. Созданный датчик используется для определения малых перемещений в качестве исходного элемента информационно-измерительной системы РТК. Рассчитана и охарактеризована магнитная система датчика.

Ключевые слова: электромагнитный датчик, датчик расстояния, магнитная система, автогенератор, технологический процесс.

CONSTRUCTIVE STRUCTURE AND CALCULATION OF THE INFORMATION-MEASURING TRANSDUCER OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF THE PRODUCTION MODULE OF AN RTC

Ahmedova T.A.

SGU, Sumgayit, Republic of Azerbaijan

tamilla.ahmedova@edu.sdu.az

In this article, an information-measuring transducer for the technological equipment of an RTC production module was developed. The created sensor is used for detecting small displacements and serves as the primary element of the RTC's information-measuring system. The magnetic system of the sensor was calculated and characterized.

Keywords: electromagnetic sensor, distance sensor, magnetic system, autogenerator, technological process.

Индуктивные датчики расстояния широко используются для систематического контроля технологического процесса на производстве и одновременно для измерения многих параметров. С их помощью дефекты, возникающие при подготовке отдельных технологических операций и оборудования, легко выявляются и передаются в информационно-измерительную и управляющую систему, посредством которой выполняются операции по повышению качества и точности измерений [1].

С этой целью был создан индуктивный датчик для определения местоположения металлопродукции с небольшого расстояния в технологических линиях и РТК. Индуктивность генерируемого передатчика основана на том, что она меняется в зависимости от места расположения изделия.

Данные о малых перемещения используются в качестве основного элемента информационно-измерительные системы прокатного стана. Такой датчик является твердотельным и состоит из индукционной катушки намотанной на сердечник. Принцип работы данного датчика следующий.

При изменении толщины продукта, поступающего между валами прокатного стана, изменяется магнитное сопротивление воздушного зазора между подвижной частью и неподвижной частью преобразователя [4]. Электрическая схема передатчика дифференциальная. Принцип его работы такой же, как у дифференциального трансформатора.

Магнитная система передатчика (рис. 1) состоит из 1- сердечника, 2- внутренней части сердечника, 3- подвижной части сердечника, 4- головки, удерживающей пружину, 5- пружины, 6- вала, 7 рамы, удерживающей вал в движении, 8, 9 обмоток, 10 среднего выступа сердечника, 11- посадочного места среднего сердечника, 12 верхней крышки сердечника, 13, 14-выходных петель. 15 состоит из нагара стрелы, сидящего в гнезде, 16 – из отверстия в среднем выступе, 17 – надреза, приданного сердечнику.

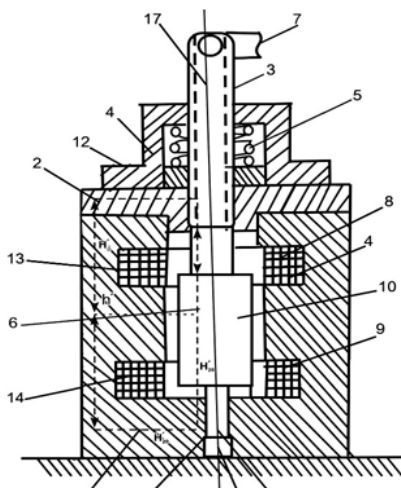


Рис.1 Поперечное сечение индуктивного датчика для измерения информации прокатного стана

Предположим, что замыкающие с сердечником магнитные силовые линии взяты в цилиндрической системе координат. В цилиндрической системе координат векторы напряжения магнитного поля направлены в направлении оси z , параллельно ей, и меняют свои значения по длине

сердечника. В этом случае напряжение магнитного поля состоит только из одного вектора, параллельного оси z (рис. 2).

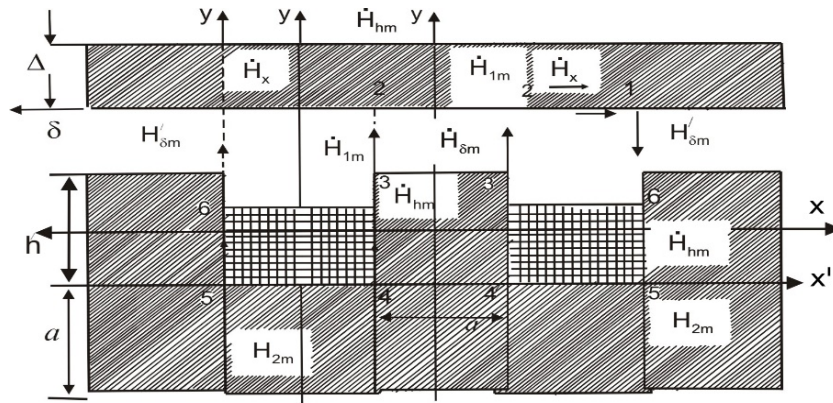


Рис.2 Поперечное сечение магнитной цепи датчика

Таким образом уравнение магнитного поля записывается так

$$\frac{d^2 \dot{H}_z}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{d\dot{H}_z}{dz} - \frac{d^2 \dot{H}_z}{dz^2} = k^2 \dot{H}_z \quad (1)$$

Здесь

$$k = \sqrt{j\omega\gamma\mu\mu_0}$$

Обратите внимание, что

$$\frac{d \dot{H}_z}{dr} = 0; \quad \frac{d^2 \dot{H}_z}{dr^2} = 0 \quad (2)$$

напряженность магнитного поля в направлении оси Z практически недисперсионна. Следовательно, согласно уравнению (2), третий член в левой части уравнения (1) становится нулевым, и выражение (1) записывается следующим образом

$$\frac{d^2 \dot{H}_z}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{d\dot{H}_z}{dz} = k^2 \dot{H}_z$$

В последнем уравнении при $z \rightarrow \infty - a$ получается

$$\frac{d^2 \dot{H}_z}{dz^2} = k^2 \cdot \dot{H}_z$$

Это уравнение зависит от координаты r и его решение имеет вид

$$\dot{H}_z = A_1 e^{kr} + A_2 e^{-kr} \quad (3)$$

В полученном уравнении напряжённость $\dot{H}_z$ магнитного поля не может бесконечно увеличиваться в зависимости от r. Поэтому в (3) принимается $A_1 = 0$. В этом случае решение уравнения (3) выражается как

$$\dot{H}_z = A_2 e^{-kr}$$

Если начало координат взять внутри сердечника, тогда при $z=0$,

$$A_2 = \dot{H}_{z0} \text{ и}$$

$$\dot{H}_z = \dot{H}_{z0} e^{-kr}$$

(4) получится. Если применить частичное интегрирование к выражению

$$\Phi_z = \mu\mu_0 \int_0^\Delta \dot{H}_{z0} e^{-kr} 2\pi r dr = \mu\mu_0 \dot{H}_{z0} 2\pi \int_0^\Delta r e^{-kr} dr, \quad (4)$$

то получится,

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_z &= 2\pi\mu\mu_0 \dot{H}_{z0} \left[\frac{\Delta \cdot (1 - e^{-k\Delta})}{k} - \frac{1}{k^2} \cdot (1 - e^{-k\Delta}) \right] = \\ &= 2\pi\mu\mu_0 \dot{H}_{z0} \frac{\Delta(1 - e^{-k\Delta})}{k} \left[1 - \frac{1}{k} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Если здесь принимать следующие неравенства

$$\frac{1}{k} \ll 1, 1 \gg e^{-k\Delta}$$

и учитывать последние неравенства в выражении (5),

$$\dot{\Phi}_z' = \frac{2\pi\mu\mu_0 \dot{H}_{z0} \Delta}{k}$$

и выше указанную вычисления применять в нужную часть датчика, получится

$$\dot{\Phi}_z' = \frac{2\pi\mu\mu_0 H_{z0}' \Delta}{k}$$

Теперь 1-2-3-4-5-6-1 и 1'-2'-3'-4'-5'-6'-1' если применим полный закон тока к цепям получим

$$\begin{aligned} \dot{H}_{z0} \cdot h + \dot{H}_{\delta 1} \cdot \delta_1 + \dot{H}_x \cdot l_{65} + \dot{H}_x l_{12} &= iW_1 \\ \dot{H}_{z0}' \cdot h' + \dot{H}_{\delta 1}' \cdot \delta + \dot{H}_x' l_{6'5'} + \dot{H}_x' l_{1'2'} &= i'W_1'. \end{aligned} \quad (6)$$

В полученном выражении

$$h = h' = h_\Delta; l_{12} = l_{56} = l_0; l_{1'2'} = l_{5'6'} = l_0$$

предполагается. Учитывая вышеизложенное, выражение (6) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{H}_{z0} \cdot h + \dot{H}_{\delta 1} \cdot \delta_1 + 2\dot{H}_x \cdot l_0 &= iW \\ \dot{H}_{z0}' \cdot h + \dot{H}_{\delta 2}' \cdot \delta_2 + 2\dot{H}_x' l_0 &= i'W. \end{aligned} \quad (7)$$

По принципу непрерывности магнитного поля

$$\begin{aligned} \mu\mu_0 \cdot \dot{H}_{z0} &= \mu_0 \dot{H}_{\delta 1}; \dot{H}_{\delta 1} = \mu \dot{H}_{z0} \\ \mu\mu_0 \cdot \dot{H}_{z0}' &= \mu_0 \dot{H}_{\delta 2}'; \dot{H}_{\delta 2}' = \mu \dot{H}_{z0}'. \end{aligned}$$

Учитывая последнее выражение в (7), получим

$$\begin{aligned} \dot{H}_{z0} \cdot (h + \mu\delta_1) + 2\dot{H}_x \cdot l_0 &= iW \\ \dot{H}_{z0}' \cdot (h + \mu\delta_2) + 2\dot{H}_x' l_0 &= i'W. \end{aligned} \quad (8)$$

Если применить принцип непрерывности магнитного потока к выражению (8) получим неравенств

$$\begin{aligned} (h + \mu\delta_1) &\gg \frac{4\pi\Delta}{k} l_0 \\ (h + \mu\delta_2) &\gg \frac{4\pi\Delta}{k} l_0. \end{aligned}$$

Учитывая эти неравенства в (8), получим

$$\dot{H}_{z0} = \frac{iW}{h + \mu\delta_1},$$

$$\dot{H}_{z0}^I = \frac{iW}{h + \mu\delta_2}.$$

Магнитные потоки, соответствующие напряженностям магнитного поля

$$\dot{H}_{z0} \quad \text{и} \quad \dot{H}_{z0}^I$$

записываются как

$$\dot{\Phi}_{z0} = \mu\mu_0 \frac{2\pi\Delta}{k} \cdot \frac{iW}{h + \mu\delta_1},$$

$$\dot{\Phi}_{z0}^I = \mu\mu_0 \frac{2\pi\Delta}{k} \cdot \frac{iW}{h + \mu\delta_2}.$$

Полученное на выходе датчика э. д. с.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E} &= -j\omega W_2 (\dot{\Phi}_{z0}^I - \dot{\Phi}_{z0}) = -j\omega W_2 \mu\mu_0 \frac{2\pi\Delta}{k} \cdot iW \left[\frac{\mu(\delta_2 - \delta_1)}{(h + \mu\delta_1)(h + \mu\delta_2)} \right] = \\ &= -j\omega W_2 W \mu^2 \mu_0 \frac{2\pi\Delta}{k} \cdot \frac{i(\delta_2 - \delta_1)}{(h + \mu\delta_1)(h + \mu\delta_2)}. \end{aligned} \quad 9)$$

Примем, что

$$\delta_2 = \delta_0 + \Delta\delta$$

$$\delta_1 = \delta_0 - \Delta\delta$$

и

$$\delta_2 - \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta - \delta_0 + \Delta\delta = 2\Delta\delta.$$

Учитывая последнее выражение в (9) получится

$$\Delta \dot{E} = -j \frac{4\pi\mu^2 \mu_0 \Delta}{k} W_2 W \omega \frac{i\Delta\delta}{(h + \mu\delta_1)(h + \mu\delta_2)} = -jK_1 \cdot i\Delta\delta.$$

Здесь

$$K_1 = \frac{4\pi\mu^2 \mu_0 \Delta W W_2 \omega}{k (h + \mu\delta_1)(h + \mu\delta_2)}.$$

Если мы выразим $\dot{I}$ в терминах напряжения и сопротивления, получится

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\omega L}$$

$$\Delta \dot{E} = -jK_1 \frac{\dot{U}}{R + j\omega L} \cdot \Delta\delta.$$

Если определим модуль последнего выражения, получится

$$\Delta \dot{E} = K_{1m} \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L_m)^2}} \cdot \Delta\delta = K_{1m} \cdot \Delta\delta$$

$$K_{2m} = \frac{K_{1m} U}{\sqrt{R^2 + (\omega L_m)^2}}.$$

Следует отметить, что

$$\mu = 300, \mu_0 = 1,236 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}/\text{м}; \omega = 2\pi f = 314 \cdot 1/\text{сан}; \Delta = 2 \cdot 10^{-2}$$

$$k_m = \sqrt{\frac{\omega \mu \mu_0 \gamma}{2}} = 9,44; W_2 = 400; W = 600; U = 36\text{В}; h = 12\text{мм}; \delta_2 = 1,5\text{мм}; R = 100\text{Ом};$$

$$\omega L = 20\text{Ом}$$

На практике электромагнитные преобразователи широко используются для различных целей, в том числе для дистанционного определения наличия токопроводящих проводов и металлов в открытых и закрытых помещениях. Характеристики передатчика приведены на рис. 3.

Такие преобразователи состоят из магнитной системы, катушек индуктивности, включенных в колебательный контур LC-автогенератора и расположенных в магнитной системе, усилителей и переключателей, собранных на основе микроэлементов. Их магнитная система обычно коаксиально-цилиндрическая и выполнена в форме III.

Для повышения надежности дальномеров необходимо изготавливать сердечник их магнитной системы из цельной конструкционной стали.

Известно, что в случае ферромагнитного проводника с сердечником магнитный поток, проходящий через любое его сечение,

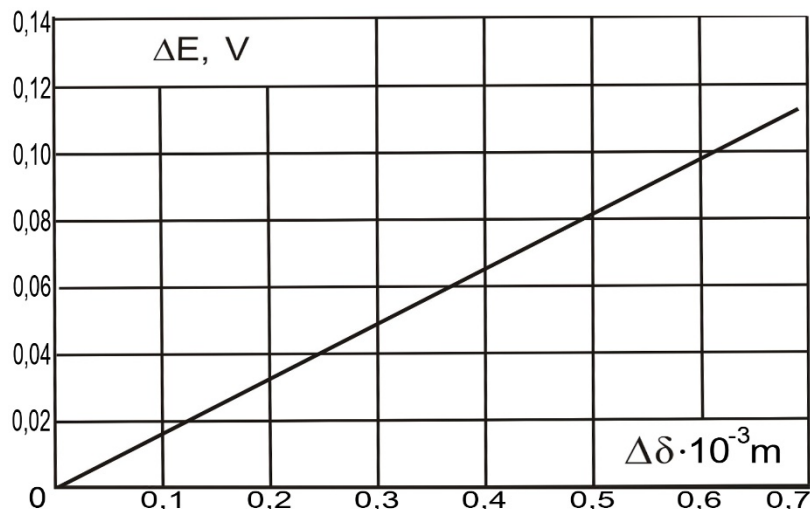


Рис 3. Характеристика, полученная на выходе датчика

распределяется неравномерно. Магнитный поток плотен внутри сердечника вблизи обмотки, по которой течет индуцированный ток, и плотность магнитного потока уменьшается по мере углубления в сердечник. Благодаря явлению поверхностного эффекта, с увеличением частоты наведенного тока активное сопротивление в сердечнике увеличивается, а индуктивность уменьшается.

Источники

1. Ахмедова, Т.А. LC-автогенераторные датчики для информационно-измерительных систем и управления робототехническими комплексами // - Москва: Автоматизация и современные технологии, - 2012. № 7, - с. 20-24.
2. Мамедов, Ф.И., Ахмедова, Т.А. Аналитическое определение электромагнитных параметров дифференциального трансформатора автоматических приборов со сплошным магнитопроводом // - Новочеркасск: Электромеханика, - 2014. №2, - с. 59-62.
3. Мамедов, Ф.И., Дадашева Р.Б., Гусейнов Р.А., Анализ энергетических показателей электромагнитного датчика малых линейных перемещений // - Москва: Измерительная техника. Метрология, - 2010. №11, - с.30-39.
4. Мамедов, Ф.И., Дадашова Р.Б., Гусейнов Р.Б. Исследование дифференциального электромагнитного датчика со сплошным магнитопроводом в режиме нагрузок // - Москва: Электротехника, -2006. №6, - с.45-50.

ПРОБЛЕМА СУБСИНХРОННОГО РЕЗОНАНСА В АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ И СПОСОБ ЕГО ПОДАВЛЕНИЯ

Белкова Д.Н.¹, Аносов В.Н.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «НГТУ», г. Новосибирск, Россия

belkova34diana@gmail.com

В рамках данного исследования рассматривается проблема возникновения субсинхронного резонанса в энергосистемах, работающих в изолированном (островном) режиме, которые относятся к объектам распределенной генерации. В качестве объекта исследования выбран энергорайон с газотурбинной установкой (ГТУ) и нелинейной нагрузкой. Предметом исследования служит субсинхронный резонанс, который приводит к повышенной виброактивности валов ГТУ и распаду энергосистемы. Поставлена цель по разработке активного силового фильтра для подавления субсинхронного резонанса. Исследование включает в себя анализ причин возникновения субсинхронного резонанса, изучение его влияния на работу энергосистемы и разработку методов для его устранения.

Ключевые слова: распределённая генерация, газотурбинная установка, имитационная модель автономного энергорайона, тиристорный частотно-регулируемый привод, активный фильтр субгармоник тока.

THE PROBLEM OF SUBSYNCHRONOUS RESONANCE IN AN AUTONOMOUS ELECTRIC POWER SYSTEM AND A METHOD FOR ITS SUPPRESSION

Belkova D.N.¹, Anosov V.N.²

^{1,2} NSTU, Novosibirsk, Russia

belkova34diana@gmail.com

This study examines the problem of sub-synchronous resonance in power systems operating in isolated (island) mode, which belong to distributed generation facilities. The study object is a power area with a gas turbine installation (GTU) and non-linear load. The subject of the research is sub-synchronous resonance, which leads to increased vibration activity of the GTU shafts and the collapse of the power system. The goal is to develop an active power filter to suppress sub-synchronous resonance. The study includes an analysis of the causes of sub-synchronous resonance, an investigation of its impact on the operation of the power system, and the development of methods to eliminate it.

Keywords: distributed generation, gas turbine installation, simulation model of an autonomous power area, thyristor frequency-controlled drive, an active current subharmonic filter.

Распределенная генерация является одним из технологических направлений развития энергетики. Вместо того чтобы полагаться на крупные централизованные электростанции, распределённая генерация предполагает использование множества небольших источников энергии, расположенных ближе к потребителям. Переход к децентрализации может осуществляться за счёт внедрения энергосистем, основанных на нетрадиционных и возобновляемых источниках энергии, а также на традиционных видах топлива от газа до вторичных энергоресурсов. Особенно это актуально для отдаленных районов России, например, для нефтегазовых месторождений, где подключение потребителей электроэнергии к отдалённым мощным энергосетям зачастую невозможно или требует больших капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с большой протяжённостью подключающих линий электропередач.

Но применение «новой» технологии может столкнуться с возможным неучтенным обратным влиянием на энергосистему. Например, при работе ГТУ в автономном режиме могут возникнуть крутильные субсинхронные колебаний (ССКК) валов. Данное явление носит название субсинхронного резонанса (ССР) и представляет из себя электромеханический резонанс на частотах ниже, чем нормальная рабочая частота (50 Гц). Особенно это отмечается, когда в качестве нагрузки присутствуют тиристорные частотно-регулируемые приводы (ЧРП) [1]. Крутильные колебания приводят к повышенной виброактивности ГТУ и, как следствие, срабатыванию защитных механизмов. Таким образом происходит внеплановое отключение энергосистемы, что приводит к экономическим и технологическим потерям.

Для поиска надежного и эффективного решения ССР в условиях существующих энергосистем без вмешательства в конструкцию и систему управления устройств необходимы следующие этапы исследования:

1) Выявление возмущающего воздействия, вызывающего повышенную виброактивность. Например, параметры настройки АРВ, резонанс с элементами сети (продольная компенсация), обратное влияние полупроводниковой техники (систем управления силовой электроники) [2] могут являться причиной возникновения ССКК. В данной работе основной источник возмущения – субгармонические колебания тока, возникающие при обмене энергии между ГТУ и ЧРП.

2) Математическое моделирование энергосистемы с учётом основных элементов, которые существенны для проявления резонансных явлений.

Исследование упрощенной динамической модели ГТУ приведено в [3] и имитационной модели автономного энергорайона мощностью около 25 МВт с линейными и нелинейными нагрузками представлено в [4]. В первую очередь, это позволило определить основные уравнения, описывающие поведение ГТУ и собственные частоты.

3) Выбор наиболее оптимального средства подавления субсинхронного резонанса. В качестве такого решения уже неоднократно упоминался активный фильтр субгармоник тока (АФСТ), цель которого компенсировать низкочастотные колебания в автономной энергосистеме, тем самым демпфируя резонанс. На данной разработке в качестве основной структуры АФСТ [5] выбрана комбинация автономного инвертора, подключенного к сети через вольтодобавочный трансформатор и неуправляемого выпрямителя, подключённого параллельно (Рис. 1.).

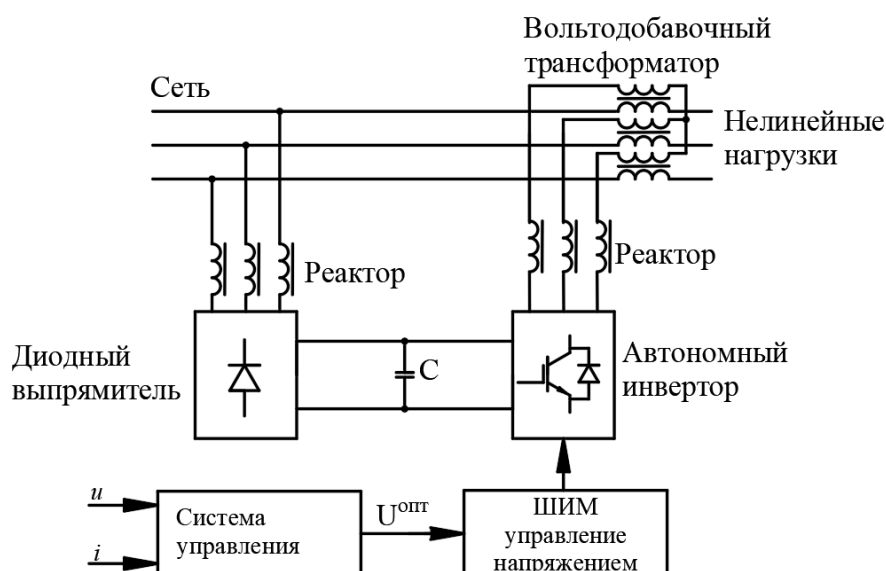


Рис. 1. Функциональная схема АФСТ

Основные требования к АФСТ должны быть направлены на повышение качества электроэнергии в точке размещения систем распределения электроэнергии. Тем самым правильно настроенная система управления позволит предотвратить распространение субгармоник тока к синхронному генератору и минимизировать риск возникновения субсинхронного резонанса.

Дальнейшее исследование включает в себя разработку необходимых алгоритмов управления и оптимизацию АФСТ, моделирование в рамках имитационной математической модели.

Источники

1. Илюшин П.В. Проблемные технические вопросы работы объектов распределенной генерации в составе энергосистемы и подходы к их решению // ЭнергоЭксперт. 2015. № 1.
2. Padiyar K.R., Kulkarni A.M. Analysis of Subsynchronous Resonance // Dynamics and Control of Electric Transmission and Microgrids. 2019. P. 341–389.
3. Belkova D., Anosov V., Kaveshnikov V. Application of the Maximum Principle for Optimizing an Active Current Subharmonic Filter // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2023. P. 474–478.
4. Белкова Д.Н., Аносов В.Н. Имитационное моделирование субсинхронного резонанса автономного энергорайона с газотурбинной установкой // Электротехника. 2024. № 5. P. 24–31.
5. Белкова Д.Н., Аносов В.Н. Исследование модели активного силового фильтра для подавления субгармоник тока. Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. P. 245–246.

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ: ПУТЬ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ СУВЕРЕНИТЕТУ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Валюк А.С.¹, Миронова Е.А.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

anastasia.valyuk@mail.ru

В связи с текущей политической ситуацией в России и санкционным давлением, возникает острая необходимость замены зарубежного оборудования на подстанциях на отечественные аналоги. Это связано с рисками поставок, обслуживания и модернизации иностранных технических решений, что ставит под угрозу стабильность энергоснабжения регионов. В статье рассматривается важность импортозамещения в электроэнергетическом секторе как одного из ключевых факторов экономической безопасности государства. Особое внимание уделено опыту АО «Сетевая компания» в реализации политики технологического суверенитета и перехода на отечественные разработки. Приведены примеры успешной модернизации подстанций с использованием отечественного оборудования, демонстрирующие, как внедрение инновационных технологий и кооперация с российскими производителями способствуют укреплению энергетической безопасности и снижению зависимости от импорта.

Ключевые слова: импортозамещение, энергетическая безопасность, отечественное оборудование, исключение рисков, повышение экономики, развитие энергетики.

IMPORT SUBSTITUTION IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY: THE PATH TO TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY AND ECONOMIC STABILITY

Valyuk A.S.¹, Mironova Ye. A.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

anastasia.valyuk@mail.ru

Due to the current political situation in Russia and sanctions pressure, there is an urgent need to replace foreign equipment at substations with domestic analogues. This is due to the risks of supplying, maintaining, and modernizing foreign technical solutions, which jeopardizes the stability of the region's energy supply. The article examines the importance of import substitution in the electric power sector as one of the key factors of the economic security of the state. Special attention is paid to the experience of JSC Network Company in implementing the

policy of technological sovereignty and transition to domestic developments. Examples of successful modernization of substations using domestic equipment are given, demonstrating how the introduction of innovative technologies and cooperation with Russian manufacturers contribute to strengthening energy security and reducing dependence on imports.

Keywords: import substitution, energy security, domestic equipment, risk reduction, economic improvement, energy development.

Современный мир характеризуется высокой степенью научной, технической и экономической зависимости между странами в различных сферах, включая энергетику. Однако политическая нестабильность и санкции могут привести к разрыву цепочек поставок критически важного оборудования. В этой связи вопрос импортозамещения приобретает особую значимость для стран, стремящихся обеспечить свою энергетическую безопасность. Россия, обладая обширной территорией и разнообразием климатических условий, нуждается в надежных и устойчивых системах электроснабжения. Подстанции являются ключевыми элементами таких систем, обеспечивая передачу электроэнергии от генерирующих объектов до конечных потребителей [1]. В последние годы особое внимание уделяется вопросам модернизации подстанционного оборудования, учитывая рост нагрузки на сети и требования к качеству электроснабжения. Одним из ключевых направлений такой модернизации является переход на использование отечественных разработок и технологий.

Основные принципы выполнения мероприятий по импортозамещению включают следующие аспекты: 1) исключение возможных рисков понижения уровня безопасности объектов электросетевого хозяйства; 2) сохранение первоначальных характеристик выполняемых инвестиционных проектов без ухудшения их основных показателей; 3) поддержание конкурентоспособности на внутренних и международных рынках электротехнической продукции (услуг, работ), исходя из установленных проектными документами критериев (эксплуатационные параметры, стоимость, маркетинговые показатели); 4) недопущение увеличения расходов вследствие изменений в цепочках поставок определенных видов продукции, необходимых для реализации инвестиционных проектов и выпуска товаров (выполнения работ, оказания услуг) [2].

Геополитическая обстановка и внешнее санкционное давление на Россию стали причинами преобразования экономических процессов электросетевого комплекса Российской Федерации. Критичными группами оборудования, развитие производства которых на территории РФ требует совместных усилий электросетевого комплекса и электротехнической промышленности, являются: коммутационное оборудование с большой отключающей способностью (63 кА и выше); КРУЭ 110 кВ и выше; КРУЭН 110 кВ и выше; выключатели 330 кВ и

выше; муфты кабельные 330-500 кВ; силовой кабель для подводной прокладки и постоянного тока; трансформаторы тока и трансформаторы напряжения 500-750 кВ; высоковольтные вводы 330-750 кВ; оборудование ИТ-систем (маршрутизаторы, коммутаторы, компьютеры, программное обеспечение); оборудование в классе напряжения 15 кВ (европейский класс напряжения для нужд АО «Россети Янтарь»).

В сложившейся обстановке АО «Сетевая компания» уделяет особое внимание обеспечению технологического суверенитета и импортозамещению. Укрепление технологического суверенитета и успешная реализация мероприятий по импортозамещению в области электроэнергетического оборудования являются неотъемлемой частью актуальной энергетической стратегии страны. В республике ведется большая работа по повышению энергоэффективности экономики, развитию энергетики и импортозамещению. Готовность сетевой инфраструктуры к противостоянию внешним вызовам и доступность электроснабжения составляют основу стабильного и устойчивого развития национальной экономики и социальной сферы. Политика АО «Сетевая компания» в части развития энергетических кластеров и техническая политика, тесное сотрудничество с предприятиями, созданными в Республике Татарстан и наладившими современное высокотехнологичное производство необходимого оборудования, стали базисом, обеспечившим надежную и стабильную работу электросетевого комплекса региона в сложившихся реалиях.

При закупке оборудования основными поставщиками Компании являются отечественные производители: ОАО «Свердловский завод трансформаторов тока», АО «Курский электроаппаратный завод», ООО «СВЭЛ», АО «Чебоксарский электроаппаратный завод», АО «Чебоксарский электромеханический завод», ООО «НПП «ЭКРА», Холдинг «Ункомтех», ООО «Камский кабель», завод «Таткабель» и другие. Доля закупаемого отечественного оборудования с 2019 года выросла с 98 до 99 % [3-4]. При этом необходимо отметить роль производителей из Татарстана, которые поставляют кабельную продукцию, электротехническое и контрольно-измерительное оборудование, производят железобетонные изделия и металлоконструкции для ЛЭП, реализуют решения в области автоматизации, обеспечивают бригады

Примеры успешного импортозамещения энергетического оборудования на подстанциях. Так подстанция 110 кВ «Полиметалл», возведённая Группой «Россети» на севере Свердловской области в 2021 году, служит ярким примером не только замены импортного оборудования, но и активного использования продукции местных производителей. Этот питающий центр обеспечивает энергией горно-обогатительную фабрику в моногороде Краснотурьинске, который входит в зону опережающего социально-экономического развития. Объект укомплектован оборудованием,

изготовленным на Урале. Так, оба силовых трансформатора мощностью 10 МВА на ПС «Полиметалл» выпущены в Екатеринбурге. Для компании «Россети» такая практика стала нормой: крупнейшая электросетевая организация России сумела заместить импорт более чем на 90%.

Постепенный переход на отечественные технологии в «Россети» начался ещё в 2014 году после введения первых санкций [5]. В сотрудничестве с основными заказчиками производители ускорили производство электрического оборудования и разработали передовые технологии, включая электронную технику, автоматизированные системы управления производственными процессами, а также комплексы дистанционного контроля и диагностики. Если в 2014 году доля импорта в закупках «Россетей» составляла более 40%, то к сегодняшнему дню она сократилась почти в шесть раз.

Ещё одним примером импортозамещения в сфере электроэнергетики является подстанция с цифровыми технологиями «Конная», расположенная в Приморском районе Санкт-Петербурга. Подстанция напряжением 110 кВ «Конная» была построена в одном из наиболее крупных районов северной столицы. Её основная функция - обеспечивать электроэнергией промышленные предприятия, первым из которых стал завод «Хендэ Виа Рус», находящийся неподалёку. Важно отметить, что эта подстанция почти на 100% оснащена оборудованием отечественного производства. Сейчас компания «Россети» продолжает работу по завершению процесса импортозамещения критически важных элементов. В частности, Гжельский завод «Электроизолятор» реализует проект, направленный на организацию промышленного выпуска керамических изоляторов методом изостатического прессования для комплектации электрических установок с напряжением 35-750 кВ.

На выставке KazanEnergyExpo 2025, проходящей в Республике Татарстан более 60 компаний из 17 регионов России представили свою продукцию для энергетических предприятий. Холдинговая компания «АБС Электро» презентовала инновационную российскую продукцию, разработанную для замещения импортных аналогов, компания «Релематика» предложила современные шкафы управления, оснащенные терминалами собственной разработки (ТОР 300, ТОР 200, ТОР 150 и др.), которые измеряют основные электрические параметры, регистрируют сбои и аварийные ситуации, применимые на подстанциях различного назначения. ООО «Релематика» в своей экспозиции представило электротехнические шкафы на базе ряда терминалов: ТОР 300 КП, ТОР 200 ретрофит SPAC, ТОР 150, ТОР 110 ИЗН. Терминалы ТОР 300 обеспечивают измерение действующих значений напряжения и силы переменного тока, мощности активной, реактивной и полной, коэффициента активной мощности, частоты. Реализуют регистрацию и хранение информации о процессах, предшествующих и сопутствующих

аварийным отклонениям в электрических сетях, могут применяться для организации информационно-измерительных систем. Устройства могут применяться на подстанциях с переменным, выпрямленным переменным, постоянным оперативным током.

ООО «Промэлектро» представило в экспозиции выставки модульные реле серий РП30, РП31, предназначенные для применения в электрических схемах релейной защиты и противоаварийной автоматики для коммутации электрических нагрузок, являющиеся комплектующими изделиями. Данное реле является полным аналогом изделий таких производителей как Schrack, Finder, Relpol и др.

Татэнерго и Уральский турбинный завод договорились о строительстве новой ПГУ на Заинской ГРЭС.

Процесс импортозамещения на энергопредприятия является важным шагом на пути к обеспечению энергетической безопасности России. Модернизация электростанций и подстанций с использованием отечественного оборудования не только снижает риски, связанные с разрывом глобальных цепочек поставок, но и стимулирует развитие национального производственного сектора. Это создает условия для устойчивого функционирования энергосистемы даже в условиях геополитической напряженности и внешних ограничений. Несмотря на существующие трудности, связанные с финансированием и адаптацией новых технологий, программа импортозамещения имеет значительный потенциал для дальнейшего развития и улучшения состояния отечественной энергетики.

Источники

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/documents/11/10/1920/doc>

2. Официальный сайт ПАО «Россети ФСК ЕЭС». Режим доступа: <https://www.fskees.ru/>

3. Интегрированный годовой отчет АО «Сетевая компания» за 2023 год. – Казань, 2024.

4. Интегрированный годовой отчет АО «Сетевая компания» за 2022 год. – Казань, 2023.

5. Полбин А. В., Синельников – Мурылев С. Г., Трунин П. В. Экономический кризис 2020 г.: причины и меры по его преодолению и дальнейшему развитию России // Вопросы экономики. 2020. № 6. С. 5-21.

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Вахобов О.И.

ХПИТТУ им. академика М.С.Осими, г. Худжанд, Таджикистан

В данной статье приведены преимущества применение частотно-регулируемых приводов для насосов и вентиляторов в технологических процессах и рекомендации, которые должны произвести перед началом внедрения.

Ключевые слова: Энергосбережения, электропривод, частотная управления, асинхронный электродвигатель, преобразователь частоты, частотно-регулируемый электропривод

ENERGY SAVING MEASURES IN ELECTRIC DRIVES

Vakhobov O.I.

KPITTU nam. academician M.S.Osimi, Khujand, Tajikistan

This article presents the advantages of using variable frequency drives for pumps and fans in technological processes and the recommendations that should be made before the start of implementation.

Keywords: Energy saving, electric drive, frequency control, asynchronous electric motor, frequency converter, frequency-controlled electric drive

Мировая и отечественная инженерная практика показала, что наибольший экономический эффект при реализации программ энергосбережения дает переоснащение энергетических сетей и коммуникаций устройствами частотно-регулируемого электропривода.

Энергосбережение стало одним из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Это связано, во-первых, с ограниченностью и невозобновляемостью основных энергоресурсов, во-вторых, с непрерывно возрастающими сложностями их добычи и стоимостью, в-третьих, с глобальными экологическими проблемами, обозначившимися на рубеже тысячелетий. Энергосбережение является наиболее дешевым и безопасным способом увеличения энергогенерирующих мощностей.

Основные агрегаты и механизмы, применяемые в промышленности и коммунальном хозяйстве, оснащены электроприводами, которые призваны

преобразовывать электрическую энергию в механическую. Именно поэтому разумное распределение и использование энергии в установках с электроприводом - актуальная задача для любого производства. Данная задача была решена путем создания на базе частотно-регулируемых систем электропривода энергосберегающих технологий.

Частотное управление асинхронными электродвигателями в наши дни является наиболее привлекательным и признанным во всем техническом мире способом управления частотой вращения двигателей в электроприводе.

Так как электроприводы потребляют более 60 % вырабатываемой электроэнергии, наиболее существенная экономия электроэнергии может быть достигнута при использовании регулируемых электроприводов для управления технологическими процессами, что в сочетании с возможностями автоматизации может обеспечить оптимальное использование электроэнергии и других ресурсов. В связи с тем, что среди регулируемых электроприводов доминирующее положение занимают частотно-регулируемые электроприводы, их массовое применение позволяет решать не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения [1,2].

Для этих целей все электроприводы оснащают преобразователями частоты (ПЧ) или устройствами плавного пуска. В ряде стран законодательство даже запрещает использование электроприводов без преобразователей частоты.

Преобразователи частоты предназначены для управления скоростью вращения и моментом на валу двигателя. Управление осуществляется за счет изменения частоты и напряжения на выходе ПЧ по заданной программе или по сигналам датчиков в цепи управления. Преобразователи частоты легко встраиваются в уже действующие релейно-контактные схемы управления.

Частотно-регулируемый электропривод используется в системах автоматизированного управления (САУ) насосных установок, чтобы с его помощью привести в соответствие режим работы насосов с режимом работы обслуживаемой системы подачи жидкости, например, водопроводной или канализационной сети города или промышленного предприятия [3,4].

Преобразователи частоты обеспечивают:

- оперативное включение/отключение, аварийное отключение, автоматическое повторное включение приводного двигателя;
- плавный частотный разгон с заданным темпом, формирование заданных значений пускового тока и момента;
- регулирование в заданном диапазоне, либо поддержание заданного значения скорости вращения двигателя;
- автоматическое регулирование значения технологических параметров приводимой производственной машины или механизма;

- изменение направления вращения (реверсирование) и торможение двигателя;
- эффективную защиту двигателя и механизмов в аварийных и нештатных режимах;
- дистанционный прием и обработку сигналов управления, задания параметров и режимов, в т.ч. по каналу последовательной связи от управляющих машин и систем высшего уровня;
- сигнализацию, отображение и дистанционную передачу информации о параметрах и режимах работы;
- автоматизацию и взаимосвязанное управление группами механизмов многоагрегатных установок и комплексов.

Разработка и внедрение регулируемого электропривода является одним из самых перспективных и экономически оправданных направлений из всех энергосберегающих технологий.

Создание системы с частотно-регулируемыми приводами, в которых управление частотой осуществляется наряду с контролем целого комплекса различных технологических параметров, позволяет снизить не только потребление электрической энергии, но и обеспечивает экономию потребления энергоресурсов всей системы.

Применение частотно-регулируемых приводов для насосов и вентиляторов в технологических процессах позволяет снизить энергопотребление технологическим оборудованием. Перед началом внедрения рекомендуется провести технико-экономическое обоснование, позволяющее определить не только сроки окупаемости от внедрения, но и правильно организовать технологический процесс с учётом возможностей привода с частотным регулированием. Целесообразно использование преобразователей частоты не в качестве элементов системы управления конкретного агрегата, а как составляющих комплексных системных решений с подключением широкого набора средств автоматизации технологического процесса. Такие решения позволяют получить дополнительный эффект, который заведомо больше простой экономии электрической энергии.

Источники

1. Новиков, Г. В., Частотное управление асинхронными электродвигателями /Г. В. Новиков. — Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. — 498, [6] с. : ил.
2. Лезнов Б. С. Л 41 Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. — М.: Машиностроение, 2013. — 176 с., ил.

3. Браславский И.Я, Ишматов З.Ш., Поляков В.Н., Энергосберегающий асинхронный электропривод, учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Москва, Издательский центр «Академия», 2004, 256 стр.

4. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕВАТОРНОГО УЗЛА ОТОПЛЕНИЯ

Вдовин М.В.¹, Нешина Е.Г.²

^{1,2} КарТУ им. Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

¹ mvdovin_01@mail.ru, ² e.neshina@ktu.edu.kz

В работе рассматривается применение цифровых двойников в автоматизированных системах управления элеваторным узлом отопления. Описано, что интеграция цифровых двойников может повысить надежность работы тепловых пунктов за счет прогнозирования аварийных ситуаций и оптимизации регулирования параметров теплоносителя.

Ключевые слова: цифровые двойники, тепловой пункт, элеваторный узел, автоматизация теплового пункта, тепловой узел.

APPLICATION OF DIGITAL TWINS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF THE HEATING ELEVATOR UNIT

Vdovin M.V.¹, Neshina E.G.²

^{1,2} KarTU, Karaganda, Republic of Kazakhstan

¹ mvdovin_01@mail.ru, ² e.neshina@ktu.edu.kz

This article examines the application of digital twins in automated control systems of heating elevator units. It describes how the integration of digital twins can improve the reliability of heating stations by forecasting emergency situations and optimizing the regulation of heat carrier parameters.

Keywords: digital twins, heating station, elevator unit, heating station automation, heating node.

В современном мире, где эффективное управление ресурсами играет ключевую роль в обеспечении комфортных условий проживания и работы, автоматизированные системы управления с искусственным интеллектом (например, цифровые двойники) становятся неотъемлемой частью инженерных решений. Применение цифровых технологий с системой цифровых двойников для автоматизации управления элеваторным узлом является актуальным [1].

Цифровые двойники, вводимые в существующую системы управления, моделируют виртуальные модели реальных объектов и процессов. Их

применение в автоматизированных системах управления элеваторными узлами отопления позволяет оптимизировать процессы регулирования и контроля рабочих параметров тепловых пунктов и обеспечить качественное теплоснабжение потребителей [2].

Прогнозирование аварийных и нештатных ситуаций при работе элеваторного узла отопления можно обеспечить внедрением системы цифровых двойников технологического процесса и устранить причины аварийной ситуации до момента их возникновения, что позволит получать достоверную информацию от системы цифровых двойников для коррекции параметров теплового пункта и предотвращать аварийные ситуации (рис 1) [3].

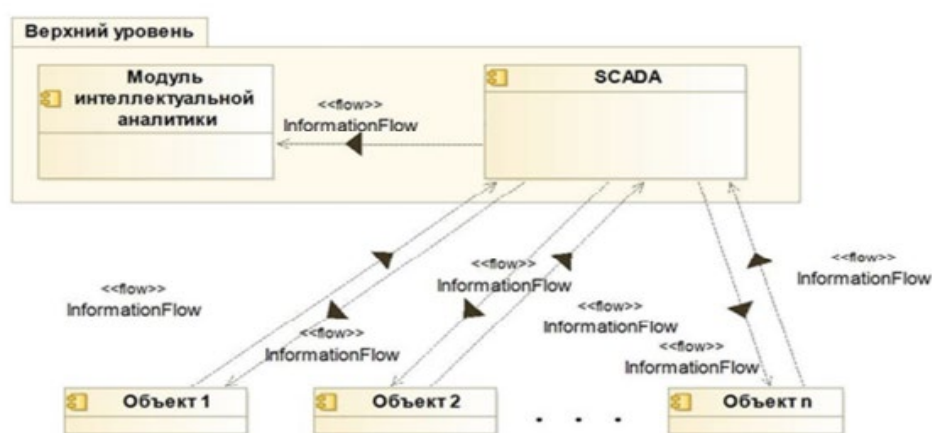


Рис. 1. Структура АСУ ТП распределенных технологических объектов с интегрированной системой цифровых двойников [4]

Система прогнозирования встраивается в общую структуру управления как отдельный модуль интеллектуальной аналитики, то есть не требует больших дополнительных затрат. Необходимые данные собираются существующими датчиками, передаются по уже развернутым информационным сетям и собираются в базах данных диспетчерских и операторских пунктов, а по полученным от них данным строятся модели технологических систем, которые в свою очередь способны спрогнозировать возникновение аварийных ситуаций при изменении трендов теплового пункта, то есть отклонение работы алгоритма программируемого логического контроллера и составляющих элементов теплового пункта (рис 2) [5].

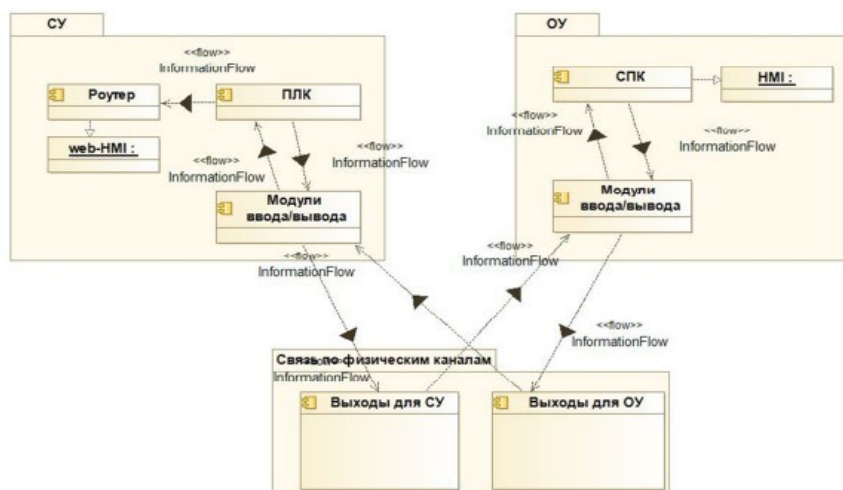


Рис. 2. Структура системы автоматизированного теплового пункта элеваторного узла

Чтобы не допустить понижения надежности, желательно логически отделить основную АСУ и систему прогнозирования односторонней связью, а рекомендательную информацию от системы прогнозирования отображать только для оператора.

Исходя из всего можно сделать вывод, что внедрение цифровых двойников позволяет повысить надежность системы управления и теплового пункта.

Источники

1. Колларж В.В. Анализ сбалансированности деятельности предприятия сферы ЖКХ на основе теории энтропии и теории ограничения систем // Экономический вектор, 2016г. 7 с.
2. Хохловский В.Н., Олейников В.С., Пересвет В.А., Курочкина В.С., Бурячек И.Ю. Совершенствование процесса разработки программного обеспечения для ПЛК путем генерации кода из созданной математической модели объекта управления // Modern Science, 2020 г. 359 с.
3. Короткова Л.И., Морева Ю.А., Андреева Н.В., Новоселова Ю.Н. Системы автоматического регулирования потребления теплоты в жилых зданиях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015 г. 4 с.
4. Панферов В.И., Панферов С.В. О некоторых решениях проблемы управления централизованным теплоснабжением // Труды Академэнерго, 2016 г. 5 с.
5. Панферов В.И., Панферов С.В. Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения // Вестник ЮУрГУ, 2016 г. 10 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В ЭКОТЕХНОПАРКАХ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ОТХОДОВ И ЭНЕРГОЗАТРАТ

Газетдинова Г.Н. ¹, Николаева Л.А. ²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹gazetdinovaguzel@mail.ru

В статье рассматривается технология плазменной газификации отходов как эффективный метод утилизации твердых бытовых и промышленных отходов. Анализируются практические результаты внедрения данной технологии в экотехнопарках, подчеркивающие ее значимость для решения экологических проблем и снижения объемов захороняемых отходов. Обсуждаются возможности использования получаемого синтетического газа в энергетике и химической промышленности, а также создание новых рабочих мест в сфере экологии. В заключение выделяются перспективы дальнейшего применения технологии плазменной газификации в контексте глобальных тенденций к устойчивому развитию и декарбонизации экономики, а также ее интеграции с другими методами утилизации отходов.

Ключевые слова: плазменная газификация, утилизация отходов, экологическая эффективность, возобновляемые источники энергии.

APPLICATION OF CLOSED-LOOP TECHNOLOGIES IN ECOTECHNOPARKS TO MINIMIZE WASTE AND ENERGY CONSUMPTIONS

Gazetdinova G.N. ¹, Nikolaeva L.A. ²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

gazetdinovaguzel@mail.ru

The article considers the technology of plasma gasification of waste as an effective method of recycling solid household and industrial waste. The practical results of the implementation of this technology in eco-technoparks are analyzed, emphasizing its importance for solving environmental problems and reducing the volume of landfilled waste. The possibilities of using the resulting synthetic gas in the energy and chemical industries, as well as the creation of new jobs in the field of ecology are discussed. In conclusion, the prospects for further application of plasma gasification technology in the context of global trends towards sustainable development and decarbonization of the economy, as well as its integration with other methods of waste recycling are highlighted.

Keywords: plasma gasification, waste recycling, environmental efficiency, renewable energy sources.

Глобальная проблема накопления отходов и роста энергопотребления требует перехода к устойчивым моделям производства и потребления. В условиях стремительного роста населения и увеличения объемов производства, традиционные методы управления отходами и энергозатратами становятся недостаточными. Циркулярная экономика, реализуемая в рамках экотехнопарков, представляется перспективным решением данной проблемы. Экотехнопарки, как интегрированные системы, способствуют эффективному использованию ресурсов, минимизации отходов и снижению углеродного следа.

В данном исследовании предлагается новая схема промышленного симбиоза внутри экотехнопарка, учитывающая специфику региона и отрасли. Анализируется эффективность инновационной технологии замкнутого цикла — биогазовой установки — в условиях экотехнопарка. Также разработана методика оценки экономической и экологической эффективности внедрения технологий замкнутого цикла с учетом социальных факторов, что позволяет более полно оценить влияние на местное население и экономику.

Биогазовая технология позволяет перерабатывать множество видов органических отходов, таких как навоз, сточные воды и отходы сельскохозяйственного производства. Это не только способствует улучшению экологической ситуации, но и позволяет реализовать ресурсосберегающие технологии (РСТ), которые являются важнейшим элементом экологизации на предприятиях. Биоэнергетика как новая отрасль энергетики решает важные задачи получения топлива и охраны окружающей среды. Биогаз — это газ, получаемый в результате метанового брожения биомассы. В процессе этого брожения бактерии питаются продуктами жизнедеятельности предыдущих бактерий, что создает замкнутый цикл переработки органических веществ. К достоинствам биоэнергетики можно отнести:

1. Отработанность технологий.
2. Широкую распространенность потенциальных ресурсов.
3. Относительную дешевизну и простоту добычи.

Процесс производства биогаза не сопровождается горением или выбросами вредных веществ в атмосферу — он абсолютно закрыт и безопасен для окружающей среды. Использование биогаза решает проблему утилизации отходов и обеспечивает как энергетическую, так и экологическую безопасность в зоне работы биогазовой станции.

Для оценки эколого-экономической эффективности работы биогазовой установки необходимо рассмотреть несколько ключевых аспектов:

Годовой прирост доходов (Д) от использования продуктов ферментации:

Э1 — дополнительная прибыль от использования биогаза.

Э2 — дополнительная прибыль от использования обезвоженного шлама.

Э3 — дополнительная прибыль от использования стоков сброженной массы.

Э4 — снижение затрат за счет сокращения объемов вывоза и хранения отходов.

Формула для расчета годового прироста доходов:

$$Д = Э1 + Э2 + Э3 + Э4 \quad (1)$$

Экологический эффект (Э) от внедрения установки:

$$Э = Р - З \quad (2)$$

где Р — народнохозяйственный эффект от внедрения установки, а З — затраты на ее внедрение

Народнохозяйственный эффект (Р):

$$Р = Д + \Delta У \quad (3)$$

где $\Delta У$ — предотвращенный экономический ущерб в результате снижения уровня загрязнения окружающей среды.

Анализ расчетов показывает, что доля предотвращенного ущерба ($\Delta У$) в структуре экологического эффекта составляет 30-50%. Однако из-за отсутствия достоверных данных не учтены все положительные факторы технологии метанового сбраживания.

Рассмотрим экотехнопарк, который использует технологию плазменной газификации для переработки твердых бытовых отходов. Предположим, что парк обрабатывает 1000 тонн отходов в месяц. При этом выход синтетического газа составляет около 500 нм³ на тонну отходов. Таким образом, за месяц можно получить 500 000 нм³ синтетического газа.

Если стоимость синтетического газа составляет 10 рублей за нм³, то дополнительная прибыль от его продажи составит:

Глобальная проблема накопления отходов и роста энергопотребления требует перехода к устойчивым моделям производства и потребления. В условиях стремительного роста населения и увеличения объемов производства, традиционные методы управления отходами и энергозатратами становятся недостаточными. Циркулярная экономика, реализуемая в рамках экотехнопарков, представляется перспективным решением данной проблемы. Экотехнопарки, как интегрированные системы, способствуют эффективному

использованию ресурсов, минимизации отходов и снижению углеродного следа.

В данном исследовании предлагается новая схема промышленного симбиоза внутри экотехнопарка, учитывающая специфику региона и отрасли. Анализируется эффективность инновационной технологии замкнутого цикла — биогазовой установки — в условиях экотехнопарка. Также разработана методика оценки экономической и экологической эффективности внедрения технологий замкнутого цикла с учетом социальных факторов, что позволяет более полно оценить влияние на местное население и экономику.

$$\text{Э1}=500000 \text{ нм}^3 \times 10 \text{ руб./ нм}^3 = 5\,000\,000 \text{ руб.} \quad (4)$$

Дополнительная прибыль от использования побочных продуктов (например, шлаков) может составить еще 1 000 000 рублей в месяц (Э2). Снижение затрат на вывоз отходов может привести к экономии еще 500 000 рублей (Э3).

Таким образом, годовой прирост доходов составит:

$$\begin{aligned} \text{Д} &= \text{Э1} + \text{Э2} + \text{Э3} = 5000000 + 1000000 + 500000 = 6500000 \text{ руб/мес} \\ 6500000 \text{ руб/мес} &= 78000000 \text{ руб/год} \end{aligned} \quad (5)$$

При этом затраты на внедрение установки могут составить около 30 миллионов рублей. Предположим также, что предотвращенный экономический ущерб из-за снижения загрязнения окружающей среды составляет около 20% от общего дохода:

$$\Delta Y = 0.2 \times P \quad (6)$$

Таким образом, народнохозяйственный эффект будет равен:

$$P = \text{Д} + \Delta Y \quad (7)$$

Внедрение данной технологии позволяет эффективно решать проблему утилизации твердых бытовых и промышленных отходов, что является актуальной задачей для многих регионов. Плазменная газификация обеспечивает высокую степень переработки, минимизируя объемы отходов, которые подлежат захоронению. Это не только способствует улучшению экологической ситуации, но и снижает затраты на вывоз и утилизацию отходов.

Получаемый синтетический газ может быть использован для производства электроэнергии или как сырье для химической промышленности. Это открывает новые возможности для создания замкнутых циклов в производстве и снижает зависимость от традиционных ископаемых источников энергии. Таким образом, результаты исследования могут быть применены как на уровне отдельных предприятий, так и в рамках региональных программ по переходу на устойчивые источники энергии. Кроме того, внедрение технологии плазменной газификации может способствовать созданию новых рабочих мест

в сфере экологии и энергетики, а также развитию смежных отраслей, таких как переработка отходов и производство оборудования для газификации.

С учетом глобальных тенденций к декарбонизации экономики и переходу на возобновляемые источники энергии, технология плазменной газификации может занять важное место в энергетическом балансе стран. Внедрение данной технологии может стать частью национальных стратегий по устойчивому развитию и охране окружающей среды. Также стоит отметить возможность интеграции технологии плазменной газификации с другими методами утилизации отходов и производства энергии. Например, комбинирование с биогазовыми установками или солнечными электростанциями может повысить общую эффективность системы управления отходами и энергетическими ресурсами.

Наконец, результаты исследования могут быть использованы для разработки новых нормативных актов и стандартов в области обращения с отходами и охраны окружающей среды. Это позволит создать более благоприятные условия для внедрения инновационных технологий на уровне государства.

Источники

1. Биогазовые технологии: курс лекций / сост. Ю. В. Караева. Исследоват. центр проблем энергетики. – Казань, 2013. С. 4-8.
2. Коробкова Ю.Ю., Чусовитин Д.Ю. Этапы стратегического планирования в ПАО «Газпром нефть» // Образование и право. 2021. С. 158-162.
3. Ковалева, А. М. Анализ и планирование финансового состояния предприятия / А. М. Ковалева, В. П. Привалов. - М.: Центр экономики и маркетинга, 2019. - 208 с.
4. Коробкова Ю.Ю., Чусовитин Д.Ю. Анализ особенностей функционирования системы стратегического планирования на примере компании ПАО «Газпром нефть» // Инновации и инвестиции. 2021. С. 40-43.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Джураев Д.С.

ХПИТТУ им. академика М.С.Осими, г. Худжанд, Таджикистан

juraev77@mail.ru

Исследование посвящено анализу теплофизических свойств магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла с добавлением железного порошка. Основное внимание уделено зависимости теплоемкости от температуры, концентрации ферромагнитных частиц и плотности образцов. Экспериментальные измерения проводились методом монотонного разогрева (метод Е.С. Платунова), что позволило установить эмпирические соотношения для расчета удельной теплоемкости. Показано, что рост температуры приводит к увеличению теплоемкости, тогда как повышение концентрации железного порошка и плотности жидкости снижает её.

Ключевые слова: магнитные жидкости, температура, трансформаторное масло, теплоемкость, ферромагнитные частицы

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MAGNETIC LIQUIDS BASED ON TRANSFORMER OIL

Juraev D.S.

KPITTU nam. academician M.S.Osimi, Khujand, Tajikistan

juraev77@mail.ru

The study is devoted to the analysis of the thermophysical properties of magnetic liquids based on transformer oil with the addition of iron powder. The main attention is paid to the dependence of heat capacity on temperature, concentration of ferromagnetic particles and density of samples. Experimental measurements were carried out by the method of monotonous heating (the method of E.S. Platunov), which allowed us to establish empirical relations for calculating the specific heat capacity. It is shown that an increase in temperature leads to an increase in heat capacity, while an increase in the concentration of iron powder and the density of the liquid reduces it.

Keywords: magnetic fluids, temperature, transformer oil, heat capacity, ferromagnetic particles

Эффективность практического применения магнитных жидкостей во многом определяется зависимостью их намагниченности от температуры, концентрации частиц и приложенного магнитного поля. Выходные показатели магнитожидкостных устройств тем выше, чем выше их намагниченность насыщения и устойчивость к действию сил гравитации, магнитного поля. Другие характеристики и свойства магнитных жидкостей изменяются в зависимости от условий применения. К ним относятся термостойкость, вязкость, токсичность и испаряемость. Поэтому исследования теплофизических свойств межчастичных взаимодействий,

ориентационных эффектов, в том числе для магнитной жидкости на основе трансформаторного масла актуальны и перспективны [1,2].

Теплоемкость – это количество теплоты, необходимая для нагрева какой-нибудь количественной единицы вещества в данном процессе на один градус.

Практическое значение исследований теплоемкости важно для выбора оптимальных теплоносителей. Экспериментальные измерения теплоемкости магнитных жидкостей при различных интервалах температур является основным методом определения термодинамических свойств веществ.

При измерении теплоемкости магнитных жидкостей (трансформаторное масло+железо) нами было использовано известный метод профессора Е.С. Платунова, метод монотонного разогрева. Подробное описание установки и методика расчета приведены в [3].

При обработке и обобщения опытных данных по зависимости теплоемкости исследуемых объектов от температуры было использовано следующая соотношения (1) [5, с.112].

$$\frac{C_p}{C_p^*} = f\left(\frac{T}{T_1}\right), \quad (1)$$

где: C_p – теплоемкость испытуемого образца в зависимости от температуры; C_p^* – теплоемкость испытуемого образца при $T_1=348$ К; T – температура, при которой проводится испытание.

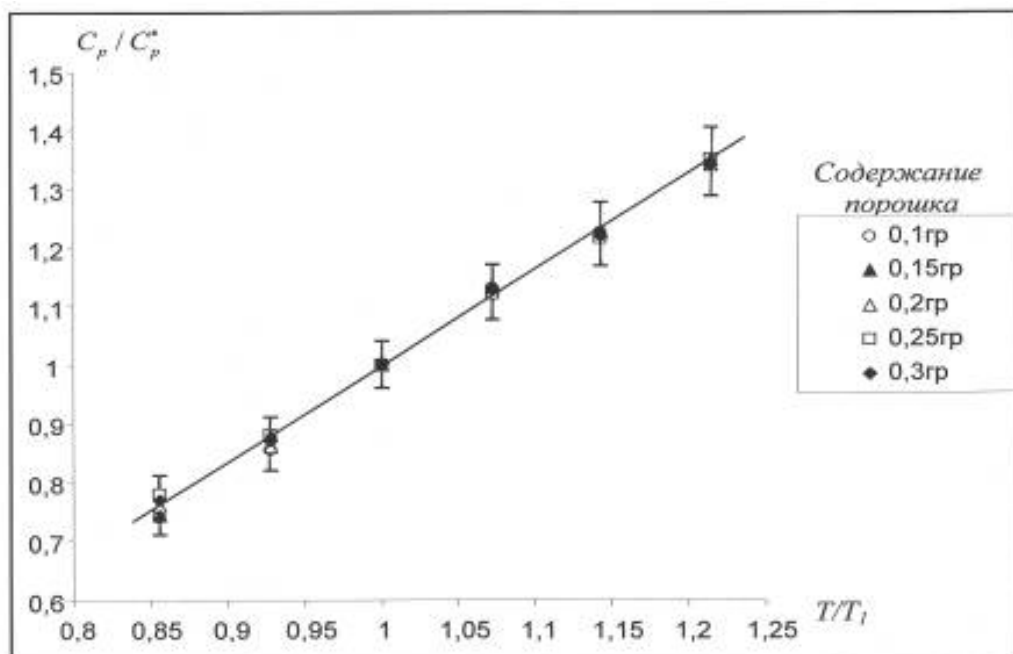


Рис. 1. Зависимость C_p / C_p^* от T/T_1 .

Так как все опытные данные по теплоемкости находятся вдоль одной линии (рис 1), соотношение (1) можно описывать в следующем виде:

$$C_p = \left[1,6 \cdot \left(\frac{T}{T_1} \right) - 0,6 \right] \cdot C_p^*, \quad (2)$$

где: T – температура, при которой проводится расчет, K ; T_1 – температура, равная 348 К постоянная.

Значение C_p^* является функцией концентрации ферромагнитного порошка

$$C_p^* = f(m), \quad (3)$$

Кривая линия, изображенная на рис 2 описывается уравнением:

$$C_p^* = - 2,227 \cdot 10^6 \cdot m + 1812,7, \quad (4)$$

где : m – масса железного порошка 10^{-3} кг ,

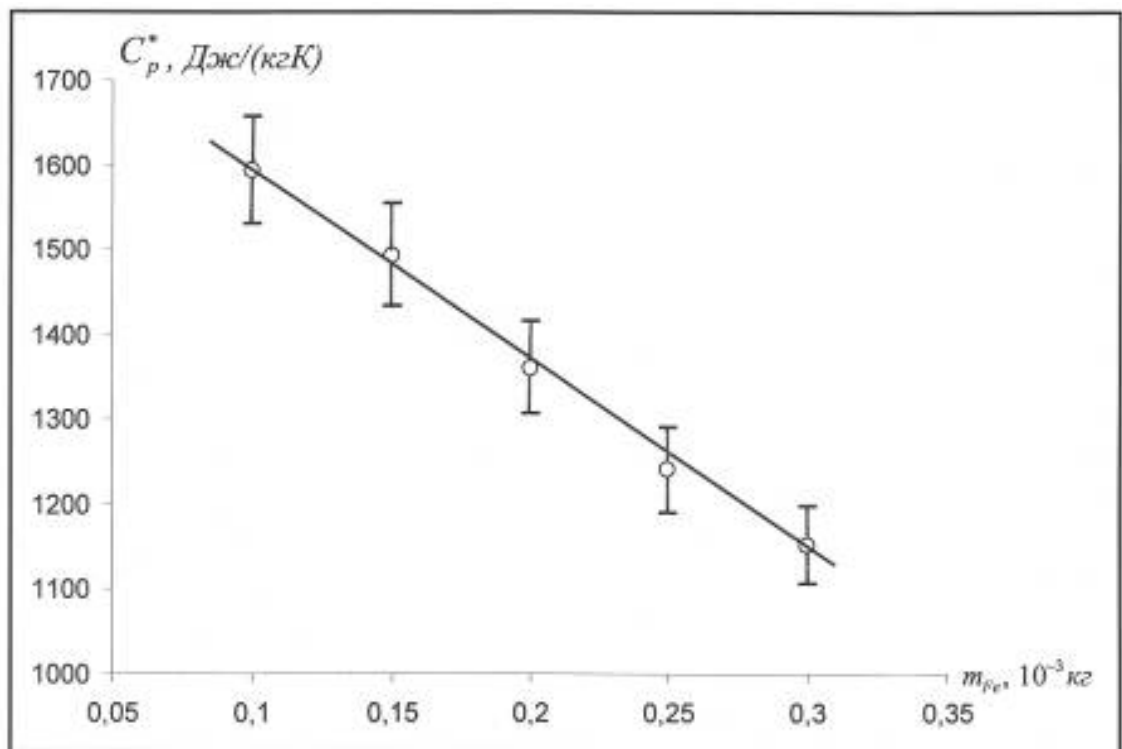


Рис. 2. Теплоемкость исследуемой системы в зависимости от добавки железного порошка при $T_1=348\text{K}$.

Значение теплоемкости трансформаторного масла в зависимости от добавки железного порошка при $T_1=348\text{K}$ приведены в таблице 1.

Значение C_p^* является функцией плотности образца

$$C_p^* = f(\rho), \quad (5)$$

Кривая линия, изображенная на рис 3 описывается уравнением:

$$C_p^* = -1,52 \cdot \rho + 3166, \quad (6)$$

где: ρ – плотность образца, $\text{кг}/\text{м}^3$

Таблица 1

Экспериментальное значение теплоемкости трансформаторного масла в зависимости от добавки железного порошка при $T_1=348K$

$m_{Fe}, 10^{-3} \text{ кг}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$C_p^*, \text{ Дж/кгК}$	1593,8	1493,	1360,1	1240,	1152,3
		7		8	

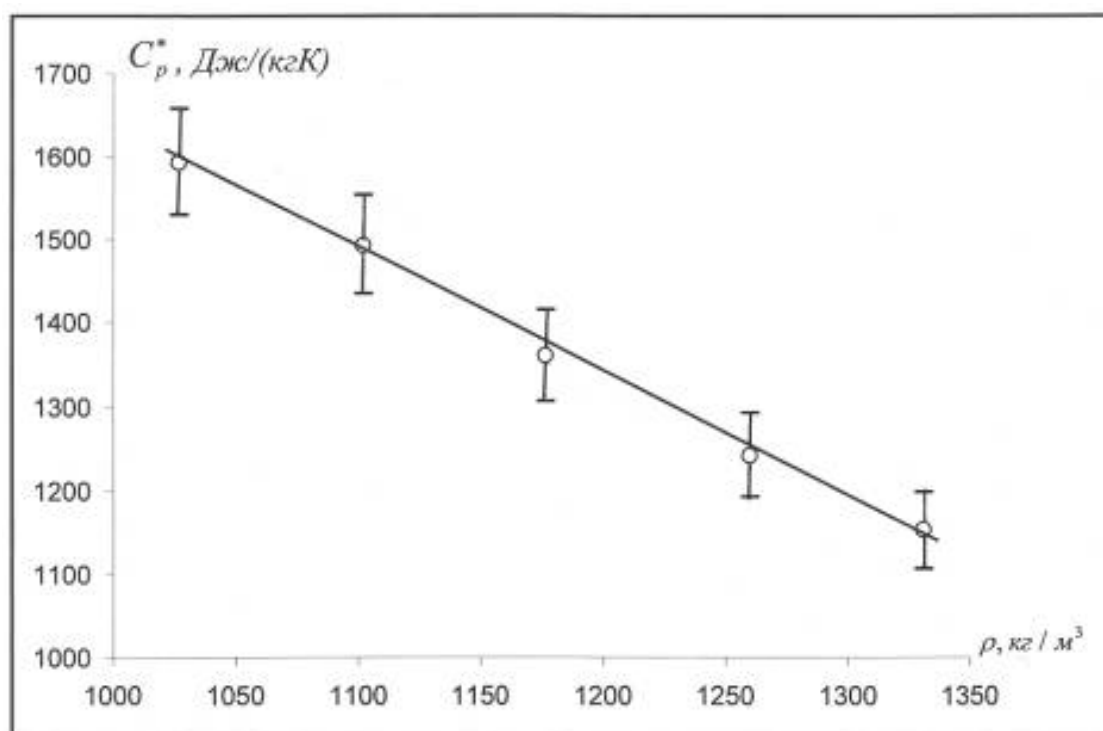


Рис. 3. Теплоемкость трансформаторного масла в зависимости от плотности при $T=348K$.

Значение теплоемкости магнитных жидкостей в зависимости от плотности при $T_1=348K$ приведены в таблице 2

Таблица 2

Экспериментальное значение теплоемкости магнитных жидкостей в зависимости от плотности при $T_1=348K$

$\rho, \text{ кг/м}^3$	1027	1102	1177	1260	1331
$C_p^*, \text{ Дж/кгК}$	1593,8	1493,7	1360,1	1240,8	1152,3

Из уравнения (2) с учетом (4) и (6) для расчета удельной теплоемкости магнитных жидкостей (трансформаторное масло+железо) в зависимости от температуры, плотности и от массы концентрации железного нано порошка при атмосферном давлении получим:

$$C_p = \left[1,6 \cdot \left(\frac{T}{T_1} \right) - 0,6 \right] \cdot (-2,227 \cdot 10^{-6} \cdot m + 1812,7), \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})} \quad (7)$$

$$C_p = \left[1,6 \cdot \left(\frac{T}{T_1} \right) - 0,6 \right] \cdot (-1,52 \cdot \rho + 3166), \frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})} \quad (8)$$

С помощью уравнения (5) и (6) можно рассчитать с погрешностью до 4% (таблица 3 и 4) удельную теплоемкость неисследованных магнитных жидкостей в зависимости от температуры при атмосферном давлении, но для этого необходимо знать только массовое значение концентрации или плотность магнитных жидкостей.

При исследовании теплоемкости магнитных жидкостей установлено, что теплоемкость исследуемых объектов с ростом температуры увеличивается, а в зависимости концентрации железного порошка уменьшается.

Разработана методика обобщения экспериментальных данных по теплофизическим свойствам магнитных жидкостей в зависимости от температуры при атмосферном давлении [4-6].

На основе экспериментальных данных по теплофизическим свойствам и закон соответственных состояния и термодинамических подобия получено ряд эмпирических уравнения, с помощью которого можно рассчитать, не проводя экспериментальные опыты, исследуемых теплофизических характеристик объектов.

Таблица 3

Сравнение зависимости опытных и расчетных данных теплоемкости магнитных жидкостей от температуры

T, К $m, 10^{-3} \text{ кг}$	298			323			348		
	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{рас}}$	%	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{рас}}$	%	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{рас}}$	%
0.1	1180,4	1224,5	3,7	1363,1	1407,5	3,2	1593,8	1590,3	0,2
0.15	1110,3	1138,7	2,5	1314,4	1308,6	0,45	1493,7	1478,9	1,0
0.2	1032,4	1052,9	1,9	1173,9	1210,1	3,1	1360,1	1367,3	0,5
0.25	968,41	967,1	0,13	1094,4	1111,5	1,6	1240,8	1255,9	1,2
0.3	892,62	881,5	1,2	1000,6	1013,1	1,2	1152,3	1144,6	0,7

Таблица 4

Сравнение зависимости опытных и расчетных данных теплоемкости магнитных жидкостей от температуры

T, К $m, 10^{-3} \text{ кг}$	373			398			423		
	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{рас}}$	%	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{рас}}$	%	$C_{\text{экс}}$	$C_{\text{рас}}$	%
0.1	1801,6	1772,7	1,6	2000,3	1955,5	2,3	2142,5	2138,3	0,2
0.15	1688,5	1648,5	2,4	1831,2	1818,5	0,7	2016,3	1988,5	1,4
0.2	1538,5	1524,5	0,9	1662,4	1681,6	1,1	1822,4	1838,8	0,9

0.25	1388,6	1400,2	0,8	1508,5	1544,6	2,4	1675,5	1688,9	0,8
0.3	1302,3	1276,2	2,0	1405,4	1407,7	0,16	1544,5	1539,3	0,3

Источники

1. .Теплофизические и адсорбционные свойства медных катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия в среде воздух-пар воды / А. Г. Мирзوماмадов, М. М. Сафаров, М. М. Холиков [и др.] // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства: Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева, Москва, 22–23 мая 2018 года. – Москва: Издательство "Перо", 2018. – С. 250-255. – EDN YAGZFB.

2. Джураев, Д. С. Влияние температуры, давления и магнитного поля на изменение теплофизических свойств магнитных жидкостей: специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Джураев Дадахон Собиржонович. – Бишкек, 2012. – 23 с. – EDN QIGIID.

3. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме/ Е.С. Платунов. –Л.: Энергия, 1973. –142 с.

4. Влияние температуры, давления и магнитного поля на изменения теплопроводности магнитных жидкостей / Д. С. Джураев, М. М. Сафаров, М. А. Зарипова, Х. А. Зоиров // Вестник Таджикского технического университета. – 2010. – Т. 3-7, № 7. – С. 9-14. – EDN MBHFAT.

5. Степень набухания, коэффициент термодиффузии и массоотдачи ультрадисперсных никелевых катализаторов на основе силикагеля в насыщенных конденсированных средах / А. А. Хушвактов, Т. Ш. Сангов, Д. С. Джураев, М. М. Сафаров // Вестник Таджикского национального университета. – 2012. – № 1-3. – С. 160-165. – EDN SZCVDF.

6. Адсорбционные, теплофизические, термодинамические свойства некоторых наночастиц и их влияние на поведение теплоносителей / М. М. Сафаров, Х. Х. Назаров, Н. Б. Давлатов [и др.] // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении : Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова, Казань, 13–15 сентября 2016 года. – Казань: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский научный центр Российской академии наук, 2016. – С. 217-220.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Джураев Д.С.

ХПИТТУ им. академика М.С.Осими, г. Худжанд, Таджикистан

juraev77@mail.ru

В данной статье приведены описание экспериментальной установки и методики проведения эксперимента по исследованию электропроводности трансформаторного масла в зависимости от давления и магнитного поля при комнатной температуре.

Ключевые слова: трансформаторное масло, магнитная жидкость, электропроводность, установка, эксперимент, исследуемый объект.

DETERMINATION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MAGNETIC FLUIDS BASED ON TRANSFORMER OIL

Juraev D.S.

KPITU nam. academician M.S.Osimi, Khujand, Tajikistan

juraev77@mail.ru

This article describes an experimental setup and a technique for conducting an experiment to study the electrical conductivity of transformer oil depending on pressure and magnetic field at room temperature.

Keywords: transformer oil, electrical conductivity, installation, experiment, test object.

Трансформаторное масло – это наиболее распространенный в энергетике жидкий диэлектрик.

Трансформаторное масло – очищенная фракция нефти, получаемая при её перегонке и кипящая при температуре от 300 ° С до 400 ° С. В зависимости от происхождения нефти, оно обладает различными свойствами и эти отличительные свойства исходного сырья отражаются на свойствах масла. Масло имеет сложный углеводородный состав со средним весом молекул 220–340 а.е.

В процессе эксплуатации масло, залитое в электрические аппараты, стареет. При этом происходят изменения химических и электрофизических показателей масел, которые могут отрицательно сказаться на дальнейшей работе электрических аппаратов. Электропроводность – это способность тела или среды проводить электрический ток, а также свойство тела или среды, определяющее возникновение в них электрического тока под

воздействием электрического поля. Кроме того, электропроводность является обратной величиной электрическому сопротивлению.

Нами впервые исследованы и получены опытные данные по теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности коллоидных магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла (трансформаторное масло+железный порошок) при температуре ($T = 298-423$ К), давлении ($P = 0,101 - 0,141$ МПа) и векторе индукции магнитного поля ($B = 0 - 0,3866 \cdot 10^{-2}$ Тл). Общий вес исследуемого объекта, т.е магнитной жидкости на основе трансформаторного масла составляет 0,4 грамма, а добавка железного порошка составляет от 0.1 до 0.3 грамма с интервалом 0.05 грамм.

Большое теоретическое значение представляет собой исследование магнитных жидкостей, что связано с фундаментальными теплофизическими проблемами, которые в значительной степени способствуют развитию и совершенствованию современной теории жидкого состояния, выяснению механизма межмолекулярного взаимодействия в жидкостях. Практическое значение магнитных жидкостей состоит в применении их в машиностроении, электронике, медицине, космической технике и т.д. Однако, на данный момент нельзя считать удовлетворительным состояние изучения теплофизических свойств магнитных жидкостей, поэтому дальнейшее изучение и исследование в данной области является весьма актуальным [1-7].

Для определения электропроводности трансформаторного масла с добавкой нанопорошков в зависимости давления нами была разработана и создана экспериментальная установка, приведённая на рис. 1 [8].

Имеющиеся аналоги не позволяют производить измерения электропроводности жидкостей в зависимости от давления.

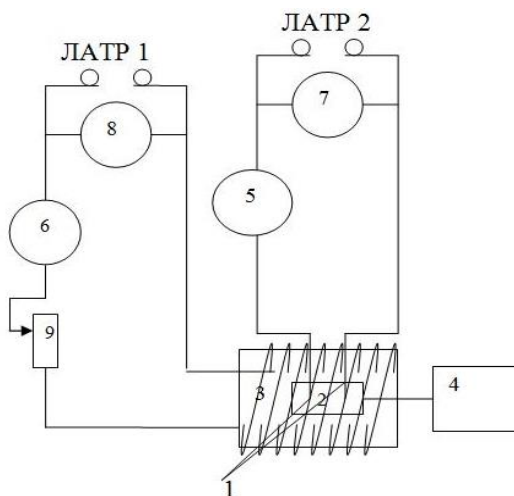


Рис.1. Устройство для определения электропроводности магнитных жидкостей: 1– электрод; 2 – измерительная ячейка с объектом; 3 – катушка; 4 – насос; 5,6 – амперметр; 8,7–вольтметр; 9 – реостат.

Устройство работает следующим образом:

Ячейку 2 заполняют исследуемым объектом. Для создания в ячейке давления к ней подсоединён насос 4. Кроме этого, к ячейке подведены два электрода 1. Ячейка устанавливается в центре катушки 3, при этом исключён ее контакт с катушкой. В свою очередь индукционная катушка прикрепляется к штативу. Подавая напряжение лабораторным автотрансформатором ЛАТР 1, в индукционной катушке создают магнитное поле и изменяют давление. С помощью переменного резистора 9 контролируем силу тока по амперметру 6. Переменный резистор 9 и амперметр 6 последовательно соединены с катушкой 3. Подавая напряжение лабораторным автотрансформатором ЛАТР 2 с помощью амперметра 5 измеряется ток, возникший между электродами 1.

По формуле 1 определяем сопротивление трансформаторного масла:

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

где U – подаваемое напряжение; I – показание амперметра.

Зная численное значение R по формуле 2 можно определить удельное сопротивление образца:

$$\rho = \frac{1}{R} \quad (2)$$

Далее можно найти электропроводность образца по следующей формуле

$$\chi = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Таким образом, данная установка даёт возможность с погрешностью до 3% определить зависимость электропроводности трансформаторного масла от давления и воздействия магнитного поля.

Источники

1. Пат.0900294 Республики Таджикистан, МПК (2006) G01 N 27/00. Устройство для определения влияния магнитного поля на изменение температуропроводности магнитных жидкостей / Джураев Д. С., Сафаров М. М., Нажмудинов Ш. З. и др.; заявитель и патентообладатель Джураев Д. С., Сафаров М. М.- №; заявл. 31.03.09 ; опубл. 17.06.10; Бюл. № TJ 229.

2. Пат. 0900357 Республики Таджикистан МПК (2006) G01. N 21/00. Способ определения теплопроводности магнитных жидкостей методом

лазерной вспышки / Джураев Д. С., Сафаров М. М., Нажмудинов Ш. З. и др.; заявитель и патентообладатель Джураев Д. С., Сафаров М. М.; заявл. 25.09.09; опубл. 07.04.10; Бюл. № ТЈ 316

3. Теплофизические и адсорбционные свойства медных катализаторов на основе пористого гранулированного оксида алюминия в среде воздух-пар воды / А. Г. Мирзوماмадов, М. М. Сафаров, М. М. Холиков [и др.] // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства : Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева, Москва, 22–23 мая 2018 года. – Москва: Издательство "Перо", 2018. – С. 250-255.

4. Джураев, Д. С. Влияние температуры, давления и магнитного поля на изменение теплофизических свойств магнитных жидкостей: специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Джураев Дадахон Собиржонович. – Бишкек, 2012. – 23 с.

5. Влияние температуры, давления и магнитного поля на изменения теплопроводности магнитных жидкостей / Д. С. Джураев, М. М. Сафаров, М. А. Зарипова, Х. А. Зоиров // Вестник Таджикского технического университета. – 2010. – Т. 3-7, № 7. – С. 9-14.

6. Степень набухания, коэффициент термодиффузии и массоотдачи ультрадисперсных никелевых катализаторов на основе силикагеля в насыщенных конденсированных средах / А. А. Хушвактов, Т. Ш. Сангов, Д. С. Джураев, М. М. Сафаров // Вестник Таджикского национального университета. – 2012. – № 1-3. – С. 160-165.

7. Адсорбционные, теплофизические, термодинамические свойства некоторых наночастиц и их влияние на поведение теплоносителей / М. М. Сафаров, Х. Х. Назаров, Н. Б. Давлатов [и др.] // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении : Материалы X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова, Казань, 13–15 сентября 2016 года. – Казань: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский научный центр Российской академии наук, 2016. – С. 217-220.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАТРАТ НА ОБСЛУЖИВАНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ

Дитятьева А.С.¹, Сандаков В.Д.²

¹ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

²ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ anastasia.ditiatjeva@yandex.ru ² vitalysandakov@gmail.com

В статье проведён теоретический анализ эксплуатационных затрат на системы контроля и защиты в промышленном электроснабжении двух типов: традиционных (электромеханических и аналоговых) и микроэлектронных (микропроцессорных и цифровых). Рассмотрены ключевые характеристики каждого подхода, включая надёжность, энергопотребление, сроки между обслуживанием и сложность ремонта. Представлена модель оценки суммарной стоимости владения (Life Cycle Cost) с учётом капитальных вложений и текущих расходов на техобслуживание. Приведены формулы экономических расчётов и примерные численные оценки для иллюстрации разницы в затратах. Сравнение проведено с позиции российской промышленности; анализ опирается на обобщённые модели, без привязки к конкретным предприятиям.

Ключевые слова: системы релейной защиты и автоматики, микропроцессорные устройства, эксплуатационные затраты, техобслуживание, экономическая эффективность, электроснабжение промышленности.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MAINTENANCE COSTS OF TRADITIONAL AND MICROELECTRONIC CONTROL SYSTEMS IN INDUSTRIAL POWER SUPPLY

Ditiatjeva A. S.¹, Sandakov V. D.²

¹ KNRTU, Kazan, Russia

² KSPEU, Kazan, Russia

¹anastasia.ditiatjeva@yandex.ru, ² vitalysandakov@gmail.com

This article presents a theoretical analysis of operating costs associated with two types of monitoring and protection systems in industrial power supply: traditional (electromechanical and analog) and microelectronic (microprocessor-based and digital). The key characteristics of each approach are considered, including reliability, energy consumption, maintenance intervals, and repair complexity. A life cycle cost (LCC) assessment model is proposed, incorporating capital investments and ongoing maintenance expenses. Formulas for economic evaluation and sample calculations illustrate the differences in costs. The comparison is made in the context of Russian industry using generalized models without referencing specific enterprises.

Keywords: relay protection systems, microprocessor devices, maintenance costs, economic efficiency, industrial power supply, automation.

Современные промышленные предприятия критически зависят от надёжного электроснабжения. Системы контроля, релейной защиты и автоматики (РЗА) обеспечивают безопасную и эффективную эксплуатацию электроустановок. Традиционно такие системы строились на основе электромеханических или аналоговых компонентов (электромагнитные реле, измерительные трансформаторы, электронные регуляторы). Последнее десятилетие отмечено активным внедрением микроэлектронных и цифровых технологий (программируемые логические контроллеры, микропроцессорные реле защиты и др.), что меняет характер затрат на эксплуатацию и обслуживание.

В российской промышленности, где обновление энергетического оборудования происходит постепенно, важно оценить экономический эффект от внедрения цифровых систем. Цель статьи – провести сравнительный анализ затрат на обслуживание традиционных и микроэлектронных систем контроля в электроэнергетике, используя экономические модели и примеры расчётов.

Традиционные системы контроля и защиты в электроснабжении основаны на электромеханических или аналоговых устройствах (электромагнитных реле, статических транзисторах, механических счётчиках и т.п.). Они хорошо зарекомендовали себя надёжностью в чистых условиях, имеют сравнительно простую конструкцию и низкую цену исходного оборудования. Однако к их недостаткам относятся большая громоздкость, существенное энергопотребление обмоток реле, высокая материалоёмкость конструкции и сложность интеграции в современные автоматизированные системы. В частности, установлено, что «к основным недостаткам релейных систем относятся их громоздкость, значительное потребление электроэнергии, высокая материалоёмкость, сложность сопряжения с управляющими системами более высокого уровня для полной автоматизации технологических процессов» [1].

Техническое обслуживание (ТО) традиционных систем часто требует периодической проверки и калибровки датчиков, смазки и замены изношенных механических компонентов, ручной настройки параметров при изменении режима. Отсутствие встроенной диагностики приводит к необходимости регулярных плановых осмотров и замеров, что увеличивает трудозатраты на эксплуатацию. Расчёты эксплуатационных нормативов показывают, что частота планово-предупредительных ремонтов таких систем

ниже, а стоимость техобслуживания существенно выше за счёт ручного труда и материальных затрат. Это приводит к значительным ежегодным расходам на поддержание традиционной системы РЗА в рабочем состоянии. Поскольку в электромеханических реле имеется много движущихся частей, интервалы между отказами сравнительно невелики, и каждый отказ часто приводит к длительному простоя оборудования [2].

Микроэлектронные (цифровые) системы контроля включают микропроцессорные реле защиты, программируемые логические контроллеры (ПЛК), цифровые датчики и системы диспетчерского контроля (SCADA). Такие системы обладают значительно более широким функционалом: они могут вести автоматическую регистрацию режимов, дистанционный мониторинг и самодиагностику. По сравнению с традиционными устройствами они легче интегрируются в АСУ, позволяют оперативно менять алгоритмы работы и передавать данные о событиях на верхние уровни управления. Как отмечают специалисты, «микропроцессорные устройства, которые приходят на смену электромеханическим и электронным, способствуют повышению эксплуатационных характеристик систем... Эти устройства обладают большим функционалом, они легче вписываются в структуру современных технологических систем, могут иметь встроенную автодиагностику и удалённый мониторинг» [1].

Основные преимущества микроэлектронных систем по сравнению с традиционными можно обобщить следующим образом:

- Самодиагностика и автоматическое журналирование событий. Современные реле защиты и контроллеры оснащены средствами самотестирования и могут автоматически фиксировать аварийные ситуации и отклонения параметров. Это существенно сокращает время простоя на поиск причин отказа, так как системные журналы позволяют быстро локализовать неисправность.

- Уменьшенные операционные затраты. Благодаря самодиагностике и дистанционному доступу снижаются трудозатраты на плановые осмотры и настройку оборудования. Кроме того, цифровые устройства обычно потребляют меньше энергии на вспомогательном питании, уменьшая эксплуатационные расходы.

- Компактность и интеграция. Микропроцессорные блоки обычно имеют меньшие габариты и массу по сравнению с эквивалентным набором электромеханических реле, что упрощает монтаж и уменьшает затраты на инфраструктуру (шкафы, кабели). Они легко масштабируются и расширяемы

в составе АСУ ТП (АСУ Э) и могут работать в составе единого сетевого контура мониторинга.

- Повышенная надёжность и функциональность. Несмотря на сложность цифровых схем, многие зарубежные и отечественные исследования показывают, что при соблюдении технических требований микроэлектроника обеспечивает не менее высокую надёжность, чем устаревшие аналоговые решения. Вновь вводимые режимы защиты (например, адаптивное, синхронное отключение) реализуются только на цифровых платформах. Возможность дистанционного обновления ПО и конфигурации также позволяет поддерживать актуальность системы без капитальных замен [3].

Однако у микроэлектронных систем есть и недостатки: их первоначальная стоимость значительно выше, чем у простого релейного оборудования, а обслуживание требует привлечения квалифицированного персонала. Переход на цифровые устройства связан с затратами на переобучение инженеров и сервисных работников. Кроме того, при отключении питания микропроцессорным устройствам требуется время на перезагрузку и восстановление обмена, тогда как электромеханические реле сразу возвращаются в исходное состояние. В совокупности высокая стоимость оборудования и его сложность иногда отталкивают предприятия от быстрой модернизации.

При сравнении затрат на обслуживание традиционных и микропроцессорных систем важно рассматривать совокупные затраты владения (Total Cost of Ownership, TCO), включая как капитальные вложения на приобретение оборудования, так и текущие расходы на эксплуатацию и обслуживание в течение жизненного цикла. Ключевыми статьями затрат являются:

- Капитальные затраты (CAPEX): закупочная цена оборудования, стоимость проектирования и монтажа системы. Традиционные системы выигрывают в низкой начальной цене простого оборудования, тогда как цифровые комплексы требуют больших инвестиций на закупку контроллеров, программного обеспечения и коммуникационных систем.

- Операционные затраты (OPEX): регулярные расходы на техобслуживание (ППР, регламентное ТО), энергообеспечение, затраты на замену штатных узлов.

Здесь микроэлектроника обычно выигрывает: автоматизация диагностических процедур сокращает трудозатраты на обслуживание и ремонт. Традиционные системы, в свою очередь, требуют частых проверок

калибровки и имеют большую вероятностную наработку на отказ, что увеличивает ОРЕХ.

- Затраты на простои и аварии: стоимость непредвиденных остановок производства при отказе системы. Поскольку цифровые реле имеют более высокую точность срабатывания и могут прогнозировать отказы (благодаря самодиагностике), аварийные простои обычно сокращаются. В аналитических обзорах отмечается, что внедрение цифровых систем позволяет оптимизировать затраты на создание и обслуживание систем РЗА на объекте, включая снижение издержек за счёт сокращения числа аварийных ситуаций [2].

- Прочие затраты: обучение персонала, модернизация и доработка существующих схем. В краткосрочной перспективе расходы на обучение персонала и поддержку со стороны производителей выше у микросхемных систем, однако в долгосрочном плане они окупаются благодаря расширенным возможностям мониторинга и обновляемости системы.

Для количественной оценки разницы затрат можно использовать модель суммарной стоимости жизненного цикла (ЖЦ) системы. Для простоты рассмотрим статическую сравнивающую модель без учёта дисконтирования (или при $r \approx 0$) и возьмём равный плановый период T для обеих систем. Тогда можно в явном виде сравнить следующие компоненты затрат:

- Первоначальные затраты: $C_{\text{традиц.}}$ и $C_{\text{микро.}}$. Пусть $C_{\text{традиц.}} = 1000$ тыс. руб., $C_{\text{микро.}} = 1500$ тыс. руб. (гипотетические примерные данные).

- Ежегодные эксплуатационные расходы: $C_{\text{традиц.}}$ и $C_{\text{микро.}}$. Например, для традиционной системы потребуется ежегодно 200 тыс. руб. на обслуживание (регулировки, проверки), тогда как цифровая система – 100 тыс. руб. (благодаря меньшим трудозатратам).

- Потери от простоев: $C_{\text{традиц.}}$ и $C_{\text{микро.}}$ (примерно пропорциональны количеству отказов). Предположим, что традиционная система в среднем имеет 2 серьёзных отказа за время $T=5$ лет, с потерями по 50 тыс. руб. за каждые 3 дня простоя, а цифровая – 1 отказ за 5 лет (из-за самодиагностики и резервирования), с подобными потерями 50 тыс. руб [4]. В таблице 1 приведены условные численные оценки (для иллюстрации), показывающие, что несмотря на больший первоначальный взнос, микропроцессорная система даёт меньшую совокупную стоимость эксплуатации за рассматриваемый срок.

При увеличении срока службы T или повышенной частоте отказов традиционной системы выгода от цифровизации становится ещё более заметной.

Таблица 1

Условный пример сравнения затрат (капитальные и эксплуатационные) для традиционной и микроэлектронной систем контроля (срок службы $t=5$ лет)

Статья затрат	Традиционная система	Микроэлектронная система
Первоначальные затраты, тыс. руб.	1000	1500
Ежегодные расходы на ТО, тыс. руб.	200	100
Расходы на электроэнергию, тыс. руб./год	50 (примерно)	30 (за счёт ЭУП диодов)
Потери от простоев за $t=5$ лет, тыс. руб.	100 (2×50)	50 (1×50)
Итого за 5 лет (сумма), тыс. руб.	$(1000 + 5 \cdot 200 + 100) = 2300$	$(1500 + 5 \cdot 100 + 50) = 2100$

При формировании реальных экономических расчётов необходимо учитывать также стоимость капитальных затрат на инфраструктуру (шкафы, кабели), цены электроэнергии, ставки налога на имущество и др., однако базовый вывод сохраняется: микроэлектронные системы требуют больших капитальных вложений, но выигрывают за счёт снижения эксплуатационных расходов и простоев [5].

Сравнительный анализ показывает, что при прочих равных условиях внедрение микроэлектронных средств контроля и защиты в промышленном электроснабжении оправдано за счёт экономии на последующих расходах. Хотя закупка цифровых реле и контроллеров обходится дороже, их эксплуатационные преимущества (самодиагностика, удалённый мониторинг, снижение трудозатрат и энергоёмкости) приводят к снижению суммарных затрат за жизненный цикл. Кроме того, современные микропроцессорные устройства обеспечивают более гибкую адаптацию систем к меняющимся технологическим требованиям, что критично для российских предприятий, стремящихся к полной автоматизации производства. Полученные выводы согласуются с общим мнением отраслевых специалистов: переход на МПУ РЗА снижает эксплуатационные расходы и позволяет достичь большей экономической эффективности систем управления.

Важно отметить, что реализация таких систем требует инвестиций не только в оборудование, но и в обучение персонала, развитие программных средств и регламентацию технической поддержки. Поэтому перевод на

цифровую базу следует осуществлять поэтапно, начиная с устаревших и изношенных участков сети. В целом же сравнительный анализ затрат указывает на перспективность микроэлектронных технологий в российской энергетике как средства увеличения надёжности и рентабельности электроснабжения предприятий.

Источники

1. Ковалёв А.А., Честюнин Е.А. Анализ микропроцессорных устройств релейной защиты трансформаторов // Известия УрГПС (Энергетика, электроника и электромеханика). – 2012. – № 8. – С. 36–39.
2. Радаев П.С., Комков Н.К. Экономическое сравнение перехода от электромагнитных реле на микропроцессорную технику в системах ЖАТ // Научный лидер. – 2023. – № 11 (109). – С. 76–82.
3. Управление маркетинга НТЦ «Механотроника». Релейная защита и автоматика: комплексный подход к снижению затрат // Журнал ИСУП. – 2015. – № 4(58). – С. 52–55.
4. Ермаков В.Н., Плотников С.В. Надёжность и эффективность микропроцессорных устройств РЗА в промышленной энергетике // Энергетик. – 2021. – № 6. – С. 30–34.
5. IEC 61850: Communication networks and systems for power utility automation. – International Electrotechnical Commission, 2021.

АНАЛИЗ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПОСЕЛЕНИЯ С АВТОНОМНЫМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ

Емельянов Е.А.¹, Бельский А.А.²

^{1,2}СПГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

¹s225028@stud.spmi.ru, ²Belskiy_AA@pers.spmi.ru

В работе проводится анализ данных записей журнала загрузки дизельной электростанции, на основе которых строится годовой график электрических нагрузок поселения (п. Гыда, ЯНАО) с автономной системой электроснабжения. Электроснабжение поселка осуществляется за счет дизельной электростанции, также рассматриваются варианты с различными по мощности ветроэлектрическими установками. На основе данных нагрузки рассчитаны коэффициенты формы, заполнения и максимума графика. Полученные результаты позволяют оценить характер потребления электроэнергии, а также предпосылки для оптимизации структуры энергоснабжения поселения при использовании возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: график нагрузки, автономное электроснабжение, дизельная электростанция, ветроэлектрическая установка.

ANALYSIS OF THE ELECTRIC LOAD SCHEDULE OF A SETTLEMENT WITH AUTONOMOUS POWER SUPPLY

Emelyanov E.A.¹, Belsky A.A.²

^{1,2}SPMU, Saint Petersburg, Russia

¹s225028@stud.spmi.ru, ²Belskiy_AA@pers.spmi.ru

The study analyzes data from the load log of a diesel power plant to construct an annual electric load profile for the settlement of Gyda (YNAO), which operates with an autonomous power supply system. The settlement is primarily powered by a diesel power plant, while scenarios involving wind power plants of various capacities are also considered. Based on the load data, the load profile's form factor, load factor, and peak factor have been calculated. The results provide insight into the settlement's electricity consumption patterns and form the basis for optimizing the energy supply structure through the integration of renewable energy sources.

Keywords: load profile, autonomous power supply, diesel power plant, wind turbine.

В настоящее время электроснабжение объектов на изолированных труднодоступных территориях (ИТТ) осуществляется преимущественно за

счёт дизельных электростанций (ДЭС) [1]. В ряде исследований рассматривается возможность использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) в автономных энергосистемах для снижения расхода дизельного топлива [2]. Существенное внимание уделяется моделированию электротехнических комплексов (ЭТК) с ВЭУ с целью обоснования параметров генерирующего оборудования [3]. При моделировании в большинстве работ используются часовые интервалы [4].

Существует ряд баз данных, которые содержат графики скорости ветра для любой точки мира [5]. Однако данных по графикам нагрузки в открытом доступе крайне мало. Зачастую авторы используют усредненные типовые суточные графики [6]. Для обоснования алгоритмов управления генерирующим оборудованием [7] и/или спросом нагрузки [8] требуются графики нагрузки максимально приближенные к реальным.

Для решения данной задачи в рамках текущего исследования получен график годовой нагрузки на основе записей журнала загрузки автономной ДЭС, которая обеспечивает электроэнергией поселок Гыда (Ямало-Ненецкий автономный округ) на ИТТ.

На рисунке 1 представлен реальный график нагрузки построенный на основе данных для 3-х суток каждого месяца с интервалом 2 часа.

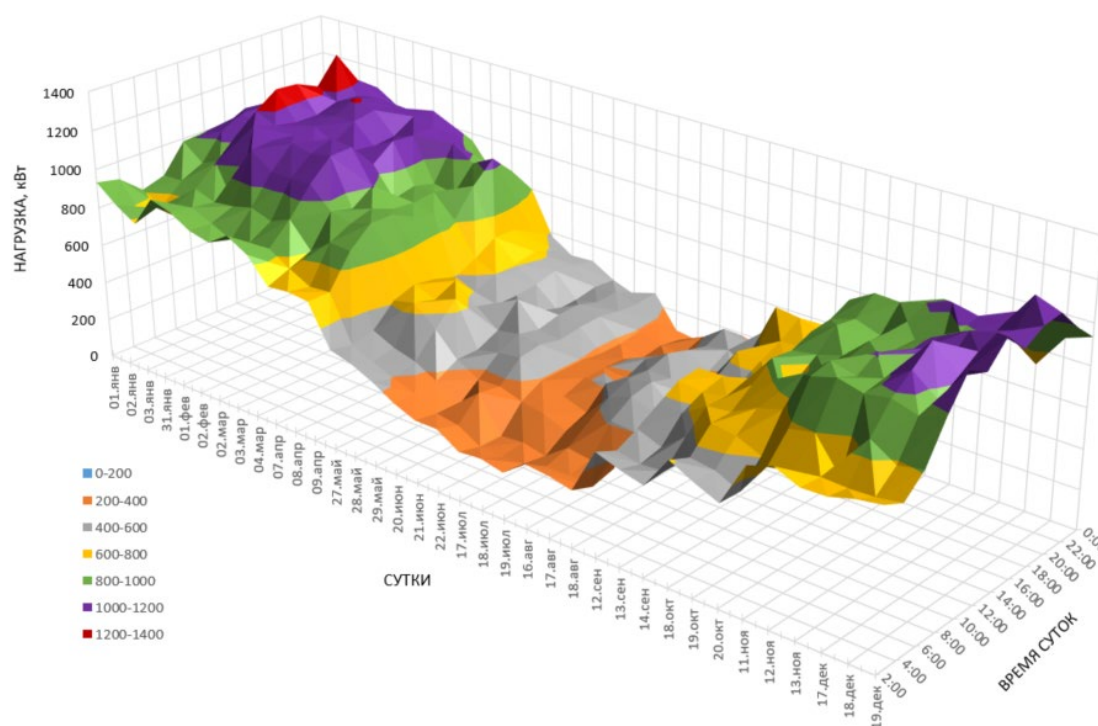


Рис. 1. График из записей журнала загрузки ДЭС.

Максимальное значения нагрузки (1346 кВт) наблюдается 31 января в 20:00, минимальное (205 кВт) 19 июля в 6:00.

Годовой график нагрузки формируется с использованием линейной интерполяции между усреднёнными значениями, полученными из трёхдневных записей. На рисунке 2 приведены суточные графики нагрузки для четырёх сезонов, отражающие возможный диапазон колебаний значений.

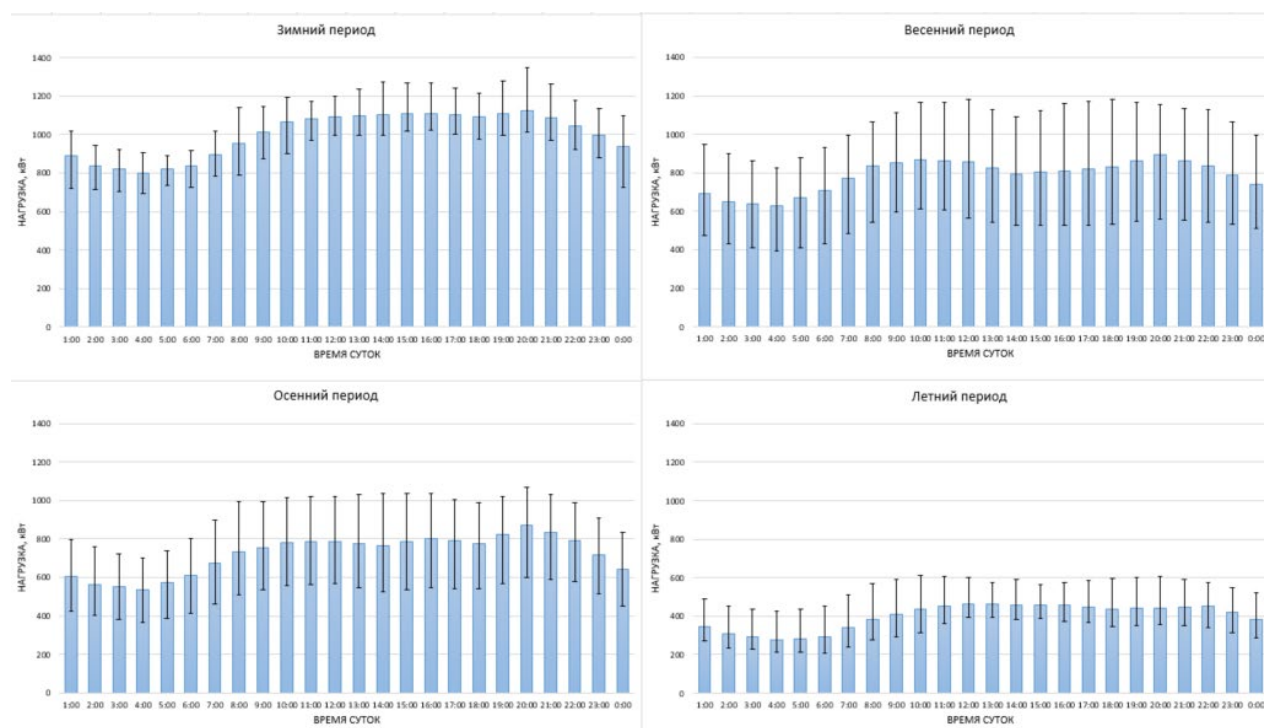


Рис. 2. Суточные графики нагрузки по сезонам.

Анализ адекватности полученного графика производится по значениям: минимальная, максимальная, среднеарифметическая, медианная и среднеквадратическая нагрузка, стандартное отклонение, коэффициенты формы, максимума и заполнения графика.

Значения указанных параметров для реальных данных из журнала загрузки ДЭС (Журнал) и полученных линейной интерполяцией (Расчетные) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение реального и интерполированного наборов данных.

Данные	$P_{\min}$, кВт	$P_{\max}$, кВт	$P_{\text{мед}}$, кВт	$P_{\text{ср}}$, кВт	$P_{\text{ср.кв}}$, кВт	σ , кВт	K_f	K_m	$K_{з.г}$
Журнал	205	1346	760	739	788,7	276	1,067	1,821	0,549
Расчетные	205	1346	762,4	742,6	786,2	258,2	1,059	1,813	0,552

Как видно из таблицы интерполяция сохранила значения максимума и минимума, незначительно изменила медианное и среднеарифметическое

значения, сгладила флуктуации, а также практически не повлияла на коэффициенты формы, максимума и заполнения графика.

Для анализа влияния интеграции ВЭУ в ЭТК использовался полученный график нагрузки и метеоданные о скорости ветра (NASA MERRA 2) [9] в посёлке Гыда за 20 лет, на основе которых рассчитывалась генерация ВЭУ при различных значениях установленной мощности. Путём вычитания полученной генерации ВЭУ из исходного графика нагрузки формировался новый график загрузки ДЭС. Значения параметров для новых графиков загрузки с учетом генерации ВЭУ за 20-летний период представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры графиков загрузки ДЭС с ВЭУ.

ВЭУ, кВт	$P_{\min}$, кВт	$P_{\max}$, кВт	$P_{\text{мед}}$, кВт	$P_{\text{ср}}$, кВт	$P_{\text{ср.кв}}$, кВт	σ , кВт	K_f	K_m	$K_{з.г}$
0	205	1346	762,4	742,6	786,2	258,2	1,059	1,813	0,552
500	0	1346	635,7	634,7	686,9	262,6	1,082	2,121	0,472
1000	0	1346	527,4	533,9	609,9	294,7	1,142	2,521	0,397
2000	0	1346	375,6	397,6	510,8	320,7	1,285	3,385	0,295

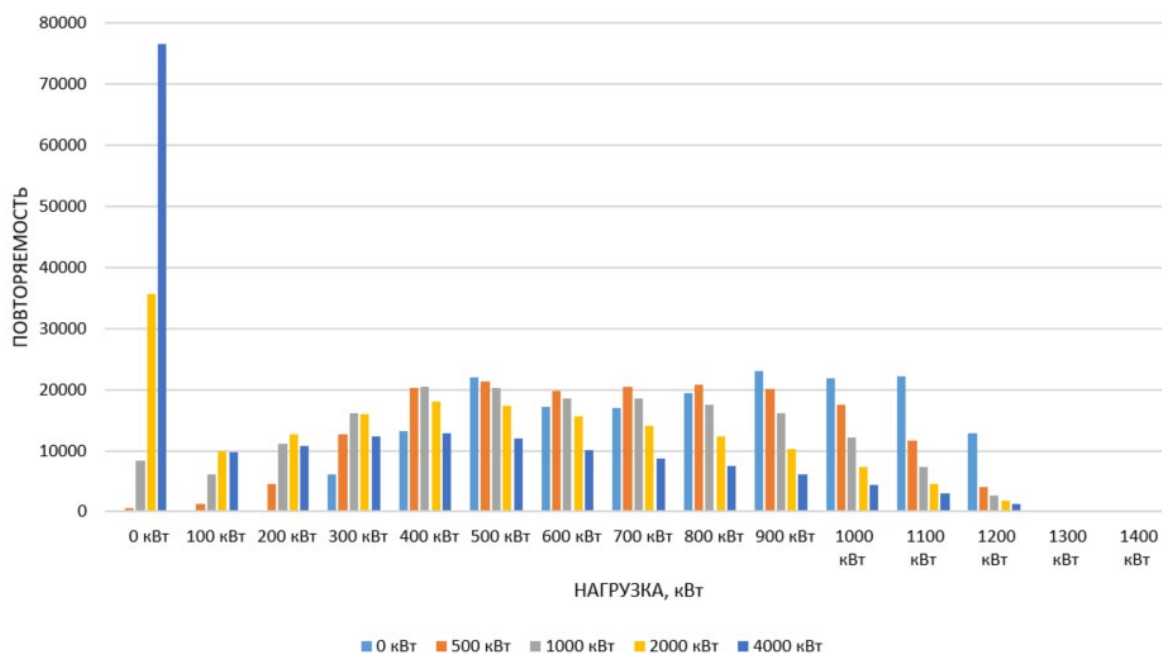


Рис. 3. Повторяемость значений загрузки ДЭС.

Результаты расчётов показывают, что с увеличением установленной мощности ВЭУ снижаются среднеарифметическое, медианное и среднеквадратичное значения загрузки ДЭС. Одновременно наблюдается рост степени колебаний графика загрузки (коэффициент формы), увеличение амплитуды отклонений от среднего значения (коэффициент максимума), а

также снижение равномерности распределения загрузки во времени (коэффициент заполнения графика).

На рисунке 3 представлен график повторяемости загрузки ДЭС с шагом округления 100 кВт.

Интеграция ВЭУ и увеличение ее мощности в ЭТК снижает средний уровень загрузки ДЭС, но увеличивает её неравномерность и количество часов простоя, что требует тщательного подхода к выбору установленной мощности и алгоритмов управления для обеспечения надёжности энергоснабжения.

Источники

1. Suslov K.V. A microgrid concept for isolated territories of Russia. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. – 2012.

2. Aberilla J. M. et al. Design and environmental sustainability assessment of smallscale off-grid energy systems for remote rural communities // Applied Energy. – 2020. – V. 258. – p. 114004.

3. Fathy A., Kaaniche K., Alanazi T. M. Recent approach based social spider optimizer for optimal sizing of hybrid PV/wind/battery/diesel integrated microgrid in aljouf region //IEEE Access. – 2020. – Т. 8. – С. 57630-57645.

4. Sumair M. et al. Wind potential estimation and proposed energy production in Southern Punjab using Weibull probability density function and surface measured data //Energy Exploration & Exploitation. – 2021. – Т. 39. – №. 6. – С. 2150-2168. DOI: 10.1177/0144598720920748.

5. Ramon J. et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2019. – Т. 145. – №. 724. – С. 3236-3251.

6. Лукутин Б. В., Муравлев И. О., Плотников И. А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями //Томск: Изд-во Томского политехнического университета. –2015. –128 с. – 2015.

7. Han J., Chen Z. An inertial control method for large-scale wind farm based on hierarchical distributed hybrid deep-reinforcement learning //Journal of Cleaner Production. – 2024. – Т. 450. – С. 142034.

8. Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 895–908.

9. NASA POWER DAVe [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения 21.04.2025).

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПИЩЕВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ермаков Н. В. ¹, Фомин И.Н. ², Беликов Р.П. ³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «ОГАУ», г. Орёл

¹ErmakovN.14@yandex.ru, ²igor.fom-in@yandex.ru, ³el-ogau@yandex.ru

В статье рассматривается применение ультрафиолетовых технологий в пищевой промышленности для решения проблем микробиологической безопасности, сохранения качества продукции и снижения экономических потерь. УФ-излучение обеспечивает эффективную дезинфекцию, экологичность и интеграцию с производственными процессами.

Ключевые слова: ультрафиолет, технологии, пищевая промышленность, микробиологическая безопасность, обеззараживание.

PROSPECTS OF USING ULTRAVIOLET TECHNOLOGIES IN FOOD PRODUCTION

Ermakov N. V. ¹, Fomin I.N. ², Belikov R. P. ³

FSBEI HE «OSAU», Orel

¹ErmakovN.14@yandex.ru, ²igor.fom-in@yandex.ru, ³el-ogau@yandex.ru

The article discusses the use of ultraviolet technologies in the food industry to solve problems of microbiological safety, preserve product quality and reduce economic losses. UV radiation provides effective disinfection, environmental friendliness and integration with production processes.

Keywords: ultraviolet, technology, food industry, microbiological safety, disinfection.

Современная пищевая промышленность сталкивается с вызовами, связанными с микробиологической безопасностью продукции, сокращением сроков хранения и экономическими потерями из-за порчи продуктов. Традиционные методы дезинфекции, такие как химическая обработка или термическое воздействие, не всегда эффективны, они могут изменять вкус и вид продуктов и оказывать негативное влияние на окружающую среду [1]. В этом случае на помощь приходят ультрафиолетовые технологии, сочетающие высокую бактерицидную эффективность, экологичность и сохранение качества продукции. Ультрафиолетовое излучение, способно разрушать ДНК микроорганизмов, включая бактерии, вирусы, дрожжи и плесени, что

предотвращает их размножение [2, 3]. Ключевым прорывом стали амальгамные УФ-лампы нового поколения, которые превосходят традиционные ртутные аналоги по мощности, сроку службы и безопасности [4].

Ультрафиолетовое излучение, особенно в диапазоне 200–280 нанометров, обладает выраженным бактерицидным эффектом за счёт повреждения ДНК и РНК микроорганизмов, нарушая процессы репликации и транскрипции и делает их нежизнеспособными [3, 5]. Важно правильно подобрать дозу излучения, то есть сколько света нужно и как долго им необходимо светить. Например, чтобы убить плесневые грибы и дрожжи в мясной продукции требуется доза до 200 мДж/см², что в 20-25 раз превышает дозу для большинства бактерий [6].

Для ультрафиолетового облучения быстрозамороженных полуфабрикатов применяются светодиодные осветительные приборы ультрафиолетового излучения. Важным плюсом является возможность плавного управления интенсивности облучения посредством использования ШИМ-драйвера, что позволяет повысить срок хранения готовой продукции и избежать бактериального обсеменения [7].

В мясной отрасли УФ-технологии используются для обеззараживания воздуха, поверхностей оборудования и холодильных камер. Амальгамные лампы мощностью до 500 Вт обеспечивают необходимую интенсивность излучения даже при температурах -18 °С и скорости воздушного потока до 4 м/с [6]. Например, внедрение бактерицидных рециркуляторов на российских предприятиях позволило снизить уровень микробной обсеменённости в 66 раз, что особенно важно для поддержания непрерывной холодильной цепи и предотвращения биообрастаний в системах вентиляции [6].

УФ-обработка молока и сыворотки не только обеспечивает микробиологическую безопасность, но и улучшает функциональные свойства белков. Доза 11,8 мДж/мл вызывает денатурацию сывороточных белков, усиливая их пенообразующие свойства, что полезно при производстве йогуртов и пленочных покрытий. Например, обработка молока дозой 13,87 мДж/мл повышает вязкость йогурта на 45% и предотвращает его расслоение на 60%. Кроме того, УФ-излучение снижает аллергенность на 25%, открывая перспективы для создания гипоаллергенных продуктов [5].

УФ-технологии широко применяются для обеззараживания воды, устраняя патогены без изменения её химического состава. Доза 25 мДж/см² эффективна против SARS-CoV-2, что делает метод актуальным в условиях пандемий [5].

В сельском хозяйстве УФ-обработка семян и плодов подавляет развитие микроорганизмов, продлевая срок хранения. Например, для инактивации бактерий рода *Salmonella enterica*, которые вызывают инфекционные

заболевания сельскохозяйственных и диких животных требуется доза 10–20 мДж/см² [8].

УФ-технологии снижают затраты на хранение и химические дезинфектанты. Например, на мясокомбинатах внедрение УФ-рециркуляторов сократило частоту санитарных обработок с ежедневных до 1 раза в 2–4 дня. Отсутствие токсичных побочных продуктов делает метод экологически безопасным, что соответствует глобальным трендам устойчивого развития [6].

Ультрафиолетовые технологии демонстрируют высокий потенциал в пищевой промышленности, сочетая эффективность, экономичность и экологичность. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию доз излучения для разных продуктов и интеграцию УФ-обработки с другими методами, такими как пастеризация, для максимального сохранения качества и безопасности продукции.

Источники

1. Ультрафиолетовые технологии: практика применения в пищевой промышленности / [Электронный ресурс] // Мясные технологии: [сайт]. — URL: <https://www.meatbranch.com/publ/view/968.html> (дата обращения: 14.05.2025).
2. Использование УФ-излучения в пищевой промышленности / [Электронный ресурс] // LifeJournal: [сайт]. — URL: <https://paraalaex.livejournal.com/12392.html> (дата обращения: 14.05.2025).
3. Колоколова, А. Ю. Исследование возможности применения ультрафиолетового излучения для обработки продуктов питания и сельскохозяйственного сырья от микробиологической порчи / А. Ю. Колоколова // Вестник науки. — 2025. — № 1 (82). — С. 1371-1376.
4. Что такое УФ-излучение и как оно уничтожает микроорганизмы / [Электронный ресурс] // UV-TECH: [сайт]. — URL: <https://www.uv-tech.ru/articles/chto-takoe-uf-izluchenie-i-kak-ono-unichtozhaet-mikroorganizmy/> (дата обращения: 14.05.2025).
5. Рязанцева, К. А. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности / К. А. Рязанцева, Н. Е. Шерстнева // Техника и технология пищевых производств. — 2022. — Т. 52, № 2. — С. 390-406.
6. Технологии УФ-обеззараживания: практика применения / [Электронный ресурс] // НПО «ЛИТ»: [сайт]. — URL: <https://lit-uv.ru/articles/obezzarazhivanie-vozdukha-i-poverkhnostey/tekhnologii-uf-obezzarazhivaniya-praktika-primeneniya/> (дата обращения: 14.05.2025).
7. Тихомирова, С. И. Увеличение сроков годности быстрозамороженных полуфабрикатов посредством обработки УФ излучением / С. И. Тихомирова, Р.

П. Беликов // Профессия инженер : Сборник статей X Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Профессия инженер", посвящённой 40-летию факультета агротехники и энергообеспечения, Орел, 07 апреля 2022 года. – Орел: Орловский государственный аграрный университет им. Н. В. Парахина, 2022. – С. 527-529.

8. Лапшов С. Ультрафиолетовые технологии в пищевом производстве / С. Лапшов [Электронный ресурс] // Независимый портал для специалистов мясной индустрии «Мясной Эксперт»: [сайт]. — URL: <https://meat-expert.ru/articles/446-ultrafioletovye-tekhnologii-v-pishchevom-proizvodstve> (дата обращения: 14.05.2025).

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Колбасов Д.А.¹, Калимуллин Р.И.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
¹ valerprank@gmail.com

В статье рассмотрены основные электронные компоненты, которые способствуют повышению надежности энергетических систем, их функции и особенности применения. Проведено имитационное моделирование для расчета мощностей потерь в полупроводниковых компонентах схемы преобразователя электроэнергии, а также проведен расчет радиатора для них.

Ключевые слова: Энергетические системы, преобразователь энергии, защитное реле, конденсаторы, сенсоры, системы мониторинга, электронные фильтры, безопасность.

ELECTRONIC COMPONENTS THAT ENSURE THE RELIABILITY OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Kolbasov D. A.¹, Kalimullin R. I.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
¹ valerprank@gmail.com

The article discusses the main electronic components that contribute to improving the reliability of energy systems, their functions and application features. Simulation modeling was carried out to calculate the loss capacities in the semiconductor components of the electric power converter circuit, as well as the calculation of the radiator for them.

Keywords: Energy systems, energy converter, protective relay, capacitors, sensors, monitoring systems, electronic filters, safety.

В современном мире энергетические системы играют ключевую роль в обеспечении стабильности и устойчивости экономики. Надежность этих систем напрямую зависит от качества и характеристик используемых в них устройств и компонентов [1].

Важную часть электроэнергетических систем составляют различные преобразователи электроэнергии: инверторы и преобразователи частоты и числа фаз, управляемые и неуправляемые выпрямители, активные корректоры коэффициента мощности и т. д. Их функцией является обеспечение электрической энергией с необходимыми параметрами и стабильностью при минимальных потерях и надежностью работы. Так же

следует заметить, что современные преобразователи оснащаются функциональной защитой от перенапряжений, перегрузки по току и короткого замыкания, которые поднимают надежность на новый уровень.

Надежность работы таких систем обеспечивается выбором качественных современных электронных компонентов, обладающих характеристиками, приближенными к «идеальным» [2]. Так, для полупроводниковых компонентов, работающих в импульсном режиме, что характерно для преобразователей электроэнергии, должны быть характерны нулевое сопротивление в открытом состоянии (соответственно, нулевые падение напряжения и потери мощности) и бесконечное сопротивление в закрытом состоянии (соответственно, нулевые ток и потери мощности). При этом время коммутации, в течение которого ток и напряжение меняют свои значения в больших пределах, а значит, и их произведение – мощность будет ненулевым, также должно стремиться к нулю для минимизации данной составляющей потерь.

Реальные компоненты лишь до определенной степени приближаются по своим свойствам к идеальным, причем степень «идеальности» во многом зависит от области применения (диапазона рабочих напряжений, токов, частоты коммутации). Поэтому в задачу разработчика преобразователей электроэнергии входит выбор оптимальных для данной конкретной схемы электронных компонентов.

Надежность работы полупроводниковых компонентов сильно зависит от степени запаса по максимально достигаемым параметрам (т. е. от отношения максимально допустимого значения, например, напряжения или тока к значениям, достигаемым в процессе работы). Чем выше данный запас, тем (нелинейно) выше время наработки на отказ. Но в то же время, выбор приборов с более высоким классом по напряжению или току влечет ухудшение других параметров прибора, например, быстродействия, потерь мощности и, как следствие, повышение рабочей температуры структуры прибора, ведущей к ускоренной деградации свойств и уменьшению срока его службы [3]. Поэтому выбор полупроводниковых приборов по их максимальным параметрам становится сложной многопараметрической задачей, требующей применения современных вычислительных средств. Современные программы схемотехнического моделирования позволяют проводить многовариантный анализ для различных условий, что облегчает выполнение данной инженерной задачи [4].

Нами было проведено схемотехническое моделирование в программной среде *Micro-Cap 12*, в результате которого были получены значения мощности потерь в полупроводниковых компонентах схемы

преобразователя постоянного напряжения (рис. 1) для различных режимов его работы (при различных значениях коэффициента заполнения импульса) (рис. 2).

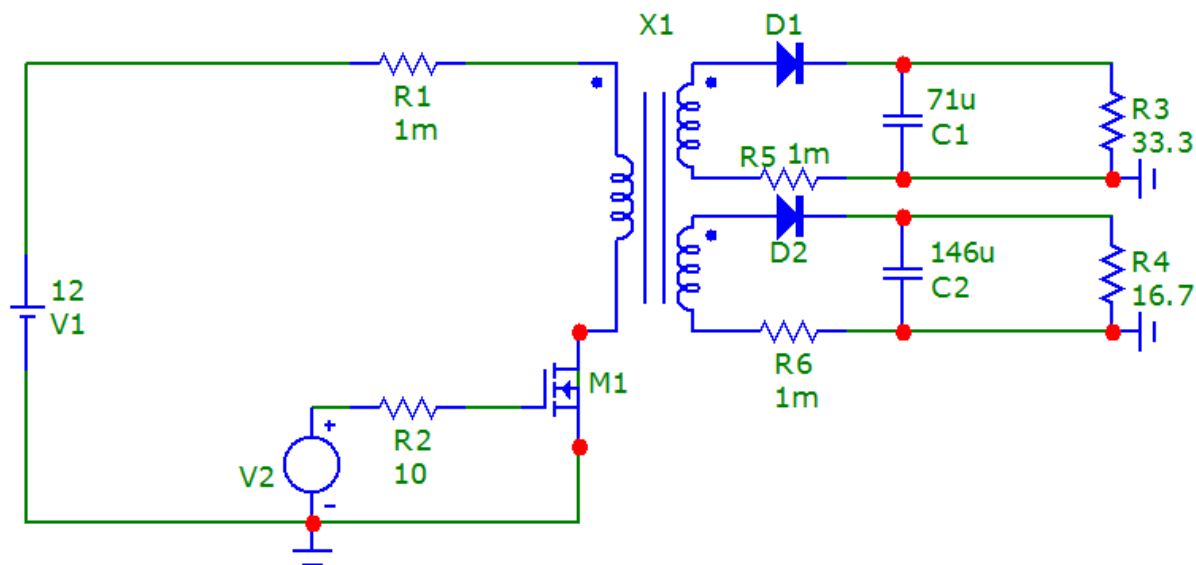


Рис. 1. Схема преобразователя постоянного напряжения в интерфейсе программы Micro-Cap 12

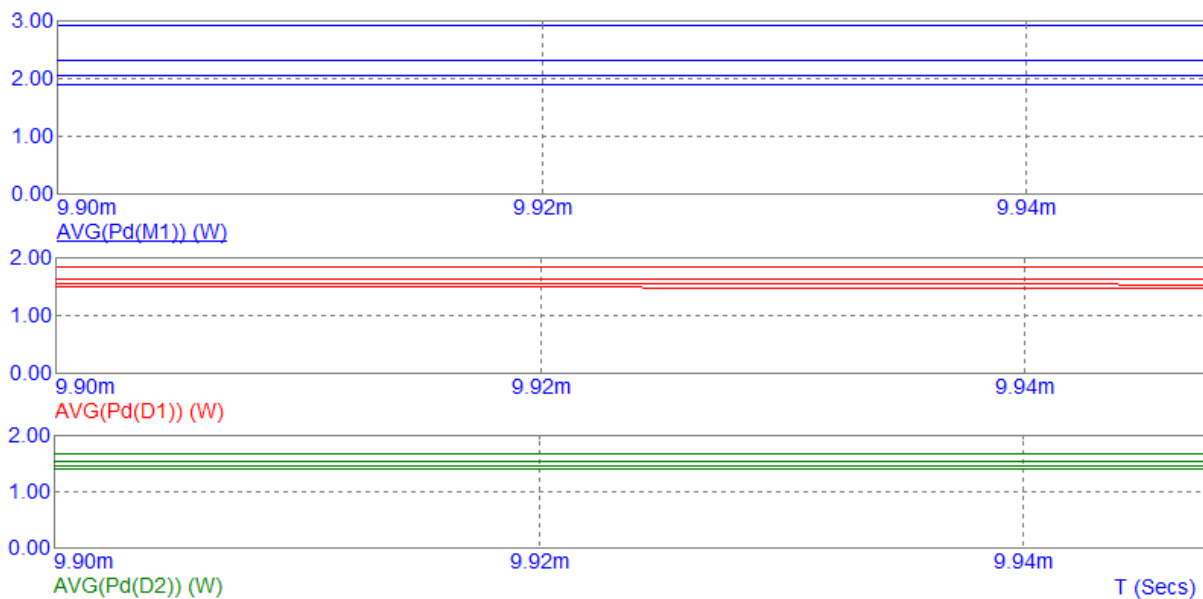


Рис. 2. Фрагмент временных диаграмм мощностей, рассеиваемых в полупроводниковых компонентах преобразователя, при различных длительностях импульса

К критически важным компонентам, обеспечивающим безопасность и надежность энергетической системы, относятся защитные реле. Эти устройства работают по простому принципу, который заключается в размыкании цепи или, наоборот, ее замыкании в случае аварийного превышения напряжения или тока. Современной альтернативой традиционным электромеханическим пускателям и контакторам являются

твердотельные реле [5]. Их ключевым отличием является отсутствие движущихся и трущихся элементов, а само устройство работает на полупроводниковых приборах – транзисторах и тиристорах. Структура такого прибора состоит из следующих основных компонентов:

- вход (начало цепи, отвечающее за прием и передачу сигнала);
- триггерная цепочка (может быть как отдельной, так и имеющей связь с оптроном в реле);
- гальваническая оптическая развязка (обеспечивает электрическую изоляцию между входными и выходными сигналами и определяет, как будет работать коммутация);
- переключающая цепь (передает разность потенциалов в нагрузку);
- цепь защиты (бывает снаружи или внутри устройства, и предохраняет от ошибок).

К плюсам твердотельных реле можно отнести скорость и гарантию срабатывания, что является критическим пунктом в обеспечении безопасности, небольшие размеры и малое потребление, что хорошо сказывается на экономичности, возможность его использования во взрывоопасных местах, а также устойчивость к физическому воздействию, что расширяет круг применения данного устройства.

Поскольку твердотельные реле суть те же полупроводниковые компоненты, надежность и долговечность эксплуатации этих устройств, равно как и полупроводниковых компонентов схем преобразователей электроэнергии, во многом определяются тепловым режимом работы. Последнее прямо зависит от эффективности теплоотвода рассеиваемой в полупроводниковом компоненте мощности в окружающую среду, т. е. эффективности системы охлаждения (радиатора). Она определяется типом охлаждения (естественное или принудительное воздушное, жидкостное), материалом радиатора (его теплопроводностью) и даже пространственной ориентацией радиатора [6].

Мы провели расчеты радиатора для полупроводниковых компонентов преобразователя постоянного напряжения по результатам потерь мощности, полученных при его моделировании. Варьировались материал радиатора и состояние его поверхности, пространственная ориентация радиатора.

Электронные компоненты играют важную роль в надежности работы электроэнергетических систем. Вложения в качественные электронные компоненты и схемы защиты на их основе будут залогом устойчивого и безопасного развития энергетических систем.

Источники

1. Грачева Е.И., Денисова Н.В., Иванов В.О. Надежность электроэнергетических систем и их объектов. Казань: КГЭУ, 2011. 162 с.
2. Пикалин Ю.А., Сергеев Б.С., Бондаренко А.В. Повышение надежности функционирования силовых преобразователей электрической энергии железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2018. № 3 (58). С. 55-57.
3. Калимуллин Р.И. Силовые полупроводниковые ключи: Учебное пособие. Казань: КГЭУ, 2005. 147 с.
4. Родин М.В. Схемотехническое моделирование источников электропитания: Учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 146 с.
5. Василенко А. Современные тенденции развития твердотельных реле // Силовая электроника. 2010. № 27. С. 12-18.
6. Медведев В.А., Чапурина А.С. Расчет нагрева мощных полупроводниковых приборов при воздушном охлаждении // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 74-80.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЦЕН НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ КАЗАХСТАНСКОЙ ЭКОНОМИКИ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Калыев Т.А.¹, Нешина Е.Г.²

^{1,2} КарТУ им. Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан
veylak@yandex.ru

В статье представлен корреляционно-регрессионный анализ взаимосвязи между ценами на электроэнергию и энергоемкостью валового внутреннего продукта Республики Казахстан. В качестве исходных данных использованы статистические показатели за период 2010–2020 гг. Построены уравнения регрессии, рассчитаны коэффициенты эластичности, демонстрирующие обратную зависимость между ростом цен на электроэнергию и снижением энергоемкости.

Ключевые слова: энергоемкость, электроэнергия, регрессионный анализ, коэффициент эластичности, Smart Grid, энергоэффективность.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ELECTRIC ENERGY PRICES ON KAZAKHSTAN ECONOMY ENERGY INVOLVEMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Kalyev T. A.¹, Neshina Ye. G.²

^{1,2} KarTU, Karaganda, Republic of Kazakhstan
veylak@yandex.ru

The article presents a correlation-regression analysis of the relationship between electricity prices and energy intensity of the gross domestic product of the Republic of Kazakhstan. Statistical indicators for the period 2010-2020 are used as initial data. Regression equations are constructed, elasticity coefficients are calculated, demonstrating the inverse relationship between the growth of electricity prices and the reduction of energy intensity.

Keywords: energy intensity, electricity, regression analysis, elasticity coefficient, Smart Grid, energy efficiency.

Высокая энергоемкость казахстанской экономики замедляет ее национальный экономический рост и угрожает экономической безопасности страны. В связи с этим общая проблема повышения энергоэффективности и, в частности, анализа взаимосвязи между энергетическими требованиями охраны окружающей среды. Основным показателем энергоэффективности является

удельное потребление энергии на единицу полезного продукта ВВП во всех сферах человеческой деятельности. Применительно к национальной и региональной экономике таким показателем является энергоемкость валового внутреннего продукта и валового регионального продукта. Энергоэффективность – необходимое условие конкурентоспособности стран в мировой экономике, выполнение которого обеспечивается внедрением современных технологий, модернизацией всех сфер экономической деятельности, экологии, образа жизни и мышления каждого человека. Энергетическое благополучие и устойчивый экономический рост – взаимосвязанные и взаимозависимые процессы. Анализ долгосрочных тенденций развития мировой экономики показывает, что в перспективе до 2050 года следует ожидать перехода энергетического сектора в новое качественное состояние, связанное с неуклонным ростом энергоэффективности. Быстрый рост энергоэффективности достигается такими путями, как интеграция энергетики с другими высокотехнологичными отраслями и переход к универсальному производству энергии, в том числе в повседневной жизни [1].

В странах с развитой рыночной экономикой национальные программы повышения энергоэффективности реализуются уже более тридцати лет, поэтому в них наблюдается энергоэффективный экономический рост. На 1 % прироста валового внутреннего продукта приходится не более 0,4 % прироста энергопотребления. В Казахстане, в соответствии с мировой практикой, уже более пяти лет повышение эффективности использования энергии считается приоритетом национальной экономической политики. Количественным показателем достижения необходимого уровня энергоэффективности казахстанской экономики должно стать удельной энергоемкости ВВП на 50% в период с 2015 по 2050 год. С 2015 года Казахстан предпринял важные шаги по созданию правовой и институциональной базы для повышения энергоэффективности. В июне 2015 года был опубликован Указ Президента Республики Казахстан "О мерах по повышению энергетической эффективности". В соответствии с ним Министерство энергетики Республики Казахстан разработало план мероприятий по повышению эффективности использования энергоресурсов во всех секторах экономики, который включает в себя постановку целей и определение мер по их достижению, разработку современной нормативно-правовой базы и создание организационной структуры.

В Государственном докладе об энергосбережении и повышении энергетической эффективности на 2020 год отмечается, что наиболее значимыми факторами снижения энергоемкости ВВП на 2010-2020 годы стали экологические и технологические факторы. При этом не только

энергоёмкости влияет на экономический рост, но и сам экономический рост является фактором снижения или повышения энергоэффективности. В 1990-е годы из-за трансформационного спада экономики крупные промышленные предприятия работали не на полную мощность и для поддержания оборудования в рабочем состоянии потребляли большие базовые объёмы электроэнергии, не связанные напрямую с объёмами производства, что вызвало рост энергоёмкости валового продукта. В 2000-х годах, ставших периодом экономического подъёма, когда среднегодовые темпы роста ВВП составляли 5-6%, наблюдалось монотонное снижение электроёмкости ВВП в среднем на 3,1 % в год. Это было обусловлено не столько повышением эффективности использования энергоресурсов, сколько увеличением загрузки мощностей и снижением соответствующих затрат на электроэнергию [2].

Традиционно нефтяная, газовая и угольная промышленность являются драйверами экономики Казахстана, а уголь – основным первичным источником энергии. Считается, что уровень обеспеченности электроэнергией влияет на скорость внедрения технологических инноваций и модернизации оборудования у потребителей. Проведено исследование зависимости энергоёмкости экономики от внутренних цен на электроэнергию. В качестве математического подхода использован метод корреляционно-регрессионного анализа. В качестве результативного фактора взята энергоёмкость валового внутреннего продукта, в качестве независимых переменных обозначены средняя оптовая цена на электроснабжение промышленности и средняя оптовая цена на электроснабжение населения. Для каждого фактора представлены выборки с фактическими значениями за 2010-2020 годы, каждая выборка содержит 20 значений. Коэффициент корреляции Пирсона – показатель линейной корреляции между двумя переменными. Он рассчитывается с помощью формулы (1), в которой x представляет независимую переменную, а y – зависимую переменную.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}; \quad (1)$$

Полная зависимость между двумя переменными выражается либо -1, либо +1, а 0 означает полную независимость переменных. Корреляционный анализ Пирсона использовался во многих исследованиях для изучения корреляции между индексами засухи, а также их взаимосвязи с урожайностью пшеницы. Корреляционный анализ выявил высокую обратную линейную зависимость [3].

Получено уравнение регрессии, ставящее энергоёмкость ВВП обратной линейной зависимостью от цен на электроэнергию для

промышленности и населения. Полученные значения коэффициентов регрессии позволяют записать уравнение регрессии в виде следующих четырех:

$$y = 185,10 - 0,019x_1 - 0,002x_2. \quad (2)$$

Уравнение имеет следующий смысл: увеличение цены на электроснабжение промышленности на 2,5 тенге за 1 кВт приводит к снижению энергоемкости ВВП на 0,012 кг/47 000 тенге, а увеличение цены на электроснабжение населения на 2,5 тенге за 1 кВт приводит к снижению энергоемкости ВВП на 0,005 кг на 47 000 тенге. Обратная зависимость означает, что увеличение цены на электроснабжение приводит к снижению энергоемкости ВВП. В модели присутствует достаточно сильное влияние всех остальных модели факторов, влияющих на энергоемкость ВВП.

В экономической интерпретации уравнений регрессии часто используются коэффициенты эластичности, отражающие, сколько процентов в среднем значение эффективного показателя изменится при изменении соответствующего факторного показателя на 1% [4]:

$$\mathcal{E}_{xy} = -0,03. \quad (3)$$

Т.е. при увеличении цены на электроэнергию для промышленности на 1% энергоемкость ВВП снизится на 0,5%, а при увеличении цены на электроэнергию для населения на 1% энергоемкость ВВП снизится на 0,04%. В Казахстане разработаны показатели для мониторинга и оценки перехода к низкоуглеродной системе, включая загрязнение воздуха. В период с 1990 по 2020 год основная доля выбросов загрязняющих веществ в стране приходится на диоксид серы. Объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферу составил 4649,9 тонн в 1990 году и 2896,6 тонн в 2020 году. За последние 15 лет на долю Казахстана приходится около 1% глобальных выбросов углерода, при этом наблюдается снижение общего объема выбросов углерода (Рисунок 1) и выбросов углерода на душу населения (Рисунок 2). Общий объем выбросов в 2020 году составил 47% от общего объема выбросов 1990 года. Следует также учитывать специфику казахстанской экономики, которая в основном основана на промышленности, в результате чего страна производит больше производственных выбросов углерода в отличие от развитых стран с выбросами, основанными на потреблении, и экономикой, основанной на услугах [5].

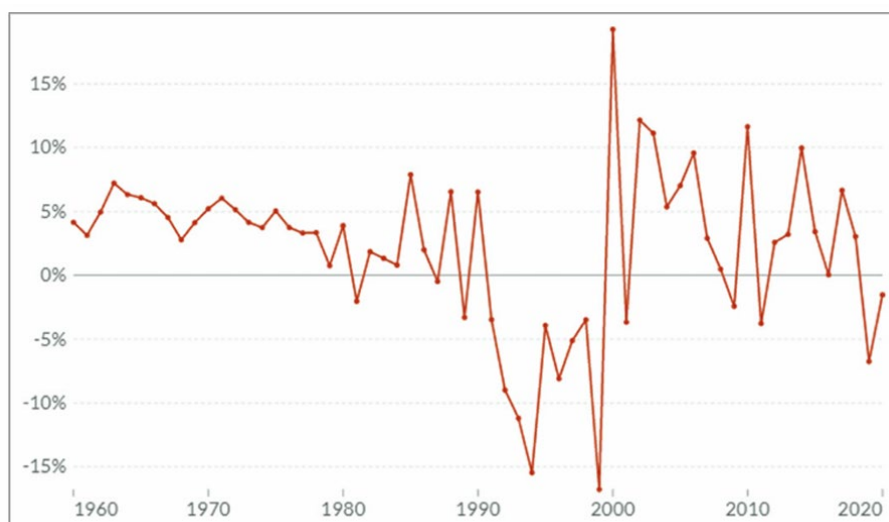


Рис. 1. Годовое процентное изменение выбросов CO₂, Казахстан

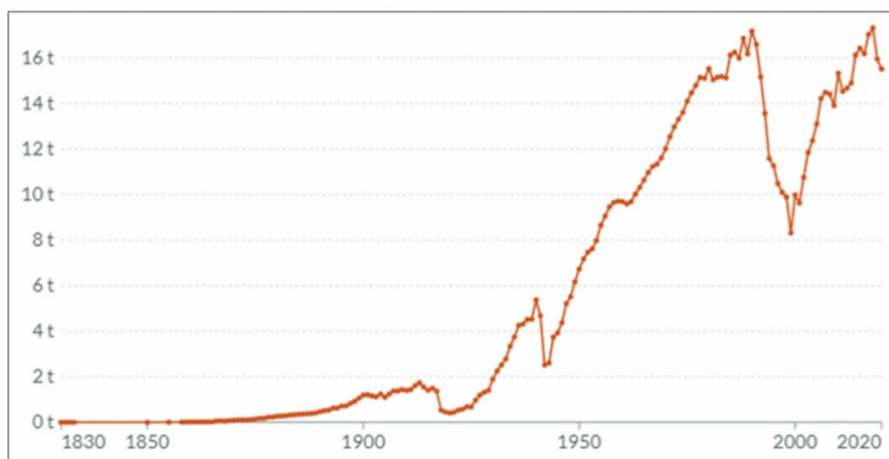


Рис. 2. Выбросы CO₂ на душу населения, Казахстан

Расчет коэффициентов эластичности показал, что цена электроснабжения для промышленности является в 10 раз более значимым фактором для показателя энергоемкости ВВП, чем цена электроснабжения для населения. Учитывая, что Казахстан – географически большая страна с неэффективной системой передачи и распределения электроэнергии, применение технологических платформ Smart Grid представляется решением проблемы для страны. Помимо решения задач снижения нагрузки на окружающую среду, сокращения энергодефицита за счет использования возобновляемых источников энергии, повышения качества и надежности работы энергосистемы, в концепции Smart Grid прослеживается еще один очень важный аспект: Smart Grid является катализатором экономического роста. Реализация положений данной концепции предполагает развитие инновационных технологий, расширение масштабов производства высокоинтеллектуальной продукции, более интенсивное использование электроэнергии в инфраструктуре Wansport, развитие новых рыночных

отношений с вовлечением потребителей в энергетический сектор в качестве активных участников рынка, в частности возможность продавать электроэнергию, используя локальные генерирующие источники. Благодаря реализации концепции Smart Grid у Казахстана есть шанс выйти на новый этап экономического развития, который будет характеризоваться гармоничным взаимодействием с окружающей средой, улучшением качества жизни и общим экономическим подъемом. Это выглядит амбициозно, но отнюдь не фантастично. И это вряд ли противоречит отечественным взглядам на развитие энергетики и страны в целом.

В условиях устойчивого экономического развития Республики Казахстан особую актуальность приобретает проблема высокой энергоемкости экономики, которая негативно сказывается на темпах роста и уровне конкурентоспособности страны. В данной работе рассмотрены ключевые аспекты влияния цен на электроэнергию на показатель энергоемкости ВВП, что представляет практический интерес в контексте реализации государственной политики по повышению энергоэффективности.

Новизна проведенного исследования заключается в использовании метода корреляционно-регрессионного анализа для количественной оценки зависимости между внутренними ценами на электроэнергию (как для промышленности, так и для населения) и энергоемкостью экономики. Полученные регрессионные уравнения и рассчитанные коэффициенты эластичности позволили установить наличие обратной связи между ростом цен на энергоресурсы и снижением энергоемкости, а также определить степень влияния каждого из факторов.

Личный вклад автора выражается в самостоятельной обработке статистических данных за 2010–2020 годы, построении математических моделей, интерпретации полученных результатов, а также формулировке выводов, ориентированных на практическое применение. В работе предложено рассматривать повышение ценовой эффективности электроснабжения как инструмент не только экономической, но и экологической трансформации национальной экономики [6].

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов при разработке стратегий энергетической модернизации, а также в обосновании необходимости внедрения технологий Smart Grid. Эти технологии способны обеспечить как снижение энергоемкости, так и рост качества и надежности энергоснабжения в масштабах страны.

Перспективы использования полученных результатов связаны с реализацией положений Энергетической стратегии Казахстана до 2050 года, в том числе в части развития интеллектуальной энергетической

инфраструктуры, стимулирования инвестиций в энергосбережение и повышения роли потребителей как активных участников энергетического рынка. Настоящее исследование может служить аналитической основой для дальнейших научных и прикладных работ в сфере энергоэффективности и устойчивого развития.

Источники

1. Указ Президента Республики Казахстан от 19 июня 2015 года «О мерах по повышению энергетической эффективности». – Астана, 2015.
2. Министерство энергетики РК. Государственный доклад «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности в Республике Казахстан за 2020 год». – Астана, 2021.
3. Министерство энергетики РК. Энергетическая стратегия Республики Казахстан до 2050 года. – Астана, 2014.
4. Коныров Е.З., Салимгареев М.Ш. Энергоэффективность экономики Казахстана: тенденции и перспективы развития // Экономика и статистика. – 2019. – № 2. – С. 45–52.
5. Сапаров А.К., Ахметов Е.А. Влияние тарифной политики на потребление электроэнергии в Казахстане // Энергетика и промышленность России. – 2020. – № 11. – С. 17–21.
6. Есимов К.А. Потенциал внедрения интеллектуальных энергетических систем (Smart Grid) в условиях казахстанской экономики // Вестник КазНТУ. – 2021. – № 3(145). – С. 66–70.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНЦЕВЫХ КАБЕЛЬНЫХ МУФТ 110–220 КВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА: АНАЛИЗ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Киселев А.Ю.¹, Васильев П.Ф.²

^{1,2} ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова», г. Якутск, Россия

rs_art@mail.ru

В статье рассматриваются проблемы эксплуатации концевых кабельных муфт 110–220 кВ в условиях Крайнего Севера на примере Республики Саха (Якутия). Анализируются причины частых повреждений муфт с жидким диэлектриком при экстремально низких температурах (до -60°C) и резких температурных перепадах. Установлено, что основной причиной пробоев является нарушение распределения электрического поля на границе токоведущей жилы и изоляции из-за термической деформации стресс-конуса. Предложены технические решения, включающие модификацию конструкции муфт с подогревом или их размещение в отапливаемых энергоэффективных сооружениях.

Ключевые слова: кабельно-воздушные ЛЭП, концевая кабельная муфта, электрическая прочность, экстремальные температуры, стресс-конус, пробой изоляции.

OPERATIONAL EXPERIENCE OF TERMINAL CABLE COUPLINGS 110-220 KV IN THE FAR NORTH: ANALYSIS OF DAMAGE CAUSES AND WAYS TO IMPROVE RELIABILITY

Kiselev A. Yu.¹, Vasil'yev P. F.²

^{1,2} NEFU, Yakutsk, Russia

rs_art@mail.ru

The article discusses the problems of operation of 110–220 kV terminal cable couplings in the Far North using the example of the Republic of Sakha (Yakutia). The causes of frequent damage to couplings with a liquid dielectric at extremely low temperatures (up to -60°C) and sudden temperature fluctuations are analyzed. It has been established that the main cause of breakdowns is a violation of the distribution of the electric field at the boundary of the conductor and insulation due to thermal deformation of the stress cone. Technical solutions are proposed, including modification of the design of heated couplings or their placement in heated energy-efficient structures.

Keywords: overhead cable lines, terminal cable coupling, electrical strength, extreme temperatures, stress cone, insulation breakdown.

Кабельно-воздушные линии электропередачи (ЛЭП) широко применяются в энергосистемах, особенно в условиях плотной городской застройки и сложного рельефа. Однако в регионах с экстремальным климатом, таких как Крайний Север, эксплуатация высоковольтных кабельных муфт сопровождается повышенным риском повреждений.

В Республике Саха (Якутия) температура зимой может опускаться до -60°C с резкими суточными колебаниями до -35°C , что приводит к деградации изоляционных материалов и нарушению работы концевых муфт. В период 2021–2023 гг. зафиксировано несколько аварийных отключений, связанных с пробоями муфт 110–220 кВ, что ставит под угрозу надежность электроснабжения.

Цель исследования – анализ причин повреждений концевых муфт в условиях Крайнего Севера и разработка технических решений для повышения их надежности.

Концевые муфты с жидким диэлектриком, применяемые в Якутии, не рассчитаны на длительное воздействие сверхнизких температур. Исследования показали, что при -50°C и ниже происходят следующие процессы:

- изменение вязкости диэлектрика, приводящее к ухудшению изоляционных свойств, в ряде случаев – к его затвердеванию;
- термическая деформация стресс-конуса из-за разницы коэффициентов теплового расширения силикона и сшитого полиэтилена (XLPE);
- снижение давления изоляции на границе раздела материалов стресс-конуса и изоляции кабеля из сшитого полиэтилена, что увеличивает риск частичных разрядов.

Анализ поврежденных кабельных систем (рис. 1, 2) и данные литературных источников [1–5] позволили установить, что пробой происходит на границе токоведущей жилы и основной изоляции.

Это связано с:

1. Нарушением распределения напряженности электрического поля из-за деформации стресс-конуса.
2. Образованием микротрещин в полимерных материалах при резких температурных перепадах.
3. Локализацией разрядов в зоне ослабленного контакта между изоляционными слоями.

Экспериментальные исследования [3] подтвердили, что при -40°C электрическая прочность изоляции снижается на 20–30% по сравнению с нормальными условиями.

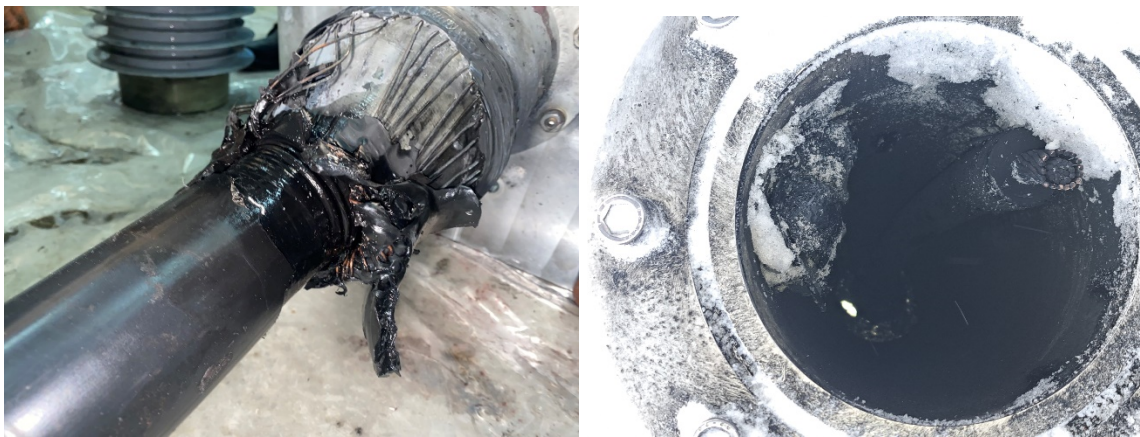


Рис. 1. Поврежденная кабельная система 110 кВ после эксплуатации при -55°C (слева – следы повреждения экрана, изоляции и оболочки кабеля, справа – поврежденная муфта изнутри)

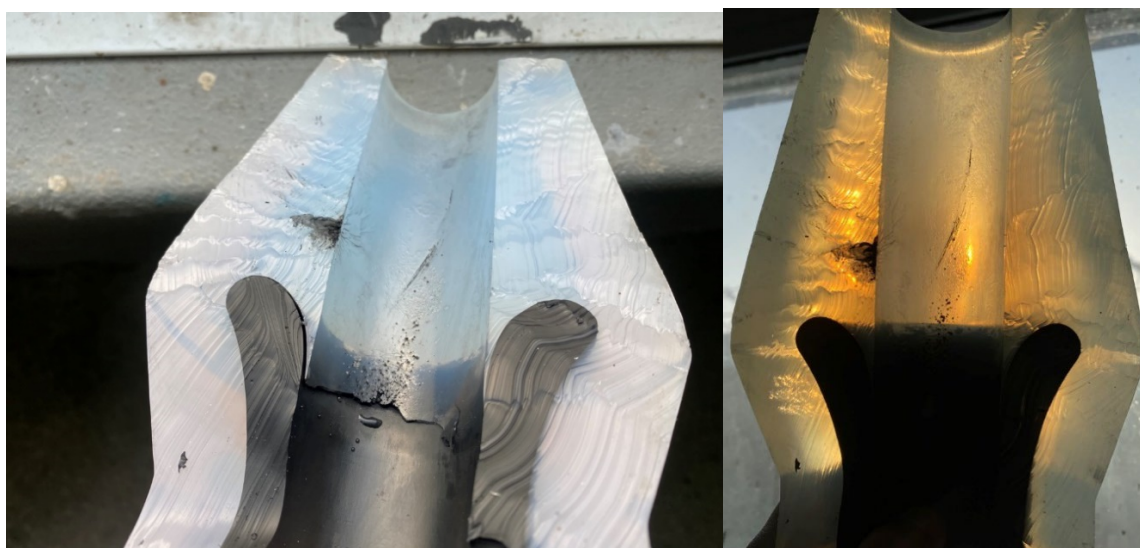


Рис. 2. Поврежденный стресс-конус концевой муфты 110 кВ после эксплуатации при -55°C в разрезе

Для повышения устойчивости муфт к низким температурам предлагается:

- Использование композитных материалов с близкими коэффициентами теплового расширения.
- Встроенный подогрев муфты с автоматической терморегуляцией.
- Применение диэлектриков с высокой морозостойкостью.

В наиболее критичных условиях (например, при -60°C) возможно:

- Размещение муфт в обогреваемых боксах с поддержанием температуры не ниже $+5^{\circ}\text{C}$.
- Использование термоизолированных кабельных коробов с активным обогревом.

Проведенный анализ показал, что основной причиной повреждений концевых муфт 110–220 кВ в Якутии является деградация изоляционных материалов при экстремально низких температурах. Для повышения

надежности необходимо:

1. Усовершенствовать конструкцию муфт с учетом температурных деформаций.
2. Интегрировать в муфты системы активного терморегулирования.
3. Рассмотреть вариант размещения муфт в отапливаемых сооружениях.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на испытания новых материалов и разработку стандартов для арктических условий, а также методик испытаний кабельных систем на устойчивость к экстремально низким температурам, в том числе с проверкой на совместимость применяемых изоляционных материалов.

Источники

1. Исследование электрической прочности высоковольтных муфт при воздействии низких температур // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 6(87). – С. 84–88. [Электронный ресурс]. URL: <https://eepir.ru/article/issledovanie-elektricheskoy-prochnosti-vysokovoltnyh-kabelnyh-muft-pri-vozhdeystvii-nizkih-temperatur/> (дата обращения: 03.04.2025).

2. Zhang J., Wang W., Cheng L., Wang H., Liu J. Breakdown mechanism Analysis of Silicone Oil Flocculation in XLPE Cable Terminations // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1176. – С. 062065. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/331902486_Breakdown_mechanism_Analysis_of_Silicone_Oil_Flocculation_in_XLPE_Cable_Terminations. DOI: 10.1088/1742-6596/1176/6/062065 (дата обращения: 03.04.2025).

3. Zhang J., Li Z., Wang W. Influence of stress cone location on the electric field distribution in HV cable terminal under impulse voltage. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/290595060_Influence_of_stress_cone_location_on_the_electric_field_distribution_in_HV_cable_terminal_under_impulse_voltage (дата обращения: 03.04.2025).

4. Mauseth, Frank & Hvidsten, Sverre & Birkenes, Geir. (2012). Water Ingress in High-Voltage Cross-Linked Polyethylene (XLPE) Cable Terminations. Electrical Insulation Magazine, IEEE.

5. Киселев А.Ю., Львов А.П. Об опыте эксплуатации концевых кабельных муфт напряжением 110-220 кВ в условиях Крайнего Севера // Электрические станции. — № 5, 2025. С.14-23.

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕГРАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ 110- 750 КВ

Коновалова Д. А.¹, Коновалов И. А.², Карамов Д. Н.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск, Россия

¹darya.shagdyr@mail.ru, ²ik.2400@mail.ru

В статье рассматриваются технические аспекты интеграции фотоэлектрических систем в электрические сети высокого напряжения (110-750 кВ). Основное внимание уделяется проблемам, возникающим при внедрении крупномасштабных солнечных станций в энергосистему, включая вопросы устойчивости работы, качества электроэнергии и управления выработкой. Исследуются ключевые факторы, влияющие на успешную интеграцию фотоэлектрических установок: размер и расположение станций, тип ресурсов, наличие резерва в системе, методы диспетчеризации и компенсации реактивной мощности. Особое внимание уделяется проблемам стабильности напряжения, частоты и качества электроэнергии при подключении солнечных станций.

Авторы анализируют влияние погодных условий на работу фотоэлектрических систем, рассматривая как глобальные (изменение положения солнца), так и локальные факторы (движение облаков). Показано, что географическое разнообразие расположения солнечных станций способствует сглаживанию колебаний выходной мощности. В работе подчеркивается необходимость разработки единых международных стандартов для крупномасштабных фотоэлектрических установок, что позволит производителям создавать универсальное оборудование. Также отмечается важность комплексного подхода к решению проблем стабильности энергосистемы при высокой доле солнечной генерации. Результаты исследования могут быть полезны для разработчиков энергетических систем, специалистов в области возобновляемой энергетики и лиц, принимающих решения в сфере энергетического планирования.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические системы, солнечная генерация, распределительные сети, солнечные панели, возобновляемая энергия.

TECHNICAL ASPECTS OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM INTEGRATION IN THE 110-750 KV ELECTRIC GRID

Konovalova D. A.¹, Konovalov I. A.², Karamov D. N.³

^{1,2,3} ISTU, Irkutsk, Russia

¹darya.shagdyr@mail.ru, ²ik.2400@mail.ru

The article discusses the technical aspects of the integration of photovoltaic systems into high-voltage electric networks (110-750 kV). The focus is on the problems that arise when large-scale solar plants are integrated into the power grid, including issues of sustainability, power quality, and generation management. The key factors influencing the successful integration of photovoltaic installations are investigated: the size and location of stations, the type of resources, the availability of reserves in the system, methods of dispatching and reactive power compensation. Special attention is paid to the problems of voltage stability, frequency and quality of electricity when connecting solar plants.

The authors analyze the influence of weather conditions on the operation of photovoltaic systems, considering both global (changes in the position of the sun) and local factors (movement of clouds). It is shown that the geographical diversity of the location of solar stations helps to smooth out fluctuations in output power. The paper highlights the need to develop common international standards for large-scale photovoltaic installations, which will allow manufacturers to create universal equipment. The importance of an integrated approach to solving the problems of stability of the energy system with a high proportion of solar generation is also noted. The results of the study can be useful for energy system developers, renewable energy specialists and decision makers in the field of energy planning.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic systems, solar generation, distribution networks, solar panels, renewable energy.

Использование солнечных фотоэлектрических панелей стало одним из наиболее перспективных возобновляемых источников энергии для массового производства электроэнергии. При сохранении нынешних темпов ввода в эксплуатацию фотоэлектрическая энергетика приведет к изменению некоторых аспектов энергосистемы и может повлиять на стабильность её работы. Исторически фотоэлектрические установки были небольшими и распределёнными. До 2009 года большинство фотоэлектрических установок подключались на уровнях 6-10 кВ, либо ко вторичной стороне местных распределительных трансформаторов, либо к системам первичного распределения. Однако после установки первой в истории фотоэлектрической установки общего назначения 230 кВ в США в Центре солнечной энергетики Desoto во Флориде [1] интерес к крупномасштабным солнечным станциям возрос.

На данный момент крупнейшей солнечной фотоэлектрической станцией является Nabr Solar Park мощностью 4 ГВт. Солнечный парк занимает площадь 298 квадратных километров. Для передачи мощности такого объема станция подключена к сети переменного напряжения 750 кВ [2, 3].

При интеграции фотоэлектрических установок в сеть напряжением 110 кВ-750 кВ ученые столкнулись с рядом проблем, оказывающих влияние на устойчивость работы электроэнергетической системы, на качество передаваемой электрической энергии и планированием режима. При внедрении солнечных станций в систему существует проблема управления выработкой электрической энергии, так как она напрямую зависит от погодных условий.

В данной статье собраны материалы, которые описывают и раскрывают все трудности интеграции фотоэлектрических панелей в электроэнергетические системы, что подтверждает актуальность данной темы.

В статье [4] рассматриваются технические проблемы, в частности, проблемы устойчивости, связанные с интеграцией крупномасштабных фотоэлектрических систем в энергосистему. Дело в том, что энергосистема сталкивается не только с неконтролируемым спросом на электрическую энергию, но также и с неконтролируемой генерацией. Например, резкое изменение мощности фотоэлектрических систем из-за движущихся облаков. Другая проблема заключается в том, что фотоэлектрические системы не обладают инерцией и интеграция такой системы снизит инертность системы. Снижение инертности системы плохо сказывается на устойчивости системы, так как потребуется больше энергии на восстановление угловой разницы между генераторами. Кроме того, другим важным аспектом интеграции фотоэлектрических станций в энергосистему является то, что большинство действующих стандартов предполагают, что фотоэлектрические станции должны работать в режиме ограниченной реактивной мощности или не должны активно участвовать в регулировании напряжения или компенсации реактивной мощности. Отсутствие компенсации реактивной мощности является насущной проблемой в случаях интеграции фотоэлектрических систем в сети высокого напряжения, что может привести к проблемам регулирования напряжения и устойчивости. Авторы указывают на то, что солнечные фотоэлектрические станции с различным уровнем интеграции влияют на четыре основных параметра: стабильность напряжения; стабильность угла наклона ротора; малая стабильность сигнала и на стабильность частоты.

Главным выводом работы является то, что крупномасштабные фотоэлектрические установки являются перспективным источником энергии благодаря своей чистоте и экологической безопасности. Однако они могут оказывать негативное влияние на энергосистему, в частности, на её стабильность. Среди факторов, которые влияют на это, можно выделить следующие:

- размер и расположение фотоэлектрических установок;
- тип фотоэлектрических ресурсов (распределённые или централизованные);
- наличие достаточного резерва в системе;
- диспетчеризация;
- замена обычных генераторов на фотоэлектрические;
- метод компенсации реактивной мощности;
- алгоритмы управления фотоэлектрическими установками.

И это лишь некоторые из факторов, которые существенно влияют на работу энергосистемы.

Для того чтобы крупномасштабные фотоэлектрические станции могли успешно интегрироваться в будущие энергетические системы, необходимо преодолеть проблемы, связанные с обеспечением стабильности напряжения, частоты и угла наклона. Также важно разработать стандарты, которые облегчат интеграцию солнечных станций. В разных странах эти правила отличаются, и их смысл не всегда понятен. Они не всегда обоснованы с технической и экономической точек зрения. Это может привести к дополнительным расходам для производителей фотоэлектрического оборудования и разработчиков установок. Поэтому для крупномасштабных фотоэлектрических установок необходима глобальная стандартизация сетевых норм. Это поможет производителям разработать универсальное оборудование для фотоэлектрических установок, которое будет ориентировано на рынок.

Также были проведены значительные работы по преодолению ограничений стабильности, связанных с крупномасштабными фотоэлектрическими установками в энергосистеме. Однако в рассмотренной работе основное внимание уделялось решению только стабильности работы установки для интеграции, а не комплексному подходу к рассмотрению всех ограничений. В исследованиях, представленных в этой статье, подчёркивается, что при использовании фотоэлектрических систем в крупных масштабах возникает ряд проблем, связанных с обеспечением стабильности работы и управлением фотоэлектрическими генераторами. Отсутствие управления мощностью генераторами на солнечной станции делает ее неконкурентоспособной относительно традиционных электрических станций.

В работе [5] изучено влияние крупномасштабных фотоэлектрических систем на стабильность напряжения в системе электропередачи. В ней было рассмотрено как коэффициент мощности, так и режим регулирования напряжения в централизованных и распределенных фотоэлектрических системах. Кроме того, в этой работе сравнивались три алгоритма

планирования VAr с точки зрения стабильности статического напряжения системы с крупномасштабными фотоэлектрическими системами.

Был сделан вывод о том, что размер, расположение и режим работы фотоэлектрических систем оказывают сильное влияние на характеристики статического напряжения.

Результатом семинара лаборатории возобновляемых источников энергии национального департамента энергетики США стал сборник трудов «Understanding Variability and Uncertainty of Photovoltaics for Integration with the Electric Power System». [6]

Авторы говорят, что дневной график нагрузки, который операторы системы используют для планирования работы сети в режиме реального времени, значительно более сглажен, чем дневной профиль отдельного бытового потребителя, из-за разнообразия использования нагрузки среди потребителей. Вместо того чтобы учитывать время и продолжительность работы каждого отдельного бытового прибора, операторы системы знают, что совокупность всех потребителей будет следовать общей тенденции, которую можно предсказать и управлять ею с относительной легкостью. Аналогично, опыт управления ветроэнергетикой и солнечной энергетикой в нескольких странах с высокой долей возобновляемой энергетики показывает, что объединение нескольких различных ветряных или солнечных электростанций приводит к гораздо более сглаженным профилям ветра и солнца, чем можно было бы ожидать при масштабировании выработки одной ветряной турбины и солнечной станции.

Исследователи выделили два основных уровня регулирования генерацией и нагрузкой: временной и пространственный масштабы. Поскольку каждый временной масштаб связан с различными воздействиями, стратегиями управления и затратами, то его можно разделить на четыре подгруппы:

- качество электроэнергии (например, мерцание напряжения): секунды;
- регулировочные резервы: минуты;
- регулирование нагрузки: от минут до часов;
- обязательства и планирование блоков: от часов до дней.

Помимо временного измерения, также важно характеризовать изменчивость в пространственном измерении. Проблемы с качеством электроэнергии часто решаются в пределах одного распределительного фидера. Пространственные масштабы, важные для качества электроэнергии, могут составлять порядка десятков квадратных километров. С другой стороны, балансирующие органы должны балансировать всю генерацию и нагрузку в пределах балансирующих зон, которые варьируются от сотен квадратных километров до десятков тысяч квадратных километров.

Основная проблема исследований интеграции солнечных станций заключается в разработке прогнозов нагрузки и переменной генерации на всех временных и пространственных масштабах для ожидаемых уровней переменной генерации, которые еще нигде в мире не были достигнуты.

Для разработки прогнозов изменчивости фотоэлектрических установок, для исследований интеграции, аналитики должны иметь возможность моделировать поведение солнечной станции на временных масштабах от секунд до часов выходную мощность:

- крупных фотоэлектрических установок (1–10 км²);
- рассеянных фотоэлектрических установок на распределительных фидерах (на площадях до нескольких сотен квадратных километров);
- совокупности всех фотоэлектрических установок, которыми должны управлять операторы системы (сотни тысяч).

Исследователи также заметили, что в отличие от изменений положения солнца, которые влияют на выработку всех фотоэлектрических установок почти одинаково и сильно коррелируют, изменения выработки фотоэлектрических установок, вызванные облаками, не обусловлены подобным равномерным процессом.

Изменения солнечной радиации в точке, вызванные проходящим облаком, могут превышать 60% пиковой радиации за считанные секунды. Время, необходимое проходящему облаку, чтобы затенить всю фотоэлектрическую систему, зависит от размера фотоэлектрической системы, скорости движения облака, высоты облаков и других факторов. Облака движутся над установками, воздействуя сначала на одну часть установки, а затем на другую или оставляя некоторые части установок незакрытыми облаками по мере их прохождения. Поэтому облака вызывают разнообразные изменения в выработке фотоэлектрических установок на разных установках.

Благодаря тому, что солнечные панели внутри установки соединены электрическими связями, то выработка энергии на солнечных панелях, отдаваемая с шин подстанции, может быть охарактеризована относительным уменьшением величины скачков для совокупности нескольких панелей по сравнению с одной панелью.

Решая данную проблему с затенением солнечной станции облаками, авторы проанализировали четыре разные электрические системы в США.

Анализ этих сетей фотоэлектрических установок демонстрирует, что сглаживание колебаний мощности может происходить на более длительных временных масштабах среди отдельных установок. В Лас-Вегасе объединение шести установок на площади около 200 км² значительно снижает изменения мощности как за 1 минуту, так и за 10 минут. В Аризоне

анализ четырех установок, расположенных на расстоянии от 12,5 км до 50 км, показывает уменьшение порядка 50% в наиболее резких изменениях при агрегировании. В Колорадо сглаживающий эффект от агрегирования был менее выражен, что указывает на влияние региональных особенностей.

Данные из различных регионов подтверждают, что географическое разнообразие способствует сглаживанию колебаний выходной мощности фотоэлектрических установок. Это подчеркивает важность учета местных условий при оценке сглаживающего эффекта географического распределения установок.

Цель статьи «Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review» [7] – исследовать и подчеркнуть важность подключенной к сети фотоэлектрической системы с точки зрения непостоянного характера возобновляемой генерации, а также охарактеризовать фотоэлектрическую генерацию с точки зрения соответствия сетевому законодательству. В статье говорится об ожидаемых потенциальных проблемах, связанных с высоким уровнем интеграции PV в системы электроснабжения. Согласно результатам исследования цены на PV и на компоненты баланса системы (BOS) снижаются, что является одним из катализаторов бурного роста солнечных электростанций. Для использования солнечных станций в энергосистеме должно соблюдаться ряд предъявляемых требований: уровень гармонических искажений и электромагнитных помех, отслеживание максимальной мощности, регулирование тока инвертора, коэффициента мощности и другие.

Авторы статьи [8] рассматривают влияние фотоэлектрической генерации на сеть 500 кВ. Особое внимание уделяется двум основным областям возмущений: воздействию внезапных изменений освещенности (например, из-за большого проходящего облака) и устойчивости напряжения фотоэлектрической генерации при авариях в сети. Исследуются различные методы контроля напряжения с использованием моделирования. Для моделирования первой ситуации авторы рассмотрели модель энергосистемы с десятью шинами. Это упрощенная система, представляет собой энергосистему подключения локальной области к удаленной области с помощью пяти линий электропередачи на 500 кВ. Анализ показывает, что выходная мощность фотоэлектрических генераторов сильно зависит от освещенности их поверхности. Напряжение на шинах с традиционными генераторами менее подвержены колебаниям из-за действия автоматических регуляторов напряжения. Однако, при высоком уровне интеграции фотоэлектрических установок в энергосистему, изменения напряжения в системе становятся более значительными из-за колебаний освещенности. Вторым выводом при анализе устойчивости системы во время аварии

является алгоритм управления реактивной мощностью инвертора. При авариях в энергосистеме наблюдается снижение напряжения в точке короткого замыкания, на это реагирует реле напряжения, встроенное в инвертор, и отключает фотоэлектрическую установку, тем самым делая дефицит активной мощности в определенном контролируемом сечении. Соответственно, последствия тяжелее тогда, когда отключается крупная солнечная станция вследствие понижения напряжения, что может привести к развалу энергосистемы. Поэтому важным условием при интеграции крупных солнечных станций является настройка модели управления инвертором во время аварии в энергосистеме.

В статье [9] главной мыслью по внедрению фотоэлектрических станций в энергосистему является вывод о рассредоточенной системе солнечных станций. Статическая устойчивость по напряжению в таких системах зависит от затененности солнечных панелей, поэтому стабильность напряжения тем выше, чем более распределены в разных местах солнечные станции.

Исследование статьи [10] показало, что при крупномасштабной интеграции фотоэлектрических элементов возникают серьезные проблемы при замене существующих теплоэлектростанций фотоэлектрическими электростанциями. Основные проблемы, связанные с интеграцией фотоэлектрических систем, включают проблемы со:

- стабильностью напряжения;
- стабильностью частоты;
- общим качеством электроэнергии.

Распределённая генерация – это генерация, которая находится рядом с местом использования. В зависимости от размера подключённой нагрузки системы, распределённая генерация имеет проблемы с качеством электроэнергии. Распределённая система считается крупномасштабной, когда нагрузка в системе превышает 10 МВт. Системы, находящиеся ниже этого предела, не квалифицируются как коммерческие приложения и обычно не имеют многих проблем с качеством электроэнергии. Однако крупномасштабные системы сталкиваются с проблемами качества электроэнергии.

Возобновляемые источники обычно считаются распределённой генерацией и обычно контролируются локально, что подчёркивает необходимость разработки гибкой и адаптируемой сети.

Электростанции, использующие традиционный метод вращения турбины, получают выгоду от полного контроля над генерацией. Использование технологии генерации на основе ископаемого топлива

позволяет энергетической компании быстро маневрировать и производить необходимое количество энергии при изменении нагрузки.

Фотоэлектрическая генерация не имеет возможности производить электроэнергию по требованию. Система движущихся облаков способна взять фотоэлектрическую станцию мощностью 10 МВт, работающую на полную мощность, и снизить выходную мощность в половину её энергетического потенциала. Проблемы с качеством электроэнергии варьируются от напряжения и частоты до других областей, таких как гармоники, электромагнитные переходные процессы и мерцание. Для каждой категории помех существуют стандарты IEEE [11], и несоблюдение этих стандартов считается недопустимым и должно быть исправлено.

Проблема гармоник возникает в основном из-за силовых инверторов, используемых для преобразования вырабатываемого возобновляемым источником постоянного напряжения в переменное, хотя существует множество других причин, вызванных оборудованием энергетической системы.

Присущие фотоэлектрическим системам характеристики недиспетчерской работы допускают колебания генерации напряжения, которых ранее не было в сети. Чтобы решить эти проблемы с напряжением, на переднем плане современных исследований и разработок фотоэлектрических систем находятся решения для хранения энергии, наряду с другими решениями для мгновенного производства электроэнергии. Помимо прерывистости самой фотоэлектрической генерации, необходимо учитывать проблемы качества напряжения в сети. Электростанции должны быть способны работать без отключений при различных провалах уровня напряжения. Это требует, чтобы фотоэлектрические станции были столь же адаптируемыми к провалам напряжения, как и традиционные электростанции.

Фотоэлектрическая генерация – единственный метод солнечной энергетики, который не приводит к инерционной генерации мощности, что создает сложную проблему при крупномасштабной интеграции в сеть. Отсутствие инерции, введённой в сеть, является результатом отсутствия вращающейся машины в фотоэлектрической генерации.

Бытовые и коммерческие потребители электроэнергии полагаются на стабильность частоты сети. Подача 50 Гц на прибор или машину, рассчитанную на 60 Гц, может вызвать необратимые повреждения или перегрев. В некоторых исследованиях обнаружено, что интеграция фотоэлектрических систем изменяет частотную характеристику системы при неисправностях.

Крупномасштабные фотоэлектрические установки, несомненно, являются перспективным источником производства электроэнергии благодаря своим экологически чистым и безопасным характеристикам производства электрической энергии. Однако они оказывают ряд негативных воздействий на энергосистему, в частности на стабильность работы системы.

Из рассмотренной литературы очевидно, что на высокую степень интеграции фотоэлектрических установок в систему влияет ряд факторов. Среди таких факторов, которые серьезно влияют на стабильную работу системы, можно выделить размер и расположение фотоэлектрических установок, тип фотоэлектрических ресурсов (распределенные или централизованные), наличие необходимого резерва в системе, правильную диспетчеризацию, вытеснение традиционных генераторов фотоэлектрическими установками, метод компенсации реактивной мощности.

Из этой статьи становится очевидным, что для увеличения доли крупномасштабных фотоэлектрических установок в будущих энергосистемах важно преодолеть узкие места, связанные с напряжением, частотой и угловой стабильностью, а также разработать необходимые стандарты по интеграции возобновляемых источников энергии.

Различные операторы систем передачи выдвинули ряд рекомендаций по работе сети для интеграции крупномасштабных фотоэлектрических установок. Эти правила существенно различаются у разных операторов систем и недостаточно ясны, технически и экономически обоснованы. Это может наложить дополнительные расходы на производителей фотоэлектрического оборудования и разработчиков станций.

Поэтому требуется глобальная гармонизация сетевых стандартов для крупномасштабных фотоэлектрических установок, которая помогла бы производителям разработать ориентированное на рынок «универсальное» оборудование для фотоэлектрических станций.

Кроме того, значительная работа была посвящена преодолению ограничений по стабильности, связанных с крупномасштабными фотоэлектрическими установками в энергосистеме. Согласно этим работам, большинство из них были сосредоточены на решении только одного ограничения по стабильности для интеграции, а не на едином подходе к рассмотрению всех ограничений по стабильности.

Согласно работам, рассмотренным в этой статье, большинство из них, основанных на крупномасштабных фотоэлектрических установках, связаны с проблемами стабильности и соответствующим управлением фотоэлектрическими генераторами для безопасной и надежной работы системы. Однако считается, что стратегия диспетчеризации и вращающийся

резерв будут столь же важными вопросами, как и стабильность в будущей энергосистеме с высоким уровнем интеграции крупномасштабных фотоэлектрических установок. Поэтому необходимо провести дополнительную работу в этом направлении.

Источники

1. Solar power in Florida // Wikipedia. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_power_in_Florida (дата обращения: 27.04.2025).

2. China is building the world's largest solar park that's five times the size of Manhattan // Daily Mail. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dailymail.co.uk/news/peoplesdaily/article-5900829/China-building-worlds-largest-solar-park-thats-five-times-size-Manhattan.html> (дата обращения: 27.04.2025).

3. Huanghe Hydropower Golmud Solar Park // ExaPutra. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.exaputra.com/2023/04/huanghe-hydropower-golmud-solar-park.html> (дата обращения: 27.04.2025).

4. Shah R., Mithulananthan N., Bansal R.C., Ramachandaramurthy V.K. A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – ISSN 1364-0321.

5. Shah R., Mithulananthan N., Bansal R., Lee K.Y., Lomi A. Influence of large-scale PV on voltage stability of sub-transmission system // International Journal of Electrical Engineering and Informatics. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 148.

6. Mills A. и др. Dark Shadows // IEEE Power and Energy Magazine. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 33–41. – DOI: 10.1109/MPE.2011.940575.

7. Eltawil M.A., Zhao Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 112–129. – ISSN 1364-0321.

8. Thomson M., Infield D.G. Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems // IET Renewable Power Generation. – 2007. – Т. 1, № 1. – March.

9. Shah R., Mithulananthan N., Bansal R., Lee K.Y., Lomi A. Influence of Large-scale PV on Voltage Stability of Sub-transmission System // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. – 2012. – Т. 4, № 1.

10. Belcher B., Petry B.J., Davis T., Hatipoglu K. The effects of major solar integration on a 21-Bus system: Technology review and PSAT simulations // SoutheastCon 2017, Concord, NC, USA. – 2017. – С. 1–8. – DOI: 10.1109/SECON.2017.7925361.

11. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. – 1993. – April 12.

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИНТЕГРАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ 6-10 КВ

Коновалова Д. А.¹, Коновалов И. А.², Карамов Д. Н.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск, Россия

¹darya.shagdyr@mail.ru, ²ik.2400@mail.ru

В современном мире вопросы энергосбережения становятся все более острыми. Рост населения планеты, развитие промышленности и повышение уровня жизни приводят к постоянно возрастающей потребности в энергетических ресурсах. При этом традиционные источники энергии истощаются, а их добыча и использование наносят вред окружающей среде.

Будущее энергосбережения связано с развитием возобновляемых источников энергии. Солнечные панели, ветрогенераторы и системы накопления энергии становятся все более доступными и эффективными. Умные сети электроснабжения (smart grid) позволяют оптимально распределять электроэнергию между потребителями и источниками генерации.

Интеграция фотоэлектрических систем в распределительные сети 6-10 кВ является актуальным направлением в настоящее время, однако стоит учитывать, что данные решения создают значительные вызовы и требуют нового подхода к обеспечению безопасной и стабильной работы энергосистемы.

В статье проведен анализ технических аспектов внедрения ФЭС в распределительные сети до 10 кВ, а также представлен расчетная часть оценки эффективности их применения.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические системы, солнечная генерация, распределительные сети, солнечные панели, возобновляемая энергия.

TECHNICAL ASPECTS OF THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INTO 6-10 KV ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS

Konovalova D. A.¹, Konovalov I. A.², Karamov D. N.³

^{1,2,3} ISTU, Irkutsk, Russia

¹darya.shagdyr@mail.ru, ²ik.2400@mail.ru

In the modern world, energy saving issues are becoming more and more acute. The growth of the world's population, the development of industry and the improvement of living

standards lead to an ever-increasing need for energy resources. At the same time, traditional energy sources are being depleted, and their extraction and use are harmful to the environment.

The future of energy conservation is linked to the development of renewable energy sources. Solar panels, wind turbines, and energy storage systems are becoming more affordable and efficient. Smart power supply networks (smart grid) allow optimal distribution of electricity between consumers and generation sources.

The integration of photovoltaic systems into 6-10 kV distribution networks is an urgent area at present, however, it should be borne in mind that these solutions pose significant challenges and require a new approach to ensuring safe and stable operation of the energy system.

The article analyzes the technical aspects of implementing FES in distribution networks up to 10 kV, and also presents the estimated part of evaluating the effectiveness of their use.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic systems, solar generation, distribution networks, solar panels, renewable energy.

В последние годы наблюдается увеличение установленной мощности возобновляемых источников энергии, как в централизованных, так и в автономных энергетических системах. К примеру, фотоэлектрические системы (ФЭС) получили широкое распространение в распределительных сетях среднего уровня напряжения 6-10 кВ. Распределенная фотоэлектрическая генерация обладает следующими преимуществами: гибкость за счет малого момента инерции и возможности относительно мгновенной адаптации к внешнему воздействию, приемлемые инвестиции вследствие ежегодного уменьшения удельной стоимости кВт установленной мощности ФЭС, а также практически повсеместной доступности использования солнечной энергии. Кроме того, развитие нетрадиционной энергетики соответствует требованиям энергетической стратегии страны [1-3].

Внедрение фотоэлектрической генерации в распределительные сети 6-10 кВ способствует обновлению существующей энергосистемы, за счет более эффективного ее использования, снижения выбросов углерода и повышения устойчивости. С другой стороны, интеграция ФЭС создает значительные вызовы с точки зрения обеспечения безопасной и стабильной работы распределительной сети [4].

Основной целевой функцией данной работы является оценка эффективности интеграции ФЭС в распределительные сети 6-10 кВ, при условии влияния различных технических аспектов и ограничений со стороны надежности и качества электроснабжения.

а) Интеграция ФЭС.

$$P_{\text{ФЭС}} < P_{\text{дон}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ФЭС}}$ – мощность, генерируемая фотоэлектрическими станциями,
а $P_{\text{доп}}$ – допустимая мощность для интеграции в сеть.

б) Надежность.

$$P_{\min} < P_{\text{сети}} < P_{\max} \quad (2)$$

где $P_{\min}$ и $P_{\max}$ – минимальное и максимальное допустимые значения мощности в сети.

с) Качество электроснабжения.

$$V_{\min} < V_{\text{сети}} < V_{\max} \quad (3)$$

где $V_{\min}$ и $V_{\max}$ – минимальное и максимальное допустимые значения напряжения в сети.

В данном разделе были проанализированы работы авторов, направленные на анализ технических аспектов применения ФЭС в распределительных сети 6-10 кВ.

В статье [5] исследуются технические проблемы, которые возникли при интеграции солнечной электростанции мощностью 10 МВт в распределительную сеть 11 кВ в Пакистане. В рамках исследования анализировались перетоки мощности, токи трехфазных коротких замыканий на ближнем и дальнем концах ФЭС и влияние на динамическую устойчивость системы. Результаты расчета перетоков мощности показали, что линии электропередачи и силовые трансформаторы работают в пределах допустимой нагрузки как в нормальных, так и в аварийных режимах. В случае однофазных и трёхфазных коротких замыканий значения токов на солнечных электростанциях соответствуют установленным нормам. Кроме того, анализ показал, что система остаётся надёжной и устойчивой во всех аварийных режимах на 11 кВ и 132 кВ, как вблизи, так и вдали от предлагаемой солнечной электростанции мощностью 10 МВт.

В статье [6] представлен подробный анализ управления энергопотреблением фотоэлектрической системы, подключенной к трехфазной электрической сети переменного тока. Основная направленность данного исследования заключается в формировании конверсионной структуры и формирования модели управления. С целью проверки предполагаемого варианта поведения системы в определенных условиях, рассматриваются три возможных сценария работы. По результатам исследования можно сделать вывод, что при изменении температуры и скорости облучения мощность на ФЭС вырабатывается в достаточном объеме.

В связи с ежегодным увеличением количества проектов по интеграции ВИЭ в распределительные сети до 10 кВ, потоки активной и реактивной мощности становятся менее устойчивыми. С целью поддержания нормируемого уровня напряжения используются дополнительные устройства

регулирования, такие как трансформаторы переключения ответвлений под нагрузкой или регуляторы реактивной мощности потребителей, подключенных через инверторы. Это позволяет обеспечить динамическую устойчивость не только в своей, но в вышестоящей распределительной сети более высокого напряжения.

В работе [7] исследуется влияние способов регулирования реактивной мощности возобновляемых источников энергии на динамический спрос, реактивную и активную мощность, а также изменение уровня напряжения. Проведенные исследования показывают, что управление реактивной мощностью снижает общий спрос на неё в рассматриваемой распределительной сети. При аварийных ситуациях, вызывающих внезапное изменение напряжения в вышестоящей сети, управление реактивной мощностью ВИЭ и потребителей, может уменьшить результирующие изменения напряжения в распределительной сети. Если время задержки РПН слишком короткое, то управление реактивной мощностью приводит к увеличению количества переключений ступеней. При управлении потоком реактивной мощностью, этот эффект не наблюдается, поскольку РПН являются единственными компонентами, реагирующими на изменения напряжения.

Целью статьи [8] является разработка оптимальной стратегии управления спросом в сельской местности на севере Камеруна. В работе указывается, что использование гибридной системы, состоящей из фотоэлектрической системы, микрогидрогенератора, электрической аккумуляторной батареи и дизель-генератора, предлагает комплексное решение для максимального увеличения производства возобновляемой энергии, повышения устойчивости, обеспечения надежного электроснабжения и снижения общего воздействия на окружающую среду. Данная гибридная система повышает производительность и способствует эффективному использованию возобновляемых источников энергии. Благодаря применению стратегии Единого цифрового рынка (DSM) снижается уровень выбросов CO₂ на 22%, и стоимость электроэнергии в сельской местности становится на 59% выше. Программная среда и возможности взаимодействия с другим продуктами, позволяющими интегрировать специализированные модели, такие как фотовольтаическая система с тепловым элементом (PV/T-система), делают его подходящим решением для такого рода комплексных исследований. Описанные результаты демонстрируют, что применение стратегии DSM позволяет оптимизировать использование различных источников энергии в гибридной системе, способствуя увеличению их вклада.

Третья глава данной статьи представляет собой расчетную часть оценки эффективности интеграции ФЭС в распределительную сеть 10 кВ.

Ключевым показателем, исходя из которого были сформированы выводы о целесообразности внедрения ФЭС, является изменение коэффициента загрузки трансформаторов на распределительной подстанции 10 кВ.

В рамках исследования рассмотрим тестовую схему распределительной сети 10 кВ, представленную на рисунке 3. Вариант «А» предполагает анализ существующей схемы без внедрения ФЭС, а вариант «Б» учитывает, что у потребителей установлены солнечные панели, которые суммарно образуют генерацию электроэнергии 300 кВт.

Расчет получаемой мощности от ФЭС произведен по формуле 4:

$$P_{PV(t)} = I_S \cdot A \cdot \eta_{PV} \cdot k_L, \text{ Вт} \quad (4)$$

где:

I_S – солнечная инсоляция, Вт/м²;

A – суммарная площадь поверхности солнечных панелей, м²;

η_{PV} – коэффициент, о.е. В дальнейших расчетах принят 0,17 о.е.;

k_L – коэффициент, о.е. В дальнейших расчетах принят 0,94 о.е.

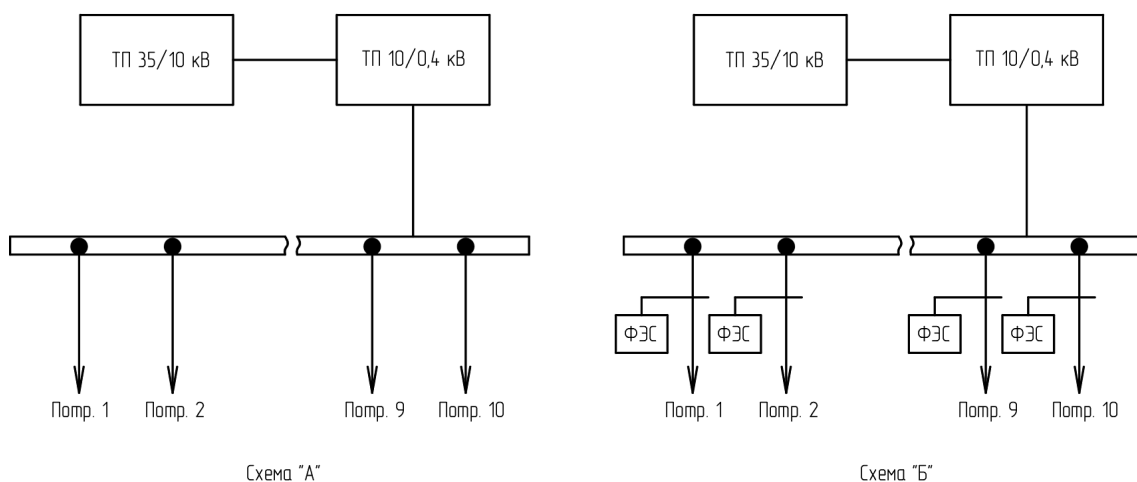


Рис. 1. Исследуемая схема распределительной сети 10 кВ А) без использования ФЭС, Б) с использованием ФЭС

На рисунке 2 изображен график годовой нагрузки для варианта «А».

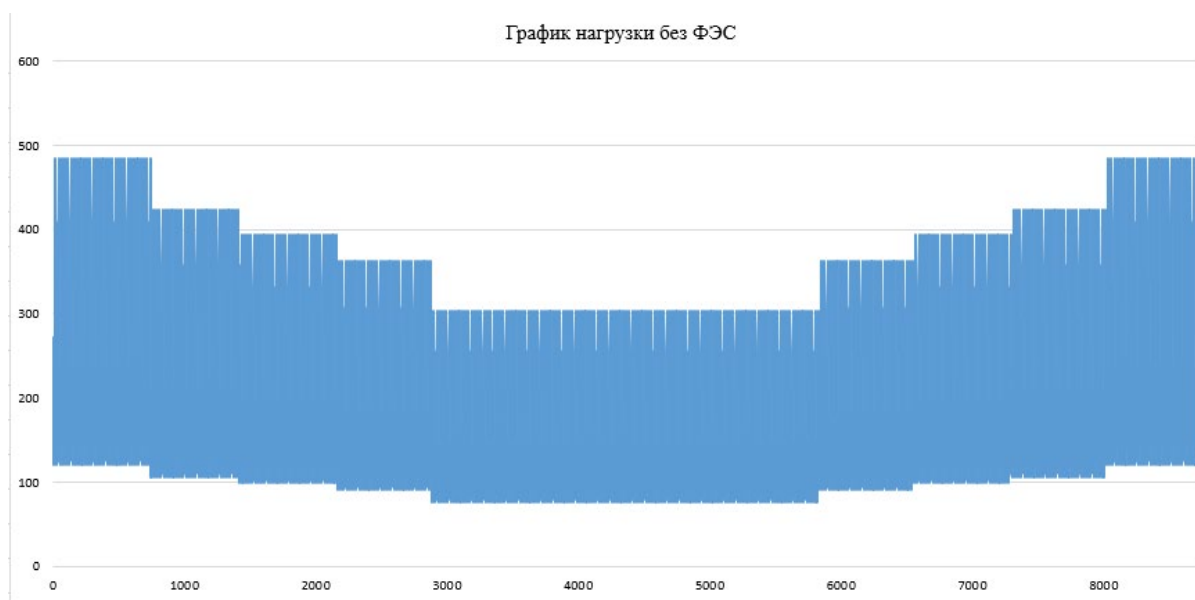


Рис. 2. График нагрузок в распределительной сети 10 кВ без ФЭС

На рисунке 3 изображен график годовой нагрузки для варианта «Б» с учетом интеграции ФЭС в распределительную сеть.

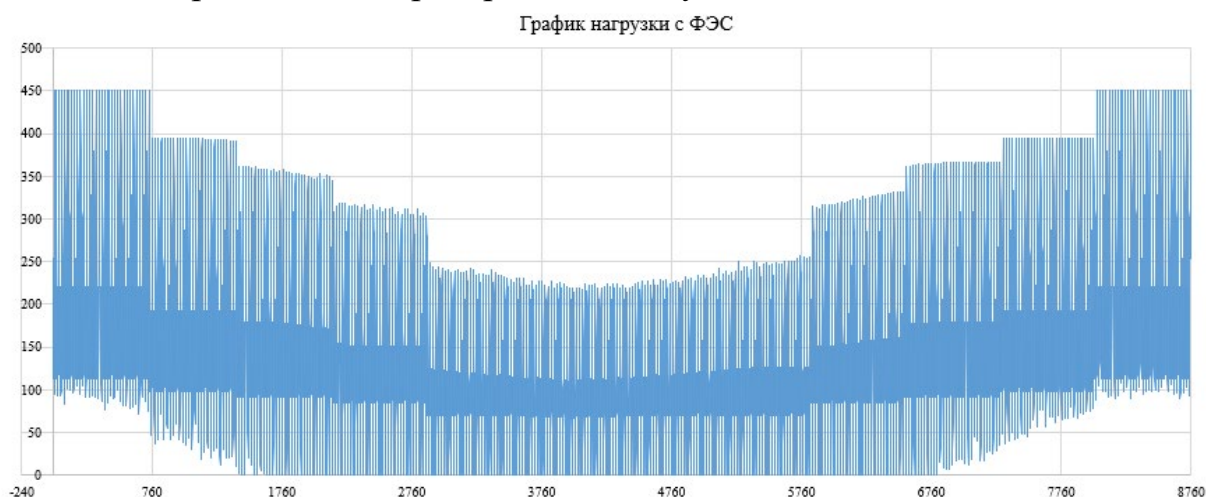


Рис. 3. График нагрузок в распределительной сети 10 кВ с учетом ФЭС

В таблице 1 представлены численные результаты о загрузке трансформатора в двух рассматриваемых вариантах.

Таблица 1

Численные результаты о загрузке трансформатора

Вариант	Средняя почасовая загрузка трансформатора, кВт
Схема «А»	186
Схема «Б»	151

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при интеграции ФЭС в рассматриваемую распределительную сеть 10 кВ,

нагрузка на силовой трансформатор установленной мощностью 630 кВА снизилась на 19%.

Мировой опыт интеграции фотоэлектрических систем в распределительные сети 6-10 кВ показывает, что такие системы являются важным элементом перехода к устойчивым и возобновляемым источникам энергии. Однако для их широкого распространения необходимо учитывать ряд технических вопросов.

Внедрение ФЭС в промышленности и быту позволяет не только эффективнее использовать возможности распределительной сети 6-10 кВ, но и снижать негативное воздействие на окружающую среду.

Источники

1. Российская Федерация. Указы. Указ Президента РФ от 04.02.1994 г. № 236 «О государственной стратегии Российской Федерации по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития».
2. Российская Федерация. Указы. Указ Президента РФ от 01.04.1996 г. № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию».
3. Российская Федерация. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р (ред. от 28.02.2024) «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
4. International Renewable Energy Agency (IRENA). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/> (дата обращения: 20.05.2025).
5. Azhar U., Ilyas A., Shen W., Korki M. Feasibility Study of Integrating Photovoltaic Generation Power Plant into a Distribution Network in Pakistan // 2021 31st Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). – IEEE, 2021.
6. Amira L., Tahar B., Abdelkrim M. Energy Management and Control of a Photovoltaic System Connected to the Electrical Network // 2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). – IEEE, 2020.
7. Porada S., Moser A. Dynamic Behavior of Active Distribution Networks // 2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – IEEE, 2021.
8. Zambou A.K., Kamani M.N., Simo E., Bangoup G.J.N., Chara-Dackou V.S. Transition towards net zero emissions: Integration of a PV/T system with a hydroelectric generator and the impact of demand-side management // Heliyon. – 2024. – Т. 10.

ВОЗМОЖНОСТИ НАКОПИТЕЛЕЙ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ, ИЗОЛИРОВАННЫХ И УДАЛЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ ОТ ВИЭ

Кузнецов Д.А.¹, Убодоев В.Б.², Лукина Г.В.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск, Россия

¹dmitry39ak@gmail.com, ²ubodoevslava@mail.ru

В статье рассматриваются проблемы возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и способы их решения с помощью систем накопления энергии (СНЭ). Описываются возможности СНЭ в энергосистеме: стабилизация частоты и напряжения, оптимизация нагрузки, снижение потерь электроэнергии, экономия. В качестве примера реализации рассмотрена Бурзянская СЭС в Республике Башкортостан, которая может работать в автономном от энергосети режиме. Проведен анализ экономического эффекта от внедрения СНЭ.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, системы накопления энергии, изолированные системы, электроснабжение.

STORAGE CAPACITY IN SOLVING PROBLEMS OF DISTRIBUTION NETWORKS, ISOLATED AND REMOTE ENERGY SYSTEMS FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES

Kuznetsov D.A.¹, Ubodoev V.B.², Lukina G.V.³

^{1,2,3} INRTU, Irkutsk, Russia

¹dmitry39ak@gmail.com, ²ubodoevslava@mail.ru

The article discusses the problems of renewable energy sources (RES) and ways to solve them using energy storage systems (ESS). The article describes the possibilities of ESS in the power system: frequency and voltage stabilization, load optimization, reduction of electricity losses, and savings. The Burzyanskaya SPP in the Republic of Bashkortostan, which can operate in an autonomous mode from the power grid, is considered as an example of implementation. The analysis of the economic effect of the introduction of the ESS is carried out.

Keywords: renewable energy sources, energy storage systems, isolated systems, power supply.

Один из главных минусов получения электроэнергии из возобновляемых источников – непостоянство выработки. Особенно остро эта проблема ощущается в изолированных сетях, где резервирование выполнить

сложно осуществимо или попросту невозможно. С внедрением ВИЭ снижается качество электроэнергии за счёт резких сбросов или набросов мощности генерации. С помощью СНЭ можно накапливать излишки энергии, производимой в пиковые часы, и использовать её позже, когда выработка снижается. Это увеличивает коэффициент полезного использования возобновляемой энергии и снижает необходимость в резервных источниках питания. В тоже время работа накопителей, используемых для регулирования частоты, может приводить к изменениям напряжения в локальной сети. Поэтому вводится ограничение на количество накопителей, которое рассчитывается исходя из характеристик оборудования и данные о сети, где эти накопители планируется использовать.

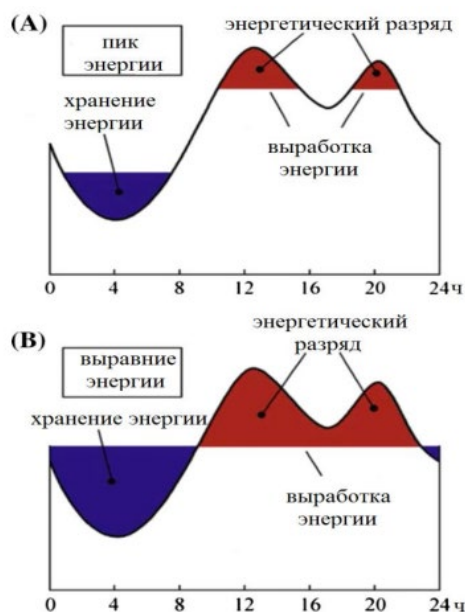
Не менее важная проблема – нагрузка на сети. В связи с тем, что электростанции на ВИЭ нельзя располагать повсеместно, растет нагрузка на распределительную инфраструктуру. Системы накопления электроэнергии позволяют переносить потребление электроэнергии на менее загруженные временные интервалы, что способствует оптимизации распределения ресурсов и снижению затрат на передачу и распределение энергии. Ниже на графике представлен вариант однодневного хранения электроэнергии с помощью СНЭ. Энергия сохраняется в период низкого спроса, чтобы удовлетворить пиковые нагрузки в этот же день [1].

Также есть возможность компенсации колебаний мощности, которые возникают из-за непостоянства работы ВИЭ. Это помогает поддерживать стабильную частоту и напряжение в сети, снижая риск аварийных отключений.

Инверторы, входящие в состав накопителя, позволяют оптимизировать нагрузку следующими вариантами [2]:

- Симметрирование трехфазных нагрузок. Для жилых домов свойственна разница в нагрузке между фазами. Она составляет до 30% между самой загруженной фазой и средней загрузкой всех фаз.

- Компенсация реактивной мощности. Инвертор может частично компенсировать реактивную мощность, тем самым увеличивая возможность потребления активной мощности.



Однодневный график нагрузки системы хранения электроэнергии

Отдельной проблемой являются удаленные и изолированные системы, где транспортировка электроэнергии нецелесообразна или попросту невозможна. В подобных местах энергосистемы работают автономно. Использование накопителей позволяет хранить не востребованную электроэнергию, вырабатываемую местными источниками, и использовать ее тогда, когда это будет нужно, обеспечивая бесперебойность питания.

Также использование систем хранения позволяет существенно сэкономить на прокладке линий электропередач и их обслуживании, так как снижается потребность в резервных источниках питания. То же относится к генераторам на ископаемом топливе, так как потребность в их работе будет ниже, чем в сети без систем накопления энергии.

Накопитель может быть эффективно использован в случае отсрочки строительства новой сетевой инфраструктуры для снятия краткосрочных и редких пиков потребления. Пиковые нагрузки могут быть снижены в следующих ситуациях:

- покрытие пиков перегруженности подстанций, возникающих в определенное время;
- обеспечение резерва для редких событий, приводящих к высоким, но кратковременным нагрузкам;
- обеспечение резерва при отказе трансформаторов.

Эффективность использования СНЭ для таких целей определяется следующими факторами: профилем суточного графика нагрузки, частотой возникновения пиковых нагрузок, требуемой категорией надежности потребителя, схемой подключения.

Основные варианты использования СНЭ в удаленных и изолированных сетях – автономные жилые комплексы, промышленные и исследовательские объекты, островные поселения. В процессе функционирования мини-энергосистем возникают краткосрочные пики нагрузки, требующие наличия резерва генерирующей мощности. Объем этого резерва составляет 60-80%, из которых около 40% находятся в оперативном резерве. Таким образом, актуальность накопителей в децентрализованной энергосистеме значительно выше, нежели чем в централизованной [2].

Теплоэлектростанции на дизеле и газе чувствительны к работе на низких нагрузках. При снижении нагрузки на 60% и более возрастает износ оборудования и риски аварии. Неравномерный график нагрузки с большими пиками и провалами увеличивает стоимость обслуживания и необходимость резерва. Применение СНЭ повышает надежность, потребность в резерве снижается.

СНЭ в удаленных системах выступают одновременно и источником мощности, и элементом системы бесперебойного питания, что повышает надежность энергосистемы. В изолированных системах накопители могут решать те же задачи, что и в централизованных, но их доля может быть значительно выше, равно как и экономический эффект от их использования.

Одним из ярких примеров использования систем накопления электроэнергии является Бурзянская СЭС (солнечная электростанция), расположенная вблизи села Старосубхангулово в Бурзянском районе Республики Башкортостан. Введена в эксплуатацию 26 февраля 2020 года.

Основные характеристики объекта [3]:

- Мощность станции: 10 МВт;
- Тип: солнечная электростанция с встроенной системой хранения;
- Емкость аккумуляторных батарей: 8 МВт*ч;
- Уровень резервирования: 80% от установленной мощности.

Особенностью системы является возможность работы в двух режимах – параллельно с ЕЭС России и в автономном режиме. Станция обеспечивает электроэнергией местных потребителей, а также может автономно снабжать социально значимые объекты при аварийных ситуациях.

На станции используются литий-ионные накопители сроком службы 2500 циклов заряд-разряд.

Станция может работать в автономном режиме до шести часов, снабжая электроэнергией больницы, школы, детские сады и другие объекты социальной инфраструктуры. В 2022 году было проведено первое испытание, в ходе которого станция проработала в автономном режиме 1.5 часа, тем самым подтвердив эффективность работы в условиях невозможности

передачи электроэнергии из ЕЭС. Также станция подтвердила стабильность работы солнечной генерации с накопителями.

Данный проект является одним из крупнейших в России в секторе промышленных накопителей энергии.

Экономический эффект от внедрения системы накопления энергии на Бурзянской СЭС можно рассмотреть по нескольким ключевым направлениям:

1. Снижение затрат на обслуживание:

Были сокращены расходы на ремонт и замену оборудования на 15% благодаря стабилизации напряжения. Затраты на дизтопливо резервные генераторы уменьшились на 4.8 млн руб/год. Также снизились расходы на обслуживание линий электропередач на 150 тыс. руб/год. Снижены потери электроэнергии с 12% до 8%.

2. Оптимизация работы станции:

Станция может работать в пиковые часы, когда тарифы на электроэнергию выше. Также повысилась эффективность использования установленной мощности. Среднее время наработки на отказ увеличилось с 6000 до 8000 часов.

3. Финансовый анализ:

Простой срок окупаемости рассчитывается как отношение суммарных инвестиций к годовому экономическому эффекту. При емкости СНЭ 8 МВт·ч и КПД 95% годовой эффект составляет около 40 тыс. рублей. Срок окупаемости системы накопления: 7-8 лет.

4. Дополнительные преимущества:

Станция имеет возможность участия в программе регулирования частоты, может получать дополнительный доход от предоставления услуг по обеспечению качества электроэнергии. КПД СЭС вырос на 25%. За счёт использования СНЭ сократилось время простоя и вероятность аварийных ситуаций, повысилась инвестиционная привлекательность объекта.

5. Факторы влияния:

Электростанция показывает стабильность работы в различных погодных условиях. Использование СНЭ позволяет снизить потери при передаче электроэнергии. Есть возможность работы в автономном режиме.

6. Долгосрочные перспективы:

Станция имеет потенциал увеличения эффективности при модернизации. В дальнейшем систему накопления можно расширить. В долгосрочной перспективе снижаются операционные расходы.

Важно отметить, что экономический эффект усиливается с увеличением масштаба системы накопления и продолжительности её эксплуатации. При этом учитываются как прямые финансовые показатели,

так и косвенные выгоды от повышения надежности и устойчивости энергоснабжения.

В целом, внедрение системы накопления энергии на Бурзянской СЭС демонстрирует успешную модель интеграции современных технологий в энергетику, обеспечивающую как экономическую эффективность, так и технологическое развитие объекта.

Источники

1. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: Издательский дом «ДодекаXXI», 2018. – 384 с.
2. Абрамов А.Ю., Богаченко П.В., Куликов А.В., Ряпин И.Ю. Применение систем накопления энергии в России: возможности и барьеры // Экспертно-аналитический отчет. – М., 2019. – С. 94–112.
3. ГК «Хевел». Бурзянская солнечная электростанция [Электронный ресурс] // Официальный сайт. – 2025. – URL: <https://www.hevelsolar.com/projects/burzyanskaya-solnechnaya-elektrostantsiya/> (дата обращения: 02.04.2025).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ: ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

Леушин А.О.¹, Ларионов Д.Н.², Галиев И.Ф.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹Albertl7@mail.ru, ²larionovdenis02@yandex.ru

Статья посвящена прогнозированию деградации бумажно-пропитанной изоляции маслонаполненных кабелей по данным анализа частичных разрядов.

Ключевые слова: метод частичных разрядов, повреждения, диагностика, прогнозирование, техническое состояние.

PREDICTION OF DEGRADATION OF PAPER-IMPREGNATED INSULATION OF OIL-FILLED CABLE LINES OF DISTRIBUTION NETWORKS: PARTIAL DISCHARGES

Leushin A. O.¹, Larionov D. N.², Galiev I.F.³

^{1,2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹Albertl7@mail.ru, ²larionovdenis02@yandex.ru

The article is devoted to the prediction of degradation of paper-impregnated insulation of oil-filled cables based on the data of partial discharge analysis.

Keywords: partial discharge method, damage, diagnostics, forecasting, technical condition.

В контексте обеспечения бесперебойной работы энергосистем, надежность распределительных электрических сетей приобретает критическую значимость. Экономические последствия повреждений маслонаполненных кабелей, сопровождающиеся значительными потерями, подробно описаны Ариткуловым Ф.Ф. [1].

Учитывая возрастающую нагрузку на сети и увеличение доли маслонаполненных кабелей, разработка эффективных методов диагностики и прогнозирования их технического состояния становится актуальной задачей. Метод измерения частичных разрядов (ЧР), обладающий высокой чувствительностью к дефектам в бумажно-пропитанной изоляции маслонаполненных кабелей, представляет собой перспективный инструмент для раннего выявления повреждений, оптимизации ремонтных работ и

предотвращения аварийных ситуаций [2]. Представленное исследование систематизирует имеющиеся данные о применении метода ЧР для прогнозирования деградации изоляции маслонаполненных кабелей.

В работах Кабанова В.Я. и соавт. показано, что деградация бумажно-пропитанной кабельной изоляции обусловлена комплексом физико-химических процессов старения, включающих окисление, ионизацию и деполимеризацию целлюлозы, сопровождающихся газовыделением (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , CO) [3]. Авторы отмечают взаимосвязь и синергетический эффект этих процессов, ускоряемых внешними факторами. Окислительные процессы приводят к снижению диэлектрической прочности целлюлозы, ионизация способствует локальному перегреву и образованию микродефектов, а деполимеризация – к уменьшению механической прочности изоляции. Выделение газов, в свою очередь, инициирует образование кавитаций и газовых включений, являющихся потенциальными источниками частичных разрядов (ЧР).

Анализ морфологии дефектов, представленный Абрамяном В.К. [4], указывает на преобладающую роль кавитаций и газовых включений как предвестников ЧР, в то время как трещины и пробой рассматриваются как непосредственные причины отказа кабеля. Таким образом, литературные данные свидетельствуют о сложной взаимозависимости различных факторов деградации, приводящих к развитию дефектов и отказу изоляции.

В работе Кубарева А.Ю. и соавт. обоснована возможность диагностики состояния бумажно-масляной изоляции маслонаполненных кабельных линий методом частичных разрядов (ЧР), основанную на регистрации и анализе импульсных электрических разрядов малой энергии, возникающих в дефектных зонах изоляции под воздействием электрического поля [5].

Необходимость применения высокочувствительного специализированного измерительного оборудования обусловлена низкой энергией регистрируемых разрядов. Процесс измерения ЧР в маслонаполненных кабелях предполагает подачу высоковольтного переменного или импульсного напряжения и одновременную регистрацию сигналов ЧР с помощью высокочувствительных датчиков, расположенных в непосредственной близости от кабеля или интегрированных в измерительную систему. Для минимизации влияния помех и повышения точности измерений используются методы экранирования и фильтрации сигналов [6].

Современные измерительные комплексы включают высоковольтный источник питания, датчики электрического поля, усилители сигналов, аналого-цифровые преобразователи и специализированное программное обеспечение. Анализ полученных данных осуществляется методами

амплитудно-временного анализа (определение амплитуды и временных характеристик импульсов ЧР) и фазо-разностного анализа (определение фазовых соотношений между импульсами ЧР и приложенным напряжением) [7]. Применение данных методов позволяет локализовать и характеризовать дефекты в изоляции кабельных линий.

Анализ научных работ [8-10] демонстрирует значительный интерес к прогнозированию технического состояния бумажно-пропитанной изоляции маслонаполненных силовых кабелей на основе анализа частичных разрядов (ЧР). Существующие подходы базируются на установлении корреляционных зависимостей между параметрами ЧР и степенью деградации изоляции, оцениваемой независимыми методами, такими как диэлектрические испытания или микроскопический анализ [9].

Для выявления этих зависимостей применяются различные методы корреляционного и регрессионного анализа. Одновременно с этим, разрабатываются модели старения изоляции, учитывающие влияние различных факторов и позволяющие прогнозировать развитие дефектов на основе временной динамики параметров ЧР [10]. Выбор адекватной модели определяется её соответствием экспериментальным данным и диапазоном применимости. На основе полученных корреляционных зависимостей и выбранной модели старения формулируются прогностические критерии оценки остаточного ресурса кабеля и вероятности отказа с заданной погрешностью [8, 10]. Валидация этих критериев осуществляется посредством сравнения с результатами экспериментальных исследований и анализа данных длительной эксплуатации кабелей [11].

Важным аспектом является создание более точных и адекватных моделей старения изоляции, учитывающих различные факторы, влияющие на процесс деградации. Интеграция метода ЧР с другими методами диагностики измерением диэлектрических потерь или анализом характеристик масла, позволит получить более полную и достоверную информацию о состоянии изоляции и повысить надежность прогнозирования её остаточного ресурса.

Источники

1. Ариткулов Ф.Ф. Опыт эксплуатации маслонаполненных кабельных линий электропередач // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований. – 2020. – С. 60–63.
2. Воробьёв С.О. Контроль состояния кабельных линий электропередач // Введение в энергетику. – 2014. – С. 99.
3. Кабанов В.Я., Фролов Ю.Г., Дементьев А.Н. и др. Радиационная химия полимеров // Химия высоких энергий. – 2009. – Т. 43, № 1. – С. 5–21.

4. Абрамян В.К. Оценка потенциально опасного накопления статического электричества на диэлектриках. – 2019.
5. Кубарев А.Ю., Шишкин А.В., Мухин П.В. и др. Методика обнаружения опасных зон в изоляции кабельных линий по характеристикам частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1–2. – С. 187.
6. Гук Д.А., Ильин А.В., Сафонов С.М. и др. Новый высоковольтный испытательный центр ОАО «ВНИИКП». Опыт испытаний и исследований силовых кабелей, арматуры и материалов для их производства // Кабели и провода. – 2014. – № 5. – С. 35–42.
7. Фомина И.А. Исследование коммутационных перенапряжений и старения изоляции в измерительных трансформаторах тока сверхвысокого напряжения. – Новосибирск: Б.и., 2017. – Т. 24.
8. Ярмаркин М.К. СИГРЭ. Исследовательский комитет D1 «Новые материалы и технологии» // Энергия единой сети. – 2014. – № 3. – С. 90–99.
9. Газизов А.Х., Комбарова Е.А., Чернов К.В. Опыт использования неразрушающих методов испытания и оценки технического состояния кабельных линий 6 кВ // Актуальные вопросы энергетики. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 93–98.
10. Дубяго М.Н. Разработка модели старения и определение остаточного ресурса изоляции силовых кабелей // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 107–114.
11. Юмагулов, А. Р. Анализ форм электрических сигналов частичных разрядов в зависимости от типа изоляции электроустановки и удаленности от источника питания / А. Р. Юмагулов // Наука XXI века: вызовы, становление, развитие: сборник статей XXI Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2024. – С. 87-90.

ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОБОЕВ

Лизунов Д. А.¹, Валиуллина Д. М.², Козлов В. К.³, Нигметзянов В.Т.⁴

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

⁴МБОУ «Гимназия №141», г. Казань, Россия

¹Reger0987@gmail.com, ²valiullinadiliya@mail.ru, ³vk_kozlov@bk.ru

Силовые трансформаторы играют важную роль в системах передачи электроэнергии. Серьезный отказ силовых трансформаторов происходит в результате пробоя изоляции и требует значительных затрат на ремонт, что приводит к финансовым потерям из-за перебоев в подаче электроэнергии. В связи с этим большое значение уделяется контролю физико-химических показателей и эксплуатационных свойств трансформаторных масел. В работе представлены результаты, позволяющие определять наличие продуктов старения в трансформаторном масле, а именно коэффициент пропускания оптического измерения.

Ключевые слова: трансформаторное масло, интенсивность свечения, степень деградации, диэлектрическая проницаемость, старение, коэффициент пропускания.

DEPENDENCE OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF TRANSFORMER OIL ON ELECTRICAL BREAKDOWNS

Lizunov Denis A.¹, Valiullina Diliya M.², Kozlov Vladimir K.³, Nigmatzyanov V.T.⁴

^{1,2,3}FGBOU VO "KGEU", Kazan, Russia

⁴Municipal budgetary educational institution "Gymnasium No. 141", Kazan, Russia

¹Reger0987@gmail.com, ²valiullinadiliya@mail.ru, ³vk_kozlov@bk.ru

Power transformers play an important role in power transmission systems. Serious failure of power transformers occurs as a result of insulation breakdown and requires significant repair costs, which leads to financial losses due to power outages. In this regard, great importance is given to monitoring the physical and chemical indicators and operational properties of transformer oils. The paper presents results that allow determining the presence of aging products in transformer oil, namely the optical measurement transmittance.

Keywords: transformer oil, luminescence intensity, degree of degradation, dielectric constant, aging, transmittance.

В сфере электроэнергетики силовые трансформаторы играют важнейшую роль, и ключевым элементом в их конструкции является

трансформаторное масло. Оно является продуктом перегонки очищенной сырой нефти и применяется для электроизоляции в силовых и измерительных трансформаторах, выключателях и других устройствах, работающих с высоким напряжением [1, 2].

В процессе эксплуатации жидкий диэлектрик подвергается воздействию температурных и электрических полей, а также находится в постоянном контакте с компонентами трансформатора. Это приводит к ускорению его старения и изменению физико-химического состава, что, в свою очередь, негативно сказывается на изоляционных свойствах. Поэтому состояние изоляции электроэнергетического оборудования подлежит тщательному мониторингу [3, 4].

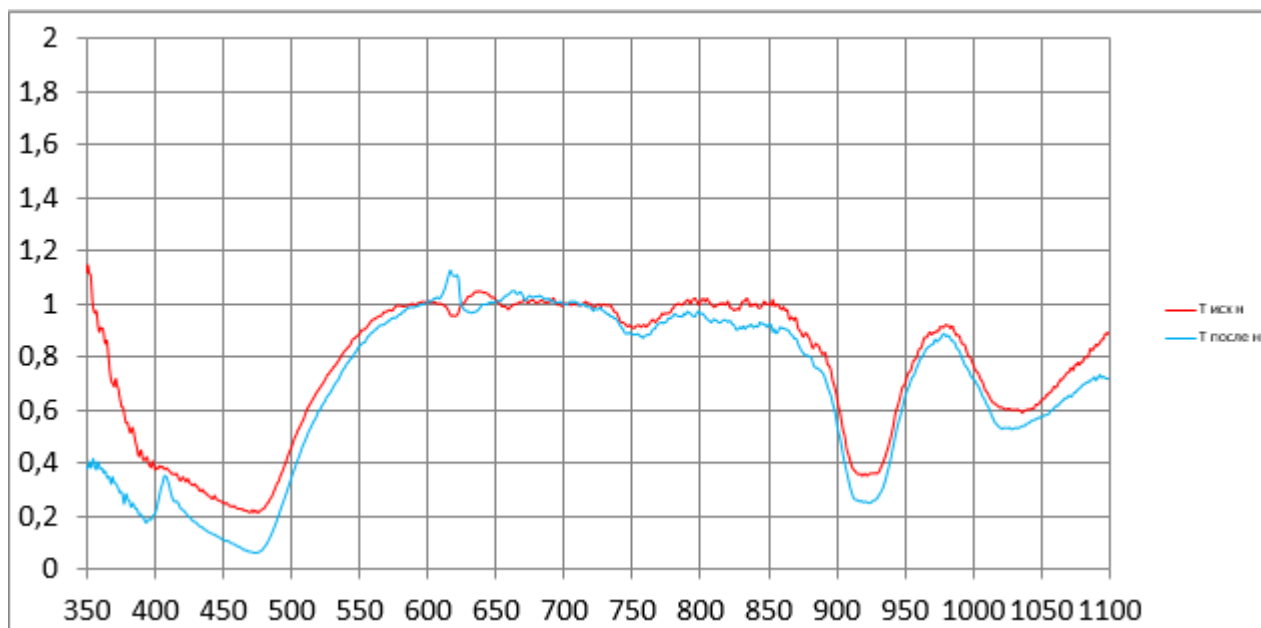
Был проведён эксперимент, в ходе которого выявили, на сколько сильно электрические пробой могут повлиять на качество трансформаторного масла.

Для его проведения взят образец масла, поделен пополам, в одном из образцов сделано 100 пробоев используя прибор АИМ-90А, а второй оставлен не тронутым. Затем было проведено измерение спектров пропускания этих образцов на приборе AvaSpec-2048XL, наблюдать их можно на графике. В ходе эксперимента изменениям подверглась такая величина, как коэффициент пропускания. Коэффициент пропускания – это безразмерная величина, показывающая, какая доля падающего на вещество (в нашем случае на масло) излучения проходит через него без поглощения и рассеяния. Значение коэффициента пропускания изменяется от 0 (полное поглощение) до 1 (полное пропускание).

На его изменение в предоставляемых условиях могли повлиять различные факторы, такие как:

–Образование углерода и других продуктов разложения: Электрический разряд в масле вызывает разрушение его молекул, образуя углеродные частицы, окисленные продукты и другие соединения. Новые вещества поглощают свет на определенных длинах волн, уменьшая пропускание. Молекулы масла могут менять свою структуру под воздействием электрического разряда. Это может привести к изменению их способности поглощать свет и, следовательно, к изменению коэффициента пропускания.

Результаты эксперимента мы можем увидеть в таблице, где видно, что у красной кривой коэффициент пропускания немного выше, чем у синей на протяжении всей длины, за исключением областей, где повлияли помехи, исходя из этого можно сделать вывод: масло, которому характерен синий график претерпело малозаметные изменения после 100 пробоев, которые ухудшили его свойства.



Спектры пропускания исходного трансформаторного масла (красный) и трансформаторного масла после электрических пробоев (синий)

Поскольку свойства масла претерпели изменение, в следствии появления продуктов распада, его изолирующие свойства ухудшились. Если масло на данный момент пригодно к использованию, то дальнейшая его эксплуатация рано или поздно на столько испортит его изоляционные свойства, что оно станет не пригодно для использования.

Крайне важно следить за тем, чтобы масло поддерживало свои изоляционные свойства, в противном случае, это может привести к поломке трансформатора, замена которого относительно дорога.

Источники

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20, Iss.1. P.346–355.
3. Валиуллина Д.М., Ильясова Ю.К., Козлов В.К. Качественные методы спектрального анализа в диагностике трансформаторных масел // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 87-92.
4. Karthik R., Sree Renga Raja T. Investigations of transformer oil characteristics. IEEJ Trans Elec Electron Eng, 2012 vol.7, pp. 369-374.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

Малаева А.К.¹, Нешина Е.Г.²

^{1,2} КарТУ им. Абылкаса Сагинова, г.Караганда, Республика Казахстан

¹malayeva01@bk.ru, ²1_neg@mail.ru

В статье рассматриваются современные подходы к повышению надежности трубопроводных систем с применением бесконтактных методов диагностики, в частности магнитной томографии. Акцент сделан на актуальность проблемы износа инфраструктуры в сфере теплоснабжения и водоснабжения, особенно в условиях Казахстана. Описаны преимущества магнитной томографии перед традиционными методами контроля, включая возможность выявления дефектов без вскрышных работ и остановки подачи ресурсов. Подчеркивается значимость технологии для прогнозирования аварийных ситуаций, снижения эксплуатационных рисков и экономии на ремонте. Приведены примеры успешного применения метода в международной практике.

Ключевые слова: трубопровод, надежность, диагностика, магнитная томография, дефекты, коррозия, теплоснабжение, инфраструктура, износ, модернизация.

IMPROVING THE RELIABILITY OF PIPELINE SYSTEMS USING NON- CONTACT DIAGNOSTIC METHODS

Malayeva A.K.¹, Neshina E.G.²

^{1,2} KarTU, Karaganda, Republic of Kazakhstan

¹malayeva01@bk.ru, ²1_neg@mail.ru

The article examines modern approaches to improving the reliability of pipeline systems through the use of non-contact diagnostic methods, particularly magnetic tomography. The relevance of infrastructure wear in the heat and water supply sectors is emphasized, especially in the context of Kazakhstan. The advantages of magnetic tomography over traditional inspection methods are described, including the ability to detect defects without excavation or interruption of resource delivery. The importance of this technology in predicting emergency situations, reducing operational risks, and cutting maintenance costs is highlighted. Examples of successful international implementation of the method are provided.

Keywords: pipeline, reliability, diagnostics, magnetic tomography, defects, corrosion, heat supply, infrastructure, wear, modernization.

Обеспечение надежности трубопроводных систем является актуальной и приоритетной задачей инженерной инфраструктуры в глобальном масштабе, поскольку они играют ключевую роль в транспортировке стратегически важных ресурсов — воды, тепловой энергии, нефти и газа. Водопроводные, теплосетевые, нефтепроводные и газопроводные системы ежедневно подвергаются значительным механическим и температурным нагрузкам, что приводит к их физическому и моральному износу, образованию скрытых дефектов, снижению прочностных характеристик и, как следствие, возникновению аварийных ситуаций [1].

Казахстан, как и большинство индустриально развитых стран, остро сталкивается с проблемой деградации трубопроводной инфраструктуры, особенно в сфере теплоснабжения и водоснабжения. Изношенность сетей, достигшая в некоторых регионах критических показателей, требует безотлагательных мер по диагностике и модернизации систем.

Президент Республики Казахстан Касым-Жомарт Токаев неоднократно подчеркивал значимость эффективной инфраструктуры, указывая на то, что ее неудовлетворительное состояние негативно влияет на социальную и экономическую стабильность страны. Массовые аварии на теплоэлектростанциях выявили острую необходимость комплексного подхода к диагностике и модернизации трубопроводных систем. Важным направлением в решении этой задачи является применение современных методов мониторинга, таких как магнитная томография, позволяющая бесконтактно выявлять дефекты и предотвращать аварийные ситуации.

На сегодняшний день традиционные методы контроля состояния трубопроводов, такие как гидравлические испытания, ультразвуковая дефектоскопия, не всегда обеспечивают необходимую точность и требуют значительных затрат. Бесконтактные методы диагностики, в частности магнитная томография, позволяют решать поставленные задачи без вскрышных работ, остановки подачи ресурсов и нарушения целостности инфраструктуры [2].

Основные особенности метода магнитной томографии:

Оценка технического состояния трубопроводов проводится с учетом действующих локальных напряжений в реальных режимах эксплуатации.

Дистанционное выявление участков с аномалиями напряженно-деформированного состояния по причине общей и местной потери устойчивости, в том числе в зонах оползневых нагрузок, течений, свободных провисов, сейсмоактивных районах и слабых грунтах.

Выявление концентраторов механических напряжений, включая нарушение толщины стенок труб вследствие коррозионного и эрозионного износа.

Выявление критических дефектов, таких как трещины в сварных швах, кольцевых и продольных соединениях.

Классификация дефектов по уровням опасности (хорошее, допустимое и недопустимое состояние).

Магнитная томография позволяет не только оценивать текущее состояние трубопроводов, но и прогнозировать возможные аварийные ситуации, что существенно снижает эксплуатационные риски и экономические затраты на ремонты. В отличие от традиционных методов, технология дает возможность:

- Избежать катастрофического износа трубопровода и вовремя планировать его ремонт.
- Определять наиболее уязвимые участки с высокой точностью без необходимости перекрытия дорог и остановки подачи воды, газа или нефти.
- Формировать долгосрочные программы технического обслуживания с учетом выявленных дефектов [3].

На практике данный метод уже успешно применяется в различных странах мира. В Российской Федерации диагностика методом магнитной томографии активно используется в ЖКХ и нефтегазовом комплексе, включая города: Москва, Екатеринбург, Казань, Челябинск, Таганрог, Калининград, Горно-Алтайск, Мирный, Московская область, Сахалин. Общая протяженность обследованных подземных и надземных трубопроводов превышает 21 000 км в более чем 40 странах.

Применение бесконтактных методов диагностики, в частности магнитной томографии, является перспективным направлением повышения надежности трубопроводных систем. Этот метод позволяет своевременно выявлять дефекты, минимизировать риски аварий и снизить затраты на ремонт и обслуживание. Внедрение данных технологий в Казахстане и других странах будет способствовать повышению эффективности эксплуатации инженерных коммуникаций и обеспечению стабильного функционирования инфраструктуры.

Источники

1. Иванов А. Н., Петров В. С. Диагностика трубопроводных систем: методы, технологии, перспективы. — СПб.: Наука, 2015. — 320 с.
2. Смирнов Д. В. Магнитная томография в промышленности: современный подход к диагностике. — М.: Техносфера, 2018. — 280 с.
3. Громов В.В., Карташов С.А. Современные методы диагностики трубопроводов. — М.: Техносфера, 2021.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОГРАММАХ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО - ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Мирхаликова Д.С.

ХПИТТУ им. академика М.С.Осими, г. Худжанд, Таджикистан

mirkhalikova.d@mail.ru

В статье рассматриваются актуальные вопросы внедрения информационных технологий в образовательные программы инженерно-энергетических специальностей. Основное внимание уделяется анализу современных методов и средств обучения, основанных на использовании цифровых технологий, а также их влиянию на качество подготовки специалистов энергетического профиля.

Ключевые слова: информационные технологии, инженерное образование, энергетические специальности, цифровизация обучения, профессиональная подготовка

INFORMATION TECHNOLOGY IN ENERGY ENGINEERING TRAINING PROGRAMS

Mirkhalikova D.S.

KPITTU nam. academician M.S.Osimi, Khujand, Tajikistan

mirkhalikova.d@mail.ru

The article discusses current issues of introducing information technologies into educational programs for engineering and energy specialties. The main attention is paid to the analysis of modern methods and teaching aids based on the use of digital technologies, as well as their impact on the quality of training of energy specialists.

Key words: information technology, engineering education, energy specialties, digitalization of education, vocational training.

Электрическая цепь – это совокупность устройств и объектов, для прохождения электрического тока. Для расчета простых электрических цепей целесообразно использовать основные законы электрических цепей, а если необходимо рассчитать сложную цепь надо использовать какие-то методы расчета. Один из таких методов расчета электрических цепей метод контурных токов. Для этого необходимо составить уравнение, только по второму закону Кирхгофа, но не для действительных, а для воображаемых токов, циркулирующих по замкнутым контурам, т.е. в случае выбора главных контуров равных токам ветвей связи. Число уравнений равно числу независимых контуров, т.е. числу ветвей связи графа. Направления истинных

и контурных токов выбираются произвольно. Выбор положительных направлений перед началом расчета может не определять действительные направления токов в цепи. Если в результате расчета какой-либо из токов, как и при использовании уравнений по законам Кирхгофа, получится со знаком “-”, это означает, что его истинное направление противоположно.

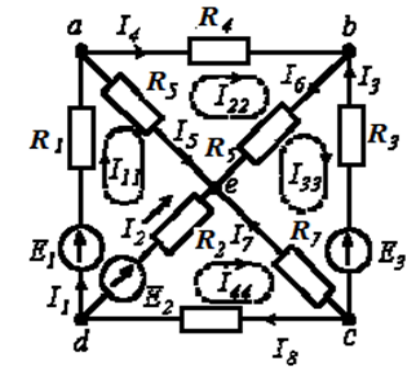


Рис. 1. Пример расчетной схемы

Выразим токи ветвей через контурные токи схемы представленной на рис. 1:

$$I_1 = I_{11}; I_2 = I_{44} - I_{11}; I_3 = -I_{33};$$

$$I_4 = I_{22}; I_5 = I_{11} - I_{22}; I_6 = I_{22} - I_{33};$$

$$I_7 = I_{33} - I_{44}; I_8 = I_{44}.$$

Обойдя контур $aeda$, по второму закону Кирхгофа имеем $R_1 I_1 + R_5 I_5 - R_2 I_2 = E_1 - E_2$.

Поскольку $I_1 = I_{11}$; $I_5 = I_{11} - I_{22}$; $I_4 = I_{22}$.

то

$$(R_1 + R_2 + R_5)I_{11} - R_5 I_{22} + 0 \cdot I_{33} - R_2 I_{44} = E_1 - E_2.$$

Таким образом, получили уравнение для первого контура относительно контурных токов. Аналогично можно составить уравнения для второго, третьего и четвертого контуров:

$$-R_5 I_{11} + (R_5 + R_4 + R_6)I_{22} - R_6 \cdot I_{33} - 0 \cdot I_{44} = 0;$$

$$0 \cdot I_{11} - R_6 I_{22} + (R_6 + R_3 + R_7)I_{33} - R_7 \cdot I_{44} = -E_3;$$

$$-R_2 I_{11} + 0 \cdot I_{22} - R_7 \cdot I_{33} + (R_7 + R_2 + R_8)I_{44} = E_2,$$

совместно с первым решить их относительно контурных токов и затем по уравнениям, связывающим контурные токи и токи ветвей, найти последние.

Однако данная система уравнений может быть составлена формальным путем:

$$\begin{aligned} R_{11}I_{11} - R_{12}I_{22} - R_{13}I_{33} - R_{14}I_{44} &= E_{11}. \\ -R_{21}I_{11} + R_{22}I_{22} - R_{23} \cdot I_{33} - R_{24}I_{44} &= E_{22}; \\ -R_{31}I_{11} - R_{32}I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} - R_{34}I_{44} &= E_{33}; \\ -R_{41}I_{11} - R_{42}I_{22} - R_{43} \cdot I_{33} + R_{44}I_{44} &= E_{44}. \end{aligned}$$

В правой части уравнений записывается алгебраическая сумма ЭДС, входящих в контур: со знаком “+”, если направление ЭДС совпадает с выбранным направлением контурного тока, и “-”, если не совпадает.

В нашем случае, для первого уравнения системы, имеем:

$$R_{11} = R_1 + R_2 + R_5; R_{12} = R_5; R_{13} = 0; R_{14} = R_2; E_{11} = E_1 - E_2.$$

Если в цепи содержатся помимо источников ЭДС источники тока, то они учитываются в левых частях уравнений как известные контурные токи: k -й контурный ток, проходящий через ветвь с k -м источником тока равен этому току. Для определение этих искомых величин уравнения используем методом Лапласа [1]:

$$\begin{aligned} \Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} &= a_{11} \cdot \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{12} \cdot \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix} + \\ &+ a_{13} \cdot \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{44} \end{vmatrix} - a_{14} \cdot \begin{vmatrix} a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Необходимо ещё такую матрицу решать для искомой величины. Соответственно такая задача очень трудоемкая и занимает много времени. Такую матрицу можно быстро и легко рассчитать с помощью программного обеспечение Excel. Необходимо вести числовые значение в матрицу и пустую ячейку ставить равенство с помощью математической функции выбрать «МОПРЕД», затем выделить все части матрицы. Такое действие необходимо выполнить ещё 3 раза, для нахождения искомой величины.

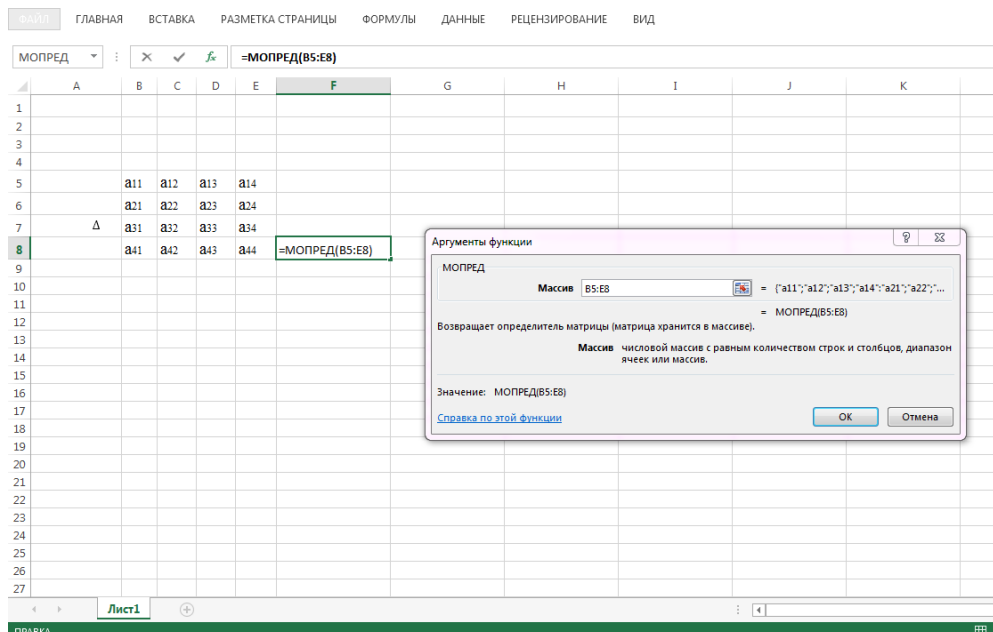


Рис.2. Определение матрицы 4-го порядка в программе Excel

На рис. 3 показана расчет токов ветвей заданной сложной электрической цепи рис.1 в программе Excel с помощью составленного уравнения методом контурного тока. После нахождения контурных токов, выразим токи ветвей заданной электрической цепи.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	E1	E2	E3		
2		10	15	25	12	8	25	30	16	12	8	6	
3													
4			33	-8	0	-15							
5	Δ		-8	45	-25	0						I_1	0,218203 A
6			0	-25	80	-30						I_2	-0,02848 A
7			-15	0	-30	61	3548080					I_3	-0,01001 A
8								I_{11}	0,218203			I_4	0,044351 A
9			4	-8	0	-15						I_5	0,173852 A
10	Δa_{11}		0	45	-25	0		I_{22}	0,044351			I_6	0,034344 A
11			-6	-25	80	-30						I_7	-0,17972 A
12			8	0	-30	61	774200	I_{33}	0,010007			I_8	0,189725 A
13													
14	Δa_{22}		33	4	0	-15		I_{44}	0,189725				
15			-8	0	-25	0							
16			0	-6	80	-30							
17			-15	8	-30	61	157360						
18													
19			33	-8	4	-15							
20	Δa_{33}		-8	45	0	0							
21			0	-25	-6	-30							
22			-15	0	8	61	35504						
23													
24			33	-8	0	4							
25	Δa_{44}		-8	45	-25	0							
26			0	-25	80	-6							
27			-15	0	-30	8	673160						

Рис. 3. Пример расчета методом контурных токов на программе Excel

По программе Excel рассчитали токи всех ветвей заданной электрической цепи, которая составлено уравнение выше согласно методу контурных токов. Таким образом в итоге расчёта мы находим токи ветвей, как сумму контурных токов. Так как, мы выбираем произвольное направление токов в ветвях знак минус в значениях тока ветвей означает, что действительное направление токов направлено противоположена. Правильность найденных значений можно проверить с помощью системы схемотехнического моделирования Multisim.

Multisim предназначена для моделирования и анализа электрических схем. Multisim- электронная лаборатория, позволяет сделать изучение электрических схем более доступным. Особенностью программы Multisim является наличие виртуальных измерительных приборов, имитирующих реальные аналоги. В состав Multisim входят эффективные средства графической обработки результатов моделирования. Другая важная особенность программы заключается в том, что Multisim поддерживает взаимодействие с графической средой LabVIEW, предназначенной для разработки программно-аппаратных средств измерения и управления.

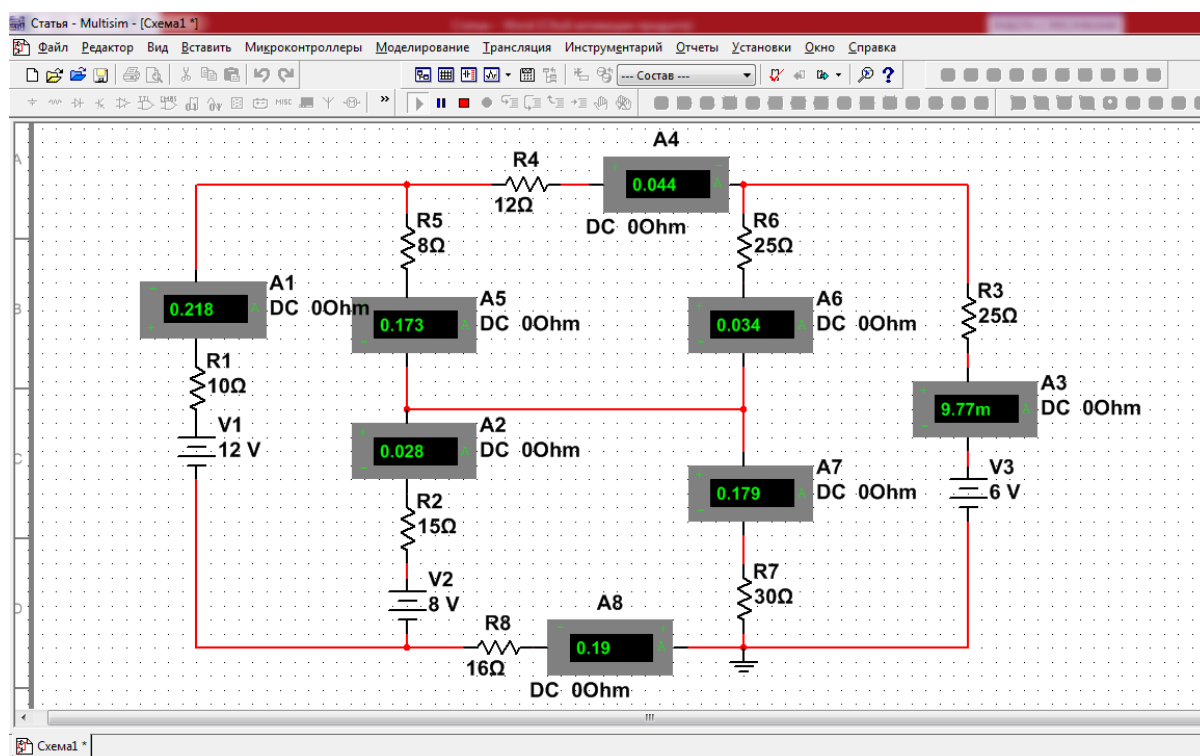


Рис. 4. Сложная электрическая цепь в программе Multisim заданное на рис.1

На рис. 4 показан собранная модель электрической цепи, заданной на рис. 1. Показание амперметров «А» всех ветвей от одного до восьми равно ценно к току ветвей. Сравнивая расчетный и моделирование показатели можно удовлетворится об правильности значения. Сравнения числовых значения приведем в таблицу 1.

Таблица 1.

Сравнения числовых значения токов

№	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8
	А							
Расчетный метод	0,218	0,028	0,010	0,044	0,173	0,034	0,179	0,189
По программе Multisim	0,218	0,028	9,77 мА $\approx 0,00977$	0,044	0,173	0,034	0,179	0,190

Основным положительным качеством метода контурных токов по сравнению с вычислениями по законам Кирхгофа, является значительно меньшее количество уравнений, используемых для вычислений. Реальные токи ветвей не всегда удастся определить быстро и с высокой точностью. Правильность числовых и точность искомых величин нам покажет программное обеспечение Multisim. При помощи данной программы можно облегчить понимание основ электротехники и углубить свои знания в проектировании схем. Компонентная база программы состоит из огромного количества элементов. Разнообразие подключаемых к схеме виртуальных приборов Multisim позволяет быстро увидеть результат с помощью имитации реальных событий.

Источники

1. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: Учебник для электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. / Бессонов Л.А.- М.: Высш.школа, 2006. – 528 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТОПЛЕНИЯ

Михальчук А.А.¹, Савин Н.Ю.²

^{1,2} БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

mixa00553@mail.ru

В данной работе рассматривается критическая проблема энергопотребления в системах теплоснабжения гражданских и производственных зданий, которая оказывает существенное влияние на экономику и окружающую среду. В условиях реформирования энергетической отрасли и роста тарифов на коммунальные услуги, поиск путей повышения энергоэффективности отопительных систем становится приоритетной задачей. Будет проведено сравнение различных систем отопления (конвективное и лучистое), а также изучены методы и системы отопления для разработки рекомендаций по снижению энергопотребления, уменьшению углеродного следа и достижению экономической выгоды

Ключевые слова: теплоснабжение, энергопотребление, энергоэффективность, системы отопления, тарифы, экономическая выгода, сокращение расходов.

ENERGY EFFICIENT HEATING TECHNOLOGIES

Mikhailchuk A.A.¹, Savin N.Y.²

^{1,2} BSTU named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

mixa00553@mail.ru

This paper examines the critical problem of energy consumption in heating systems of civil and industrial buildings, which has a significant impact on the economy and the environment. In the context of energy industry reform and rising utility tariffs, the search for ways to improve the energy efficiency of heating systems is becoming a priority. Various heating systems (convective and radiant) will be compared, and heating methods and systems will be studied to develop recommendations for reducing energy consumption, reducing the carbon footprint, and achieving economic benefits.

Keywords: heat supply, energy consumption, energy efficiency, heating systems, tariffs, economic benefits, cost reduction.

Известно, что теплоснабжение гражданских производственных зданий расходуется более одной трети всего добываемого в нашей стране органического топлива. В ходе реформ в России в корне поменялась структура энергетики. Твердое топливо все чаще заменяют дешевым экологичным газом. Совершенствование систем отопления направлено на

улучшение их характеристик с целью снижения потребления энергии, которое в значительной степени обусловлено ростом тарифов и, следовательно, увеличением расходов на коммунальные услуги. Это особенно актуально в период отопительного сезона на большей части территории России, когда теплотери многократно превышают внутренние тепловыделения. Так как установлены мощные электроприборы для обогрева, отопления и водоснабжения, такие как электрические котлы и насосы (погружные и водяные). Данные устройства имеют высокое энергопотребление и могут функционировать непрерывно, что приводит к значительному увеличению расходов в холодное время года. Существуют и другие косвенные причины, такие как уменьшение негативного влияния на окружающую среду и улучшение качества воздуха. Это связано с работой теплоэлектростанций, которые используют уголь или дизельное топливо, а также другими аналогичными установками. В этой области постоянно появляются новые технологические разработки [1].

В зависимости от способа теплопередачи отопление бывает лучистым и конвективным. Конвективное отопление является широко распространенным способом отопления, при котором температура t_v поддерживается на более высоком уровне, чем радиационная температура помещения t_R ($t_v > t_R$). Под радиационной температурой берется усредненная температура поверхностей, обращенных в помещение, вычисленную относительно человека, находящегося в середине этого помещения.

Лучистое отопление – отопление, при котором радиационная температура превышает температуру воздуха помещения, ($t_R > t_v$).

Всё это называется системой отопления, которая является совокупностью конструктивных элементов со связями между ними, которые предназначены для переноса и передачи тепла в здания [2].

Причины совершенствования систем теплоснабжения:

1. Экономия потребления энергии

Основным путём экономии энергии в строительстве является возведение зданий с эффективным использованием энергии (ЗЭИЭ). В данном здании (ЗЭИЭ) учтены оптимальные инженерные методы и средства, для экономии энергии. Так как в нашей стране есть регионы с суровым климатом и более длительным отопительным сезоном, (ЗЭИЭ) является рациональным решением, тем самым, позволив значительно сократить потребление энергии, что не только уменьшает счета за отопление, но и снижает общие эксплуатационные расходы.

2. Уменьшение углеродного следа

Известно, что парниковые газы приводят к изменению климата и загрязнению окружающей среды. Переход на энергоэффективные технологии

помогает снизить негативное влияние на природу. Таковым является, например, использование более качественных материалов при строительстве, которое сократит выход теплого воздуха наружу. Или использование энергосберегающих приборов

3. Сохранение природных ресурсов

Энергоэффективные технологии способствуют более рациональному использованию природных ресурсов, таких как газ, нефть и электроэнергия, что важно для обеспечения устойчивого развития. Важно проводить энергосберегающие мероприятия, такие как:

- своевременное обслуживание и ремонт коммуникаций систем теплоснабжения;
- перевод открытых систем на закрытые;
- замена устаревших электродвигателей на современные энергоэффективные;
- обоснованное снижение температуры теплоносителя (срезка);
- диспетчеризация в системах теплоснабжения;
- внедрение вихревой технологии деаэрирования

4. Экономическая выгода

Инвестиции в энергоэффективные технологии могут привести к значительной экономии в долгосрочной перспективе, так как они снижают расходы на энергию и могут увеличивать стоимость недвижимости.

Методы и системы отопления:

1. Тепловые насосы

Тепловые насосы (компрессионные, сорбционные, термоэлектрические, газовые, струйные, комбинированные) работают на разных источниках энергии. Насосы переносят тепло из внешней среды (воздуха, земли или воды) внутрь здания, и с помощью фреона переносит его в систему отопления для нагрева теплоносителя, как правило, воды или водного раствора гликоля. Они могут использоваться для отопления и охлаждения. Энергоэффективность: обеспечивают высокую эффективность (COP). На 1 кВт потребленной энергии могут выдавать 3-5 кВт тепла.

2. Системы солнечного отопления

Солнечные коллекторы: система, которая использует в качестве теплоисточника энергию солнечной радиации. Характерное отличие: специальный элемент гелиопремник, который применяется для улавливания солнечной радиации и преобразование ее в тепловую энергию. Солнечные воздушные коллекторы могут напрямую обогревать отдельные помещения или потенциально могут предварительно нагревать воздух, проходящий через вентилятор с рекуперацией тепла или через воздушный змеевик воздушного теплового насоса.

3. Инфракрасное отопление

Инфракрасные обогреватели излучают тепло, которое непосредственно нагревает объекты и людей в помещении, а не воздух. Преимущества потолочных систем инфракрасного отопления включают равномерное распределение тепла, отсутствие шума и пыли, а также отсутствие воздушных потоков, что особенно важно для предприятий с высокими требованиями к санитарным условиям.

4. Умные системы управления отоплением

Использование интеллектуальных термостатов позволяет оптимизировать отопление, автоматически регулируя температуру в зависимости от присутствия людей и времени суток.

Интеграция с домашними системами управления: Возможность управления отоплением через мобильные приложения или системы "умный дом". Управление температурой системы отопления и теплых полов осуществляется в рамках единой интегрированной системы, адаптированной под потребности пользователя. Это включает в себя возможность повышения или понижения температуры в помещениях перед прибытием владельца, а также включение или отключение горячей воды. Система позволяет настраивать индивидуальные температурные режимы для каждого помещения и разрабатывать графики включения и выключения отопления и теплых полов в зависимости от недельного расписания пользователя.

5. Системы геотермального отопления

В данной системе, источником может быть теплота подземных нагретых вод или горных пород. Используются геотермальные тепловые насосы: где системы отопления присоединяют к тепловым сетям геотермальных вод, обеспечивая стабильный источник энергии с низкими эксплуатационными расходами. Если же температура геотермальной воды недостаточна, то систему низкотемпературного отопления устраивают комбинированной.

6. Тепло Recovery Ventilation Systems (HRV)

Представляет собой систему вентиляции, которая восстанавливает тепло из вытяжного воздуха и используют его для предварительного подогрева входящего воздуха, что снижает энергозатраты на отопление. Благодаря системе рекуперации остаточного тепла в выхлопных газах свежий воздух, предварительно нагревается (или охлаждается), прежде чем подастся в помещение. Системы рекуперации тепла обычно восстанавливают около 60–95% тепла из отработанного воздуха и значительно повышают энергоэффективность зданий

7. Системы отопления на основе водяного теплого пола

Данная отопительная система устроена таким образом, что тепло (электричество или вода, в зависимости от вида помещения) внутри труб циркулирует по контуру внутри пола под напольным покрытием. Обеспечивают равномерное распределение тепла по всему помещению, что позволяет снизить температуру в помещении и уменьшить потребление энергии, так же к плюсам можно отнести медленное остывание бетона (стяжки).

Таким образом, энергоэффективные технологии отопления являются важным шагом к созданию более устойчивого и безопасного будущего, способствуя экономии ресурсов, улучшению качества жизни и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Источники

1. Снижение потребления энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.shtyl.ru/support/articles/snizhenie-potrebleniyaenergii> (Дата обращения: 03.05.2025).

2. Подготовка к отопительному сезону на промышленных предприятиях, готовь сани летом, а телегу зимой [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kvip.su/blog/sovety-pokupatelyam/podgotovka-k-otopitelnomu-sezonu-na-promyshlennykh-predpriyatiyakh-gotov-sani-letom-a-telegu-zimoy/> (обращение: 03.05.2025).

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВСПОМАГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ КРОМКООБЛИЦОВОЧНОГО ЧЕТЫРЕХСТОРОННЕГО СТАНКА С ЧПУ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ООО «ИМПЕРИАЛ»

Михеев С.А.¹, Коренков Д.А.²

^{1,2}ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

¹sergeymikheev5@yandex.ru, ²dimas.corenkov@yandex.ru

В статье рассмотрено техническое решение, направленное на повышение энергетической эффективности технологического оборудования, эксплуатируемого в условиях конкретной мебельной фабрики. Предложена схема системы управления автоматическим запуском и выключением с задержкой по времени для вытяжной системы и освещения кромкооблицовочного четырехстороннего станка. Проведена оценка экономической эффективности такого решения в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: энергоэффективность, экономия электрической энергии, автоматизация систем вентиляции.

MODERNIZATION OF THE ALIGNMENT SYSTEMS OF THE EDGE- BANDING FOUR-SIDED CNC MACHINE TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE PRODUCTION OF LLC «IMPERIAL»

Mikheev S.A.¹, Korenkov D.A.²

^{1,2} OSU named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

¹sergeymikheev5@yandex.ru, ²dimas.corenkov@yandex.ru

The article discusses a technical solution aimed at increasing the energy efficiency of technological equipment operated in a particular furniture factory. A scheme of a time-delayed automatic start-up and shutdown control system for the exhaust system and lighting of a four-sided edge banding machine is proposed. An assessment of the economic efficiency of such a solution in real-world operating conditions has been carried out.

Keywords: energy efficiency, saving of electric energy, automation of ventilation systems.

Энергоэффективность играет значительную роль при планировании и развитии любого производства. Достигнуть положительного эффекта можно разными способами: повышением эффективности работы технологического оборудования, улучшением качества электрической энергии, выбором

рациональной схемы электроснабжения и другими. Все они в итоге оказывают влияние на рентабельность производства конечного продукта. Однако любые технические решения и улучшения влекут за собой финансовые вложения, поэтому капиталоемкие разработки может себе позволить далеко не каждое предприятие.

В настоящий момент более приоритетной и актуальной задачей для абсолютно любого предприятия является дальнейшее развитие и недопущение ухудшения своего положения на рынке, что с учетом последних геополитических обстоятельств является не самой тривиальной задачей. В связи с этим, наиболее перспективными и имеющими большую вероятность остаться не только на бумаге, но и воплотиться в жизнь, оказываются проекты с наименьшими капиталовложениями.

В качестве такого энергосберегающего мероприятия авторами предлагается рассмотреть возможность модернизации вспомогательных систем кромкооблицовочного четырехстороннего с числовым программным управлением мощностью 105 кВт в реальных условиях его эксплуатации на мебельной фабрике ООО «Империал». Анализ статистики отказов работы оборудования, показывает, что по причине ремонтных и пусконаладочных работ за месяц оно простаивает в среднем около 20 часов. Несмотря на то, что такие работы могут длиться более 20 минут, во время ремонта и наладки может не происходить отключение вытяжной системы, а также освещения рабочих зон, где осуществляется промежуточный контроль качества обработки материала. При этом мощности вытяжной системы и освещения составляют соответственно 37 и 0,4 кВт.

Для оптимизации затрат электроэнергии на работу вспомогательных систем во время фактического простоя оборудования предлагается провести модернизацию их систем управления таким образом, чтобы они включались и выключались через 10 минут после запуска или останова главного конвейера. Принципиальная схема предлагаемой системы управления показана на рисунке 1. Такая задержка необходима для устранения коммутации вспомогательных систем во время непродолжительных пуско-наладочных работ, осуществляемых при условии быстрого реагирования сервисной службы. Обычно такая необходимость возникает при настройке торцовочных агрегатов. Также следует отметить, что рассматриваемый станок в своем составе имеет буферную зону для накопления опилок, что исключает загрязнение рабочего пространства при совершении технологических операций в условиях отключенной вытяжной системы. Её объема достаточно для накопления опилок за указанное время задержки запуска последней.

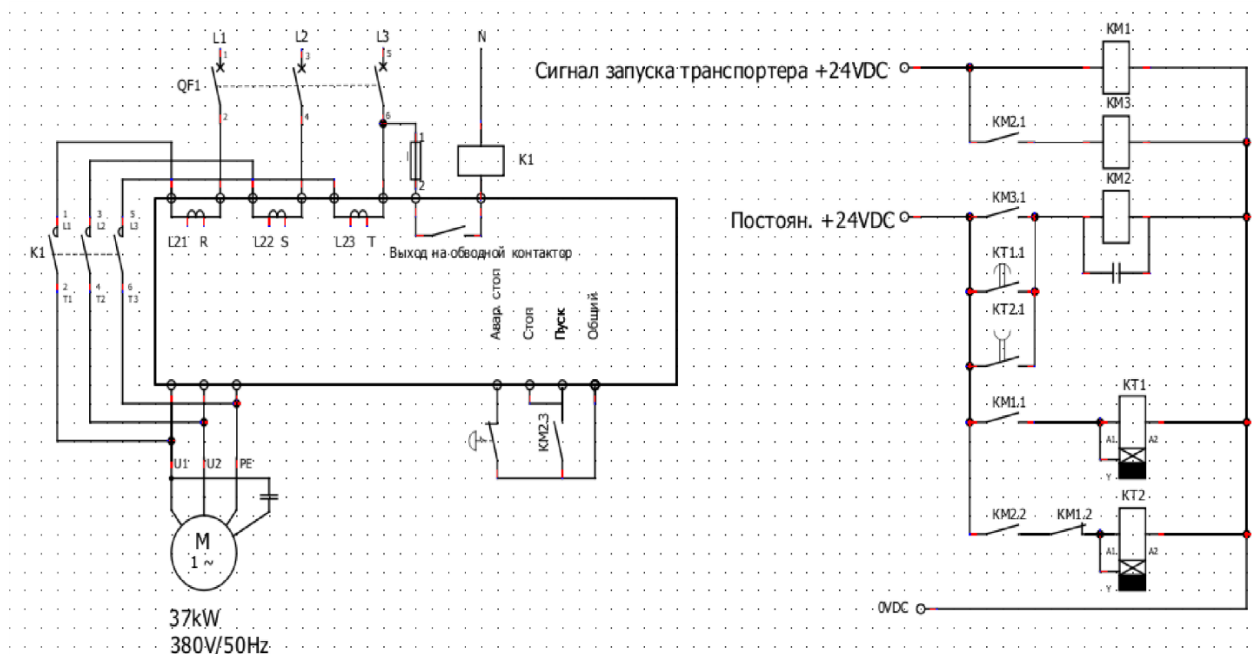


Рис. 1. Принципиальная схема системы управления аспирацией технологической установки

Проведем анализ экономической целесообразности использования предложенного технического решения. В качестве исходных использованы следующие данные: средняя наработка за месяц составляет 360 ч, длительность простоя из-за отказа – 20 ч, среднее число включений N вытяжной системы – 23. Номинальная мощность P_2 электродвигателя вытяжной системы – 37 кВт, пусковой ток I_n с учетом применения устройства плавного пуска 160 А, КПД составляет 0,9 и коэффициент мощности $\cos\varphi$ равен 0,8. Мощность P_1 , потребляемая в номинальном режиме работы из сети:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{37}{0,9} = 41,11 \text{ кВт.} \quad (1)$$

Электрическая энергия W_{np} , потребляемая вытяжной системой за время простоя t_{np} равна:

$$W_{np} = P_1 t_{np} = 41,11 \cdot 20 = 822,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (2)$$

Мощность, потребляемую из сети в пусковом режиме, определим, допуская, что коэффициент мощности и КПД не изменяются по сравнению с номинальным режимом:

$$P_{1n} = \sqrt{3} U_n I_n \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 160 \cdot 0,8 = 84,246 \text{ кВт,} \quad (3)$$

где U_n – линейное напряжение питающей сети, В.

Длительность пусковых режимов за расчетный период определим по формуле:

$$t_{n\Sigma} = t_n \cdot N / 3600 = 7 \cdot 23 / 3600 = 0,045 \text{ ч,} \quad (4)$$

где t_n – длительность запуска вытяжной системы, с.

Энергия, потребляемая в пусковых режимах равна:

$$W_n = P_n t_n = 84,246 \cdot 0,045 = 3,767 \text{ кВт} \cdot \text{ч.} \quad (5)$$

Статистика эксплуатации рассматриваемого технологического оборудования на мебельной фабрике ООО «Империял» свидетельствует, что реальная потребность в работе вытяжной системы за время аварийного простоя t_p составляет 5 часов. Тогда экономический эффект $\mathcal{E}\mathcal{E}\phi$ от внедрения предложенной системы управления составит [1]:

$$\mathcal{E}\mathcal{E}\phi = (W_{np} - P_1 t_p - W_n) \cdot C_{\mathcal{E}\mathcal{E}}, \quad (6)$$

где $C_{\mathcal{E}\mathcal{E}}$ – стоимость электроэнергии для промышленных предприятий на территории Орловской области, равная 8,15 руб./кВт·ч согласно portalу [2];

$$\mathcal{E}\mathcal{E}\phi = (822,2 - 41,11 \cdot 5 - 3,767) \cdot 8,15 = 4994,996 \text{ руб./мес.}$$

Аналогичный расчет для системы искусственного освещения показал возможность экономии до 36 руб. в месяц. Следовательно, суммарный месячный экономический эффект составляет около 5031 руб., тогда годовой равен 60372 руб. Оценим срок окупаемости T_o энергосберегающего мероприятия по методике [3]:

$$T_o = Inv / \mathcal{E}\mathcal{E}\phi, \quad (7)$$

где Inv – капитальные вложения в проект, руб.

Капитальные вложения (первоначальные инвестиции) определяются затратами на приобретение оборудования (два реле времени, три промежуточных реле, конденсатор, расходные материалы), транспортными расходами и оплатой труда при выполнении монтажных и пуско-наладочных работ и оцениваются в объеме 9820 руб., тогда:

$$T_o = 9820 / 60372 = 0,162 \text{ г.}$$

Таким образом, срок окупаемости не превышает одного года, и поэтому данное мероприятие следует считать эффективным. Дополнительный положительный эффект от его внедрения заключается в автоматизации работы вытяжной системы и освещения технологической установки.

Источники

1. Аминов Д.В., Кузнецова Е.В. Экономическая эффективность энергосбережения // Вестник Евразийской науки, 2019 №2. <https://esj.today/PDF/16ECVN219.pdf> (дата обращения: 12.03.25).

2. Тарифы на электроэнергию для средних предприятий [Электронный ресурс] <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dlya-srednih-predpriyatiy> (дата обращения: 30.03.25).

3. Бухмиров В.В., Нурахов Н.Н., Косарев П.Г., Фролов В.В. и др. Методические рекомендации по оценке эффективности энергосберегающих мероприятий. Томск: ИД ТГУ, 2014.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Напойкина А.В.¹, Тимергазизова Э.Р.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

arina.napoykina@mail.ru

В статье рассматриваются актуальные и перспективные технологии, направленные на развитие сектора генерации и распределении электрической энергии. Инвестиционная политика электрогенерирующих компания является инструментом повышения эффективности работы компании, а также повышения финансовой привлекательности компании на рынке. Правильный подход к формированию инвестиционной политики способствует значительному повышению показателей успешности организации при грамотном распределении финансовых средств.

Ключевые слова: инвестиции, электроэнергетика, энергосбережение, энергопотребление, технологические потери, рекуператор, искусственный интеллект.

PROMISING AREAS OF INVESTMENT POLICY IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

Napoykina A.V.¹, Timergazizova E.R.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan

arina.napoykina@mail.ru

The article discusses current and promising technologies aimed at developing the sector of generation and distribution of electric energy. The investment policy of the electric generating company is a tool to increase the efficiency of the company, as well as to increase the financial attractiveness of the company in the market. The correct approach to the formation of investment policy contributes to a significant increase in the success rates of the organization with the proper allocation of financial resources.

Keywords: investments, electric power industry, energy saving, energy consumption, technological losses, heat recovery, artificial intelligence.

Энергетика является основой функционирования всех секторов экономики Российской Федерации, и её развитие, во многом, определяет состояние и перспективы роста всей экономики государства [1]. И общемировая тенденция подтверждает данный тезис: согласно официальным

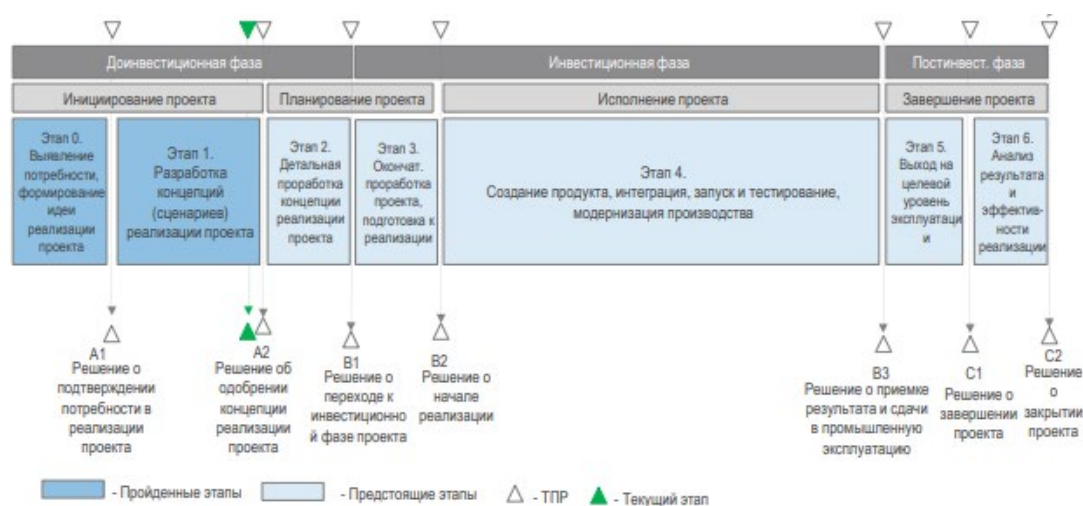
данным, на конец 2024 года Россия занимает четвёртое место в мире по производству и потреблению электрической энергии – производя свыше 340 млрд. кВт энергии, страна обеспечивает себя возможностью производить продукцию любого рода.

Но для активного роста сектора, производственные мощности должны также активно развиваться. И с целью достижения поставленных предприятием значительных результатов, они применяют стратегию инвестирования в новые перспективные технологии.

Инвестиции – это долгосрочные вложения предприятия во внедрение технологий различных отраслей для получения экономического и практического эффекта. Выделяют финансовые и реальные инвестиции.

Инвестиционная деятельность – процесс сложный и подвержен влиянию большого количества факторов: интенсивность процесса влияет на скорость осуществления воспроизводственного процесса, а также на активность преобразования деятельности компании в рыночной среде. Этапы реализации инвестиционного проекта указаны на рисунке.

Вложение капитала направлено на расширение производственного, научно-технического или финансового потенциалов предприятия. Тогда можно сделать вывод, что инвестиционная политика организации основывается непосредственно на его стратегических целях и ориентировании на конечный результат, заключающийся на повышение финансовой устойчивости организации.



Этапы реализации инвестиционных проектов

Следует помнить, что для эффективности ведения проекта необходимо учитывать также внезапное изменение внешней среды, учёта стратегической программы развития компании при планировании и внедрении инвестиционной программы, необходимость предварительного анализа

действующих рынков и конкурентов, а также значительная доля сотрудничества с кредитно-финансовыми организациями [2].

В сфере электроэнергетики основную долю инвестиционно привлекательных технологий занимают энергосберегающие. Они значительно привлекательнее иных капиталоемких проектов, которые предлагаются в энергетической сфере. Разработка механизмов по повышению энергетической эффективности предприятий может состоять как в снижении энергопотребления, так и в минимизации существующих потерь на пути к потребителям.

Если снижение технологических потерь сталкивается с проблемой больших расстояний, поскольку генерирующие и распределяющие мощности могут находиться в значительном отдалении от потребителей, и может быть решена лишь в малых масштабах, например, установкой мини-ТЭЦ малых мощностей для покрытия потребностей незначительного количества потребителей, то снижение энергопотребления на сегодняшний день рассматривается как самая достижимая цель в электроэнергетике.

Среди наиболее часто применяемых энергоэффективных технологий можно назвать: применение энергосберегающих ламп; частотно-регулируемых электроприводов, предназначенных для оптимизации электропотребления; применение компактных источников генерации, на примере солнечных панелей, устанавливаемых на питание светофоров; а также определение класса энергоэффективности зданий и оборудования.

Энергосберегающий эффект использования ЭСЛ заключается в достижении экономии электрической энергии на использование ламп до 80%, а также за счёт повышенного времени жизни по сравнению с обычными лампами.

Классы энергоэффективности зданий показывают, насколько рационально они расходуют энергетические ресурсы в процессе своей эксплуатации. В России зданиям может присвоиться один из десяти классов от «А» до «G» - и чем выше здание получает класс, тем эффективнее и экономнее расходуются ресурсы [3]. Так, например, здание класса «А» может экономить до 50% энергоресурсов, а здание на класс ниже – класса «В» - может экономить уже до 40%.

Классы энергоэффективности оборудования аналогично классам зданий имеют девять значений. Для обозначения наиболее энергоэффективных приборов устанавливают классы «А++» и «А+» (такое же правило относится к зданиям) [4]. Исходя из этого, производители оборудования и проектировщики зданий нацелены на повышения класса энергетической эффективности, поскольку это не только снизит

энергетическое потребление, но и сработает как маркетинговый ход, что поможет повысить продажи их товаров.

К числу наиболее «прожорливого» оборудования, которое используется как в офисных, так и в жилых и производственных помещениях, относится практически вся климатическая техника, и, в первую очередь, к ним относятся кондиционеры [5]. Для поиска решения снижения энергопотребления систем вентилирования помещений европейские компании (например, Noval и Dantherm) вводят новейшие технологические решения и конструкторские разработки в новых воздухораспределителях, которые формируют приточную струю дальностью до 18 метров, что уменьшает число необходимого оборудования на обеспечение воздухом как малых, так и крупных помещений.

В России важным является аспект отопления. По оценкам специалистов, в стране на отопление в холодный период жилых, офисных и производственных зданий тратится около трети всей энергии [5].

Рост цен на энергоносители способствует поиску решения по минимизации энергетического потребления. Внедрение энергосберегающих технологий в системах вентиляции и кондиционирования воздуха сводится к применению систем рекуперации.

Капитальные затраты на приобретение энергосберегающего оборудования значительно выше, чем на традиционное, поэтому перед приобретением, необходимо решить ряд вопросов:

- Преимущества энергоэффективного решения по сравнению с традиционным.
- Возможность безболезненного внедрения энергосберегающего оборудования на период, равный сроку окупаемости или близкий к нему.

Срок внедрения рекуперативных установок для средней полосы, как правило, составляет от 1 до 2 лет; для субтропического климата срок окупаемости вырастает в разы – до 3-4 лет.

Также сектор электроэнергетики рассматривает внедрение нейросетей и систем искусственного интеллекта. Управление предприятия электроэнергетики с помощью нейросетей можно рассматривать в качестве встроенной системы, которая способна управлять ею без помощи или с частичной помощью человека. Искусственный интеллект способен автоматизировать рутинные управленческие задачи, а также генерировать выводы по работе той или иной системы на основе различных данных и прошлого опыта. Как показывает практика, использование систем искусственного интеллекта и нейросетевых технологий способствует повышению производительности труда на 10%, что, в свою очередь, повышает доходность бизнеса на не менее, чем 3% [3].

Таким образом, сектор генерации и передачи электрической энергии, имеет определённое направление, в которое предпочитают вкладываться, что значительно сужает область применения и расширения технологических преимуществ при производстве и передаче электрической энергии.

Источники

1. Унижаев, Н. В. Особенности внедрения нейросетей и систем искусственного интеллекта на предприятиях электроэнергетики / Н. В. Унижаев // Вопросы инновационной экономики. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 215-232. – DOI 10.18334/vines.13.1.116945
2. Губанов, М. О создании фонда развития локальных энергосистем / М. Губанов, В. Киушкина, А. Широков // Энергетическая политика. – 2023. – № 9(188). – С. 70-83. – DOI 10.46920/2409-5516_2023_9188_70. – EDN PRZINP.
3. Постановление Правительства РФ от 27.09.2021 №1628 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов»
4. Федеральный закон от 23.11.2009 года №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»
5. Чабанный Александр Анатольевич Энергосберегающие технологии // Научные исследования. 2016. №9 (10). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoberegayuschie-tehnologii-1> (дата обращения: 08.04.2025).

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСАХ ЛЭП 220 кВ

Овечкин И.С.¹, Крюков А.В.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «ИрГУПС», г. Иркутск, Россия

iliaov2015@mail.ru

Цель данной работы состояла в разработке цифровых моделей, которые позволяют адекватно моделировать режимы плавки гололедно-изморозевых отложений (ГО) на грозозащитных тросах (ГЗТ) ЛЭП 220 кВ, питающей тяговые подстанции. Для ее достижения использовался программный продукт Fazonord AC-DC. Рассмотрены процессы плавки ГО током, который наводится в замкнутом контуре «ГЗТ – земля» за счет электромагнитных влияний. При моделировании осуществлялся контроль тока плавки в ГЗТ, температуры и толщины стенки гололеда.

Разработанные цифровые модели обеспечивают корректный учет всех значимых факторов, влияющих на режимы плавки гололеда. В отличие от известных подходов осуществляется моделирование динамики изменений контролируемых параметров, вызванных вариациями тяговых нагрузок при движении поездов. Разработанные модели позволяют использовать на практике наиболее обоснованные мероприятия по устранению ГО на ГЗТ. Предлагаемый подход применим для ЛЭП любой конструкции и класс напряжения.

Ключевые слова: ЛЭП, питающие тяговые подстанции, грозозащитный трос, плавка гололеда, моделирование.

MODELING OF ICE MELTING MODES ON LIGHTNING PROTECTION CABLES OF 220 kV POWER LINES

Ovechkin I.S.¹, A.V. Kryukov²

^{1,2} ISTU, Irkutsk, Russia

iliaov2015@mail.ru

The objective of this work was to develop digital models that allow adequate simulation of the melting modes of ice and frost deposits on the lightning protection cables of 220 kV transmission lines supplying traction substations. To achieve this, the Fazonord AC-DC software product was used. The processes of melting of ice and frost deposits by the current induced in the closed circuit "cable - earth" due to electromagnetic influences are considered. During the simulation, the melting current, temperature and ice wall thickness were monitored. The developed digital models provide correct consideration of all significant factors affecting the ice

melting modes. Unlike the known approaches, the dynamics of changes in the controlled parameters caused by variations in traction loads during train movement are simulated. The developed models will allow the most reasonable measures to eliminate ice in practice. The proposed approach is applicable to transmission lines of any design and voltage class.

Keywords: power transmission lines, traction substations, lightning protection cable, ice melting, modeling.

Гололедно-изморозевые отложения увеличивают нагрузку на опоры, арматуру, провода и тросы ЛЭП, что может приводить к их разрушению. На перерывы электроснабжения потребителей по причине ГО приходится порядка 17...20 % от общего числа отключений [1, 2]. Актуальность проблемы устранения ГО на ГЗТ подтверждается большим числом публикаций, посвященных ее решению. Так, например, в работе [3] для борьбы с обледенением предлагается применять ток однофазного замыкания на землю. Вопросы применения регулируемого реактора и трансформатора в цепи плавки гололеда «провод – земля» рассматриваются в [4]. Авторы статьи [5] предлагают решить проблему моделирования процессов плавки с помощью метода точечных источников поля. В работах [6-7] предлагается для плавки ГО на ГЗТ использовать наводимую токами фазных проводов ЭДС. При образовании замкнутого контура «трос-земля» или «трос-трос», по ГЗТ начинает протекать ток, который достаточен для плавки ГО; при этом температуры троса поднимаются до +1...+2 градуса [8].

Ниже представлены результаты компьютерного моделирования плавки ГО на ГЗТ линии электропередачи, питающей тяговые подстанции железнодорожного транспорта. Моделирование осуществлялось на основе метода мультифазного представления электроэнергетических систем (ЭЭС), который лежит в основе программного комплекса Fazonord AC-DC [9, 10]. Выполнен анализ полученных результатов и сделан вывод об адекватности разработанных цифровых моделей.

В качестве объекта исследований использовалась система электроснабжения (рис. 1) участка железной дороги, которая содержит следующие элементы: двухцепные ЛЭП 220 кВ, выполненные проводами марки АС-400, с грозозащитным тросом марки ГТК-20, которые располагаются на металлических опорах ЗП220-2-5.0; три тяговые подстанции (ТП) с трансформаторами ТДТНЖ-40000-220/27,5; два участка тяговой сети (ТС) протяженностью в 50 км, в состав которых входили контактные подвески ПБСМ-95+МФ-100 и рельсовые нити Р-65.

Тяговые нагрузки создавались движением двенадцати поездов массой 3000 т в нечетном и четном направлениях с интервалом в 15 мин. Рассматривался режим одностороннего питания ЛЭП 220 кВ с нагрузкой на

приемном конце линии $57 + j30$ МВ·А на фазу. Поперечное сечение системы токоведущих частей показано на рис. 2. Грозозащитный трос размещался по всей длине линии.

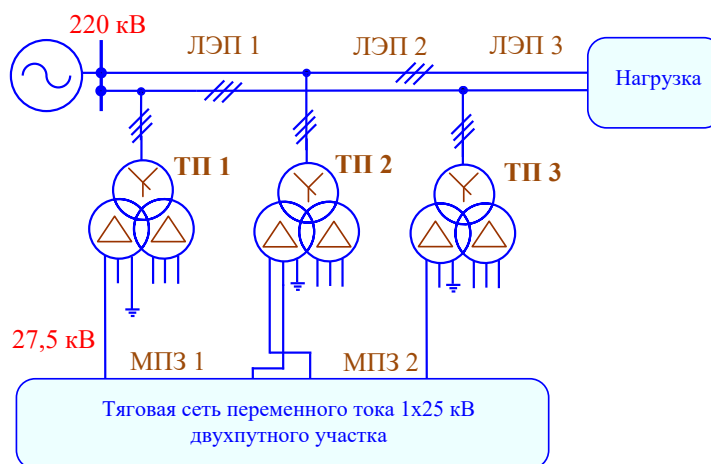


Рис. 1. Схема системы электроснабжения

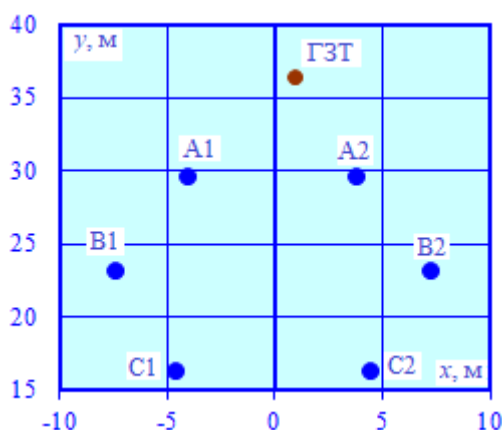


Рис. 2. Расположение токоведущих частей

Для плавки гололеда на ГЗТ использовался ток, индуцируемый в замкнутом контуре «грозозащитный трос – земля» фазными токами ЛЭП (рис. 3). Для регулирования величины тока в контуре «ГЗТ – земля» использовалось компенсирующее устройство с варьируемой величиной емкостного сопротивления X_c , выполненное на основе конденсаторных батарей.

Моделирование процессов плавки гололеда проведено в программном комплексе Fazonord AC-DC. Общее время моделирования составило 267 минут. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 4–5.

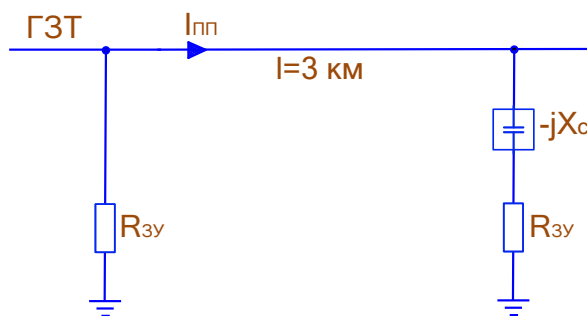


Рис. 3. Схема контура «ГЗТ – земля»

На рис. 4 изображены зависимости температуры ГЗТ $\vartheta_{ГЗТ}(t)$, толщины стенки гололеда $d_{ГЗТ}(t)$ и тока подогрева $I_{II}(t)$ от времени. Из них видно, что за 3 минуты происходит нагрев ГЗТ до температуры 0°C и с этого момента начинается плавка гололеда. Из рис. 4, б видно, что общее время плавки гололеда составляет 35 минут и удовлетворяет нормативным требованиям. После расплавления гололеда происходит увеличение $\vartheta_{ГЗТ}(t)$ до значений, близких к 1°C , коэффициент вариации составляет 12 %. Зависимость $I_{II}(t)$ имеет нелинейный характер. Максимальное значение тока составляет 112 А, а минимальное 99 А.

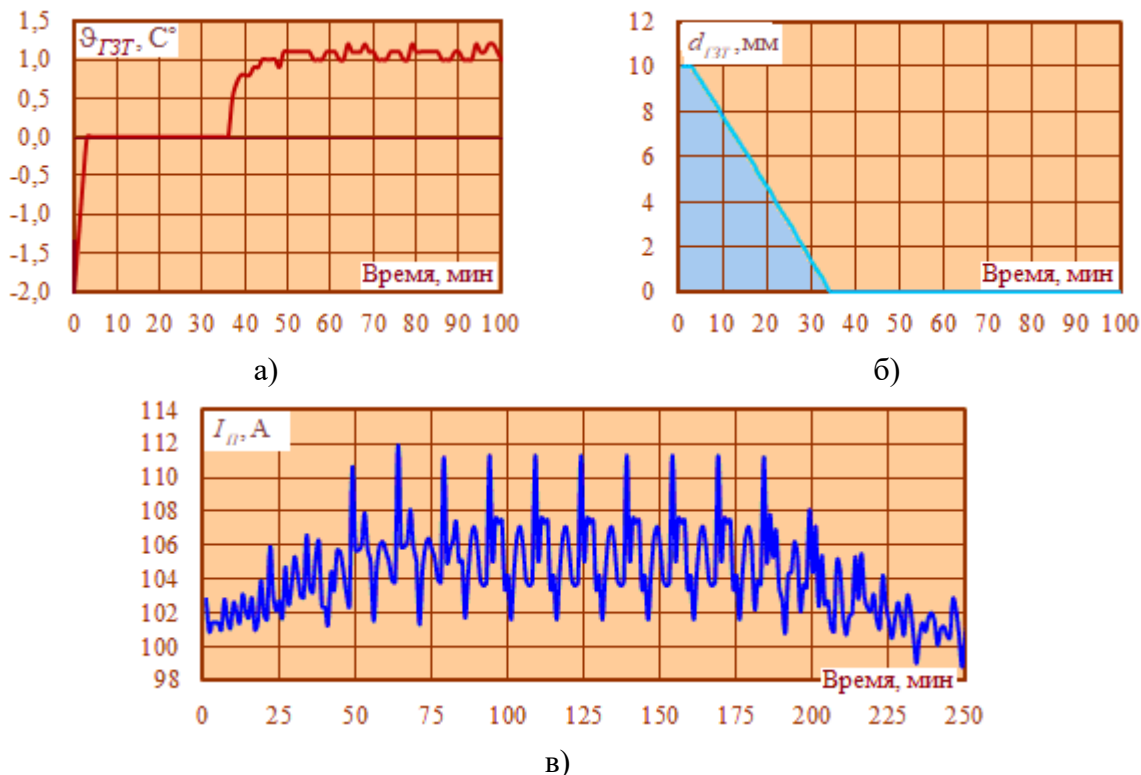


Рис. 4. Временные зависимости температуры ГЗТ (а), толщины стенки гололеда (б) и тока профилактического подогрева в ГЗТ (в)

На рис. 5 представлены временные зависимости эффективного тока с учетом высших гармоник (ВГ) через заземляющее устройство опоры. Из него видно, что характер зависимостей $I(t)$ в начале и конце участка схож, но в конце наблюдается снижение величины тока. Разница составляет 3,5...3,9 %; при этом максимальное значение в начале контура равно 112 А, в конце – 108 А. Коэффициент вариации $I(t)$ в начале контура равен 2,5 %, что на 0,1 % меньше чем в конце.

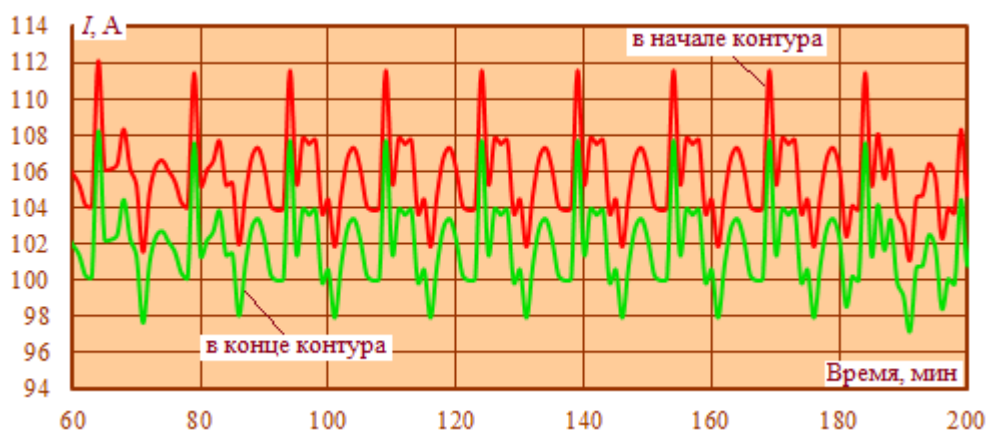


Рис. 5. Зависимость тока с учетом ВГ, протекающего через заземляющее устройство опор в начале и конце контура

Заключение. Представлена методика компьютерного моделирования процессов плавки гололеда на ГЗТ ЛЭП, питающих тяговые подстанции. Определение наведенных токов плавки проведено с учетом высших гармоник, генерируемых выпрямительными электровозами переменного тока. Разработаны цифровые модели в программном комплексе Fazonord, позволяющие корректно определять режим плавки ГО на ГЗТ с учетом тяговой нагрузки. Методика универсальна и подходит для электрических сетей любой конфигурации.

Источники

1. Итоги прохождения группой компаний «Россети» осенне-зимнего периода 2022/2023 годов. Основные задачи по подготовке к осенне-зимнему периоду 2023/2024 годов [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». – 2023. – Режим доступа: <https://clck.ru/3Fi3Ew>.
2. Итоги прохождения группой компаний «Россети» осенне-зимнего периода 2023/2024 годов. Основные задачи по подготовке к осенне-зимнему периоду 2024/2025 годов [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». – 2024. – Режим доступа: <https://clck.ru/3Fi3M4>.

3. K. Yu, L. Xie, Y. Liu, X. Zeng and Y. Gu, "An Online De-icing Method Based on Single-Phase Grounding Fault Current for Distribution Lines," 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON), Guangzhou, China, 2018, pp. 3796-3800.

4. X. Xie et al., "Research on the New Technology of Uninterruptible Electric Ice Melting in Distribution Network," 2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, China, 2023, pp. 955-959

5. Князев, С. Ю. Моделирование плавки гололеда на проводах воздушных линий электропередач с помощью метода точечных источников поля / С. Ю. Князев, Е. Е. Щербакова, А. А. Щербаков // Пром-Инжиниринг : труды II международной научно-технической конференции, Челябинск - Новочеркасск - Волгоград - Астана, 19–20 мая 2016 года / ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет). – Челябинск - Новочеркасск - Волгоград - Астана: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 423-428.

6. Shovkoplyas, S.S. (2020). Mathematical Models of Ice Melting Schemes on Lightning Protection Ropes of Overhead Transmission Lines. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), pp. 1095-1100.

7. Korovkin, N.V., Goncharov, V., & Silin, N.V. (2014). Modelling of ice-melting circuit under influence of EMF induced by the currents of overhead lines. WSEAS Transactions on Circuits and Systems archive, 13, pp. 476-484.

8. Masoud Farzaneh. Atmospheric Icing of Power Networks. // Springer Science Business Media B.V. – 2008. – ISBN: 978-1-4020-8530-7. – 388 p.

9. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.

10. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат: монография. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Директ-Медиа, 2023. 198 с.

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ КАБЕЛЬНЫМИ ЛИНИЯМИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Петров А.В.¹, Галиев И.Ф.², Гарифуллин М.Ш.³

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹aleksey_destln@mail.ru

Кабельные линии среднего напряжения (6–35 кВ) являются основой распределительных сетей России, обеспечивая энергоснабжение городов, промышленности и сельских территорий. Однако их износ достигает 40–80% в различных регионах, что приводит к 70% аварий в сетях 6–10 кВ и значительным экономическим потерям. В статье анализируется проблема изношенности кабелей, включая статистику по регионам и типам изоляции, рассматриваются существующие методы диагностики (выжидание отказа, испытания повышенным напряжением, диагностика частичных разрядов) и их ограничения. Описывается зарубежный опыт, включая неразрушающие методы диагностики, технологии Smart Grid и управление активами по стандарту ISO 55001. Предложены стратегии управления жизненным циклом кабелей, адаптированные к российским условиям, с учетом типа изоляции (бумажная пропитанная, сшитый полиэтилен), климатических условий и степени износа. Рекомендации включают внедрение диагностики частичных разрядов, профилактическое обслуживание, модернизацию сетей и обучение персонала.

Ключевые слова: кабельные линии, частичные разряды, диагностика состояния, экономическая эффективность, надежность.

CONTROL STRATEGY OF CABLE LINES OF DISTRIBUTION NETWORKS

Petrov A.V.¹, Galiev I. F.², Garifullin M. S.³

^{1,2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹aleksey_destln@mail.ru

Medium voltage (6-35 kV) cable lines are the backbone of Russia's distribution networks, providing energy supply to cities, industry, and rural areas. However, their wear reaches 40-80% in different regions, which leads to 70% of accidents in 6-10 kV networks and significant economic losses. The article analyzes the problem of cable wear, including statistics on regions and types of insulation, discusses existing diagnostic methods (failure waiting, high voltage testing, partial discharge diagnostics) and their limitations. Foreign experience is described, including non-destructive diagnostic methods, Smart Grid technologies and asset management

according to ISO 55001 standard. Cable lifecycle management strategies adapted to Russian conditions are proposed, taking into account the type of insulation (paper impregnated, crosslinked polyethylene), climatic conditions and degree of wear. Recommendations include the introduction of partial discharge diagnostics, preventive maintenance, network modernization, and staff training.

Keywords: cable lines, partial discharges, condition diagnostics, economic efficiency, reliability.

Кабельные линии среднего напряжения составляют основу распределительных электрических сетей России, обеспечивая электроснабжение городов промышленных объектов. В электросетевой инфраструктуре используется большое количество кабелей с бумажнопропиточной изоляцией (БПИ) с минимальным остаточным ресурсом эксплуатации. Согласно положению ПАО «Россети» срок службы кабелей с учётом эксплуатационных мероприятий должен составлять не менее 30 лет. Однако чаще всего фактический срок эксплуатации кабельных линий (КЛ) значительно превышает данное значение, что, в свою очередь, приводит к возникновению частых технологических отключений. Общая протяженность кабельных сетей напряжением 3–20 кВ составляет примерно 250 тыс. км. Аварии в сетях 6–10 кВ составляют около 70 % всех нарушений электроснабжения потребителей. Основные причины включают старение изоляции, перенапряжения, дефекты монтажа и механические повреждения. Проблема усугубляется недостаточным финансированием, нехваткой специалистов и устаревшими методами диагностики.

Цель статьи – проанализировать состояния КЛ СН в России, включая износ, причины аварий, методы диагностики, зарубежный опыт и предложить стратегии управления, адаптированные к условиям РФ [1,2].

Общая доля БПИ-кабелей в РФ СН составляет 60%, СПЭ – 35%, резиновая/ПВХ – 5%. В настоящее время в существующих и проектируемых сетях активно внедряют СПЭ-кабели, однако невозможна единовременная замена изоляции во всех сетях, это обусловлено значительными материальными затратами, которые замедляют модернизацию сети.

Основная доля аварийных событий обусловлена невыполнением необходимых объёмов работ по обслуживанию и диагностики КЛ и составляют около 70% (износ и старение изоляции). Около 10-15% случаев повреждений КЛ возникают в результате воздействия посторонних лиц и внешних факторов (земельно-строительные работы). Повреждения, приходящие на наличие дефектов в конструкции или вследствие монтажа, составляют 7% от общего числа. К остальным причинам повреждения относят неблагоприятные природные явления. Значительное количество аварийных отключений

происходит вследствие естественного старения изоляции, приводящего к её дальнейшему разрушению и пробоем в результате несвоевременного устранения проблемы (ОЗЗ, межфазных КЗ и под действием перенапряжений различной природы). [3-5]

Так, по данным ПАО «Россети» в Челябэнерго за 2018-2022 годы зафиксировано 2170 нарушений, 43% - групповые, вызванные перенапряжением. Также, 60% сетей составляют БПИ-кабели, чей средний возраст составляет 44 года. Частота ремонтов – 0,1 на км в год, выше среднего по РФ. В Новосибирской и Красноярской областях износ достигает 80% из-за повышенной нагрузки и эксплуатации КЛ до 50 лет. Аварийность выше среднего в 1,5 раза. В Ленэнерго износ 65%, из-за роста энергопотребления, также присутствуют механические повреждения при раскопках – 15% нарушений [6-9].

Отсюда следует, что в современных распределительных сетях используются большое количество КЛ с минимальным остаточным сроком службы, либо полностью исчерпавшие его.

На сегодняшний день для КЛ в России применяют стратегии "корректирующего обслуживания", при которой ремонт проводится только при возникновении дефектов. В долгосрочной перспективе это приводит к увеличению числа аварий, снижению надежности сети и росту затрат на устранение неисправностей, тогда же уже используется подход «работы до отказа», когда затраты обслуживания (ОРЕХ) становятся больше затрат монтажа новых КЛ (САРЕХ). Их достоинством являются минимальные затраты на обслуживание в краткосрочной перспективе и отсутствие в необходимости сложного оборудования, однако существует и недостаток в высоком риске внеплановых отключений и увеличение эксплуатационных затрат (ОРЕХ) из-за аварийных ремонтов, а также снижение надежности энергоснабжения.

Проактивный подход управления основан на внедрении инженерных стандартов и стратегий, направленных на снижение отказов и повышение надежности. Данный подход реализуется на всем жизненном цикле КЛ. Подход позволяет создать стандартизированную и контролируемую систему закупки и установки компонентов, что в перспективе снижает вероятность отказов и упрощает управление активами [10,11].

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), КЛ 6-35 Кв должны ежегодно подвергаться испытаниям повышенным выпрямленным напряжением, в 4-6 раз превышающее номинальное в течении 5-10 минут [12]. Во время испытаний измеряются токи утечки и их асимметрия, что позволяет выявить дефекты изоляции, однако испытания оказывают разрушительное воздействие на изоляцию, особенно для БПИ-кабелей. Кроме того, испытания

не гарантируют безаварийной работы, так как не выявляют дефекты, которые проявляются только под рабочей нагрузкой.

Методы оценки и диагностики подразделяют на офлайн и онлайн (табл. 1 и табл. 2) [13].

Офлайн метод требуют отключения кабеля от сети и использование внешнего источника питания. Они стандартизированы, но не отражают реальные условия эксплуатации.

Таблица 1

Офлайн методы оценки и диагностики КЛ

Метод	Преимущества	Недостатки
Измерения частичных разрядов (PD)	Высокая чувствительность, точная локализация	Требуется оборудования и не отражает реальных условий
Измерение сопротивления изоляции	Простота, выявляет влагу	Ограниченная чувствительность к дефектам
Измерение емкости	Выявляет изменение изоляции	Не определяет конкретные данные
DC Hipot тестирование	Выявляет крупные дефекты изоляции	Риск повреждения изоляции
Тестирование VLF	Чувствителен к водяным деревьям	Ограниченная локализация, требует отключение
Тангенс угла потерь (DDF)	Чувствителен к деградации	Требуется оборудования, сложная интерпретация
Спектроскопия в частотной области (FDS)	Выявляет химическую деградацию	Сложность, высокая стоимость
Анализ диэлектрического отклика (DRA)	Высокая точность	Требуется специально обученный персонал
Рефлектометрия во временной области (TDR)	Высокая точность	Низкая чувствительность к мелким дефектам

Онлайн методы проводятся во время нормальной эксплуатации, что делает их экономическими и менее инвазивными.

Таблица 2

Онлайн методы оценки и диагностики КЛ

Метод	Преимущества	Недостатки
Онлайн измерения ЧР (PD)	Непрерывный мониторинг, отражает реальные условия,	Чувствительность к шуму, сложность локализации

	раннее обнаружение дефектов	
Инфракрасная термография	Неразрушающий метод, простота применения	Ограниченная глубина анализа
Мониторинг электромагнитных помех (EMI)	Непрерывный мониторинг, подходит для больших сетей	Чувствительность к помехам, сложность интерпритации
Мониторинг радиочастотных помех (RFI)	Высокая чувствительность к ЧР, удаленный мониторинг	Высокая стоимость, сложная обработка
Распределенное измерение температуры (DTS)	Высокая точность локализация дефектов	Высокая стоимость установки, сложность интеграции

На сегодняшний день сетевые компании в России применяют диагностику ЧР, измерения тангенса угла диэлектрических потерь для оценки состояния КЛ.

Диагностическая цель тестирования на ЧР заключается в выявлении наличия скрытых, локализованных электрических разрядов в кабельной цепи, которые могут возникать либо внутри изоляционного материала, на границе раздела металлической и диэлектрической поверхностей, либо на границе раздела двух диэлектрических поверхностей. Такие разряды вызваны разложением воздуха в пустотах и в конечном итоге приводят к разрушению диэлектрического материала, что в конечном итоге приводит к отказу.

Типы дефектов, выявленных при испытании на частичный разряд, чаще всего являются "сухими электрическими" дефектами, находящимися на различных стадиях: латентные/неактивные, активные/ухудшающиеся и близкие к отказу. Другие механизмы разложения, такие как термическое и нейтральное разложение, а также внутреннее загрязнение, также могут вызывать активность частичного разряда на разных стадиях. Водные триинги не генерируют частичные разряды на стадиях их зарождения и роста; активность PD из областей, покрытых водными триингами, возникает только после переходных процессов, таких как перенапряжения, которые преобразуют эти области в электрические деревья. Возникновение частичного разряда на стадии формирования электрического триинга можно считать близким к отказу и, следовательно, "слишком поздним" для целей ранней диагностики, за исключением случаев, когда электрические триинги образуются между бумажными слоями в PILC кабелях [14,15].

Рефлектометрия во временной области (TDR), также известная как импульсное эхо или эхометр, была впервые использована в 1990-х годах [16] и сегодня является одним из наиболее широко используемых методов

предварительной локализации неисправностей, который локализует дефекты (обрывы, коррозию) через анализ отраженных импульсов.

Рефлектометрия позволяет определить точное место обрыва, короткого замыкания, заломы или другого дефекта в кабеле, что позволяет значительно сократить время поиска и устранения проблемы.

Высокочастотный импульс посылается в кабель между жилами сердечника и оболочки. Импульс распространяется по кабелю с предполагаемой постоянной скоростью до тех пор, пока не достигнет разрыва в импедансе перенапряжения, наблюдаемом импульсом. Импульс проходит по кабелю и положительно отражается на конце кабеля или при любом обрыве цепи. В точке короткого замыкания (обрыв шунта) этот импульс низкого напряжения отражается отрицательно [17].

Поскольку изоляция является наиболее уязвимой частью кабеля, большинство методов оценки в зарубежье сосредоточены на оценке изоляции. Среди различных методов тестирования изоляции анализ PD, FTIR, $\text{tg}\Delta$, измерение DDF, VLF, Модуль индетора, испытания на диэлектрическую прочность и оценка сопротивления изоляции, являются обычно используемыми подходами в стратегиях прогнозирования и мониторинга.

Модернизация кабельных линий среднего напряжения (СН) в России, опираясь на зарубежный опыт, требует стратегического перехода к проактивным и цифровизированным подходам, успешно реализованным в странах зарубежья. Ключевым приоритетом является замена устаревших бумажно-масляных кабелей (BPI/PILC), составляющих 60% сетей и имеющих износ до 80% в регионах, таких как Новосибирск, на современные кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (XLPE) или триинго-устойчивого XLPE (TR-XLPE). В Дании подобная замена снизила частоту отказов до 0,1 сбой на 100 км в год, демонстрируя высокую надежность и устойчивость XLPE к влаге и термическим нагрузкам [13]. Эта стратегия особенно важна для городских и промышленных зон России, где сбои BPI-кабелей, вызванные старением изоляции и перенапряжениями, приводят к значительным экономическим потерям. Зарубежные практики демонстрируют важность онлайн-мониторинга, включая частичные разряды (PD) и распределенное измерение температуры (DTS), для раннего выявления деградации, что особенно актуально для XLPE-кабелей (35% сетей) в российских мегаполисах. Внедрение технологий умных сетей и ИИ, как в европейских Smart Grid проектах, позволит оптимизировать управление высоконагруженными городскими сетями, где сверхпроводящие кабели (HTS) могут повысить пропускную способность, как, например, в мегаполисах Кореи [18]. Для суровых климатических условий России, таких как Сибирь, зарубежные практики рекомендуют устойчивые материалы, такие как

NEPR, и IoT-системы для удаленного мониторинга, успешно применяемые в северных регионах Европы.

Для успешной управления кабельными линиями среднего напряжения в России необходимо внедрить стандарты ISO 55001, которые, будучи широко применяемыми за рубежом, обеспечат эффективное управление активами и снижение аварийности. Пилотные проекты, аналогичные датским, и обучение персонала по зарубежным методикам ускорят цифровизацию и локализацию современных технологий, поддерживая рост рынка СН в России с прогнозируемым CAGR 5,14% до 2028 года, что соответствует глобальным тенденциям в развитии энергосетей.

Источники

1. Анализ статистики технологических нарушений в кабельных распределительных сетях 6 (10) кВ / А.В. Коржов, В.И. Сафонов, Р.М. о. Бабаев, Я.Е. Коростелев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 5–13. DOI: 10.14529/power230401. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-statistiki-tehnologicheskikh-narusheniy-v-kabelnyh-raspredelitelnyh-setyah-6-10-kv/viewer> (дата обращения: 11.05.2025).

2. Новикова Фрейре Шавиер Ж. да К., Баширов М.Г., Прахов И.В. Разработка метода количественной оценки технического состояния кабельных линий 6 кВ // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 9. С.63-67;[Электронный ресурс] URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35122> (дата обращения: 11.05.2025).

3. Kuzmin R.S., Menshikov V.A., Kuzmin I.S. Switching Overvoltages in Single Phase Ground Fault Mode in Networks 6–10 kV // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. P. 4. (дата обращения: 11.05.2025).

4. Петров Д.В., Маругин В.И., Петров А.В. Анализ аварийности и сроков восстановления городских кабельных линий 6–10 кВ // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2022. № 1 (1). С. 7–14. DOI: 10.37493/2307-907X.2022.1.1. (дата обращения: 11.05.2025).

5. Михалкова Е.Г., Турсунбекова А.Б. Применение актуальных технических решений для повышения эффективности работы распределительных электрических сетей // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. Вып. 11-1 (55). С. 163–172. (дата обращения: 11.05.2025).

6. Технологические нарушения. Сводные данные об аварийных отключениях в месяц по границам территориальных зон деятельности ОАО «МРСК Урала» в 2022 году // Россети Урал: сайт. URL: <https://rosseti->

ural.ru/disclosure/monopoly/characteristic/disturbances/ (дата обращения: 11.05.2025).

7. О сводных данных об аварийных отключениях и мероприятиях по их устранению // Россети СевероЗапад: сайт. URL: <https://rosseti-sz.ru/infodisclosure/2standartdisclosure/-11avarii/> (дата обращения: 11.05.2025).

8. Информация о сводных данных об аварийных отключениях в месяц по границам территориальных зон деятельности организации, вызванных авариями или внеплановыми отключениями объектов электросетевого хозяйства, с указанием даты аварийного отключения объектов электросетевого хозяйства и включения их в работу // Россети Ленэнерго: сайт. URL: <https://rosseti-lenenergo.ru/standart/4006.html#tab1664> (дата обращения: 11.05.2025).

9. Техническое состояние сетей // Россети Центр: сайт. URL: <https://www.mrsk-1.ru/customers/territory/networks/> (дата обращения: 11.05.2025).

10. Steennis, F; «Electrical Power Cable Engineering» FL: 2012. (дата обращения: 11.05.2025).

11. Gockenbach, E; "Application of a Combined Technical Approach for Cable" - Jicable 2019, Paper D8-6. (дата обращения: 11.05.2025).

12. "Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Седьмое издание. (утв. Приказом Минэнерго России от 20.05.2003 N 187) (дата обращения: 11.05.2025).

13. Rafati, A.; Mirshekali, H.; Shaker, H.R.; Bayati, N. Power Grid Renovation: A Comprehensive Review of Technical Challenges and Innovations for Medium Voltage Cable Replacement. Smart Cities 2024,7, 3727–3763. <https://doi.org/10.3390/smartcities7060144> (дата обращения: 11.05.2025).

14. Базелян Э.М., Городецкий В.И. Эксплуатация и ремонт кабельных линий электропередачи. – Москва: Энергоатомиздат. – 208 с. (дата обращения: 11.05.2025).

15. Thue, W. «Testing the effectiveness of tests after installation on power cable systems» -Jicable 2015, Paper D6.3. (дата обращения: 11.05.2025).

16. Волноводные радарные уровнемеры // Журнал «ИСУП» [Электронный ресурс] URL: <https://isup.ru/articles/58/18717/> (дата обращения: 11.05.2025).

17. Метод импульсной рефлектометрии (TDR). Теоретические основы. ЭРСТЕД. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/osnovyi-reflektometrii/> (дата обращения: 11.05.2025).

18. Lee, S.J.; Park, M.; Yu, I.K.; Won, Y.; Kwak, Y.; Lee, C. Recent Status and Progress on HTS Cables for AC and DC Power Transmission in Korea. IEEE

Trans. Appl. Supercond. 2018, 28, 5401205. [Электронный ресурс] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8327882> (дата обращения: 11.05.2025).

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Петров Т.И.

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

tobac15@mail.ru

В данной статье рассматривается применение топологической оптимизации (ТО) к конструкции электрических машин для повышения их энергоэффективности. Применение методов ТО позволяет уменьшить материалоемкость, снизить потери энергии и повысить КПД электрических двигателей. Представлены основные принципы топологической оптимизации, приведены примеры расчетов и результаты моделирования.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, электрические машины, энергоэффективность

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF ELECTRIC MACHINES: ENERGY SAVING AND MODERN TECHNOLOGIES

Petrov T. I.

KSPEU, Kazan, Russia

tobac15@mail.ru

This article discusses the application of topology optimization (TO) to the design of electrical machines to improve their energy efficiency. The use of TO methods allows reducing material consumption, reducing energy losses and increasing the efficiency of electric motors. The main principles of topology optimization are presented, calculation examples and modeling results are given.

Keywords: topology optimization, electrical machines, energy efficiency

Современные тенденции в области энергосбережения требуют разработки новых подходов к проектированию электрических машин [1-3]. Одним из наиболее перспективных методов является топологическая оптимизация, позволяющая улучшить распределение материала в конструкции двигателя для снижения потерь энергии [4]. ТО уже широко применяется в машиностроении, авиации и строительстве, но в области электротехнических систем она только набирает популярность.

Топологическая оптимизация базируется на численных методах расчета, таких как метод конечных элементов (МКЭ). Основная идея заключается в

перераспределении материала в заданном объеме с целью минимизации массы, потерь или максимизации КПД.

Для электрических машин основными критериями оптимизации являются: минимизация потерь в стали (вихревые и гистерезисные потери); уменьшение массогабаритных характеристик при сохранении номинальной мощности; улучшение характеристик магнитного поля для снижения перегрева.

Методы ТО могут использоваться для проектирования ротора и статора двигателей, а также для оптимизации формы магнитопроводов.

В качестве примера рассмотрим топологическую оптимизацию ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Целевая функция формулируется как:

$$\min f(\rho) = \int_{\Omega} (P_{\text{вихр}} + P_{\text{магн}} + P_{\text{эл}}) d\Omega$$

где: $P_{\text{вихр}}$ - потери на вихревые токи, $P_{\text{магн}}$ - потери в магнитопроводе, $P_{\text{эл}}$ – электрические потери, ρ – переменная плотности материала, Ω - расчетная область.

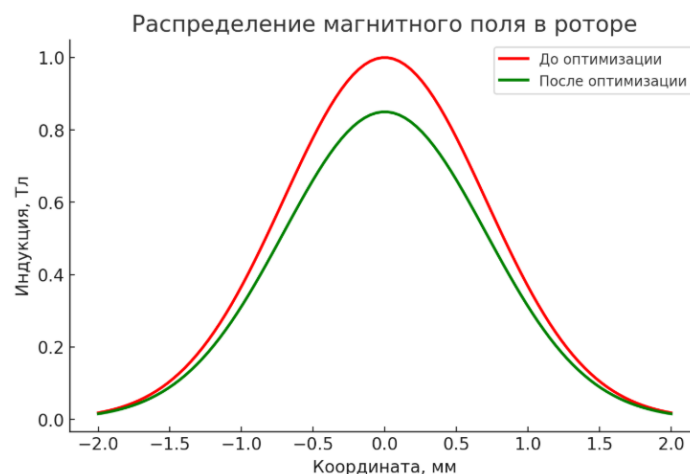
Ограничения: максимальный момент инерции ротора не превышает заданного значения; индукция в воздушном зазоре не выходит за допустимые пределы; масса ротора не превышает нормативное значение. Для решения используем метод МКЭ с программным обеспечением Elcut.

Выполним расчет ТО ротора СДПМ. Для анализа используем модель с входными параметрами: мощность: 5 кВт; частота вращения: 1500 об/мин.; напряжение: 400 В.

В процессе оптимизации произведено 50 итераций, по результатам которых достигнуто снижение массы ротора на 18% при сохранении момента на валу. Рисунок иллюстрирует изменение распределения магнитного поля в роторе до и после оптимизации.

Результаты моделирования показали, что применение топологической оптимизации позволяет:

- Снизить потери в стали до 15-18%.
- Уменьшить массу ротора на 18%.
- Сохранить характеристики магнитного поля в допустимых пределах.



Распределение магнитного поля в роторе

ТО является перспективным методом повышения энергоэффективности электрических машин. В дальнейшем планируется расширение методики на многокритериальную оптимизацию и экспериментальная проверка полученных конструкций.

Источники

1. Petrov, T. Theoretical aspects of optimization synchronous machine rotors / T. Petrov, A. Safin // E3s Web of Conferences, Prague, Czech Republic, 14–15 мая 2020 года. Vol. 178. – Prague, Czech Republic: EDP Sciences, 2020. – P. 01049. – DOI 10.1051/e3sconf/202017801049.
2. Thermal Model of a Linear Electric Machine / A. Safin, A. Kopylov, R. Gibadullin [et al.] // Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019, Lipetsk, 20–22 ноября 2019 года. – Lipetsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 426-428. – DOI 10.1109/SUMMA48161.2019.8947532.
3. Adaptive control system of the pumping unit / A. N. Tsvetkov, A. R. Safin, I. V. Ivshin [et al.] // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2019. – Vol. 8, No. 5 Special Issue 3. – P. 289-291. – DOI 10.35940/ijeat.E1064.0785S319.
4. The use of a digital controller in the loading system of the test bench to improve the accuracy of simulating the modes of oil pumping units / T. Petrov, V. Kornilov, A. Safin [et al.] // E3S Web of Conferences, Saint-Petersburg, 29–30 октября 2020 года. Vol. 220. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2020. – P. 01072. – DOI 10.1051/e3sconf/202022001072.

КРИТЕРИИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рахимов О. С.¹, Тошходжаева М.И.²

^{1,2} ХПИТТУ им. академика М.С.Осими, г. Худжанд, Таджикистан

В работе приведены главные критерии оценки эффективности использования энергосберегающих технологий, приведены классы экономии, приведены рекомендации по повышению энергоэффективности

Ключевые слова: критерий, экономия, классификация, энергия, технология

CRITERIA FOR ECONOMIC ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES

Rakhimov O. S.¹, Toshkhodjaeva M. I.²

^{1,2} KPITTU nam. academician M.S.Osimi, Khujand, Tajikistan

The paper presents the main criteria for assessing the efficiency of using energy-saving technologies, provides savings classes, and provides recommendations for improving energy efficiency

Key words: criterion, economy, classification, energy, technology

Результате анализа критериев экономической оценки эффективности использования энергетических ресурсов в жилых и общественных (на базе нормативно-директивных документов используемых в РФ [Приказ Минстроя России №399 от 06/06/2016 и стандарта 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышения энергоэффективности»] и странах Западной Европы) установлено, что для жилых и общественных зданий интегральным показателем энергоэффективности является уровень технологического развития, который определяется на базе показателей энергетической сертификации зданий.

В настоящее время для отдельных электроприборов, используемых в быту: Энергетическая сертификация жилых и общественных зданий составляется по результатам проведения энергетического аудита (энергоаудита) и составления энергетического паспорта здания (путем сравнения проектных и реальных показателей).

- осветительные приборы;
- нагревательные приборы;
- кондиционеры;

- бытовые электроприборы,

а также для многоквартирных домов для оценки энергетической эффективности используется интегральный показатель класс энергоэффективности.

Класс энергоэффективности жилого дома или электробытовых приборов показывает степень эффективности расхода тепловой и электрической энергии в процессе эксплуатации и обозначается латинскими буквами - A⁺⁺, A⁺, A, B, C, D, E, F и G. Здания и приборы со средним «нормальным или расчетным потреблением» обозначаются буквой D, т.е. потребление энергии составляет от 0 до -15 % (до меньше чем нормативное на 15%).

Высочайший класс энергоэффективности обозначается буквой A⁺⁺, у этих приборов или здания потребление энергии от 60% и менее нормативного или базового уровня для этого типа потребителя значения. Обозначения класса энергоэффективности потребителей энергии расшифровывается следующим образом:

A⁺⁺ - высочайший класс (- 60 и менее);

A⁺ - высочайший класс (от - 50 до -60);

A - высокий класс (от - 40 до -50);

B - высокий класс (от - 30 до -40);

C - повышенный класс (от - 15 до -30);

D - номинальный класс (от + 0 до - 15);

E - пониженный класс (от + 25 до 0);

F - низкий класс (от + 50 до + 25);

G - очень низкий класс (более +50), знак + означает перерасход от базового уровня.

Многоквартирные жилые дома (МКД) даже при внешней схожести отличаются друг от друга по техническим параметрам: году постройки, состоянию коммуникаций, степени теплопроводности конструкций зданий, качеству обслуживания дома. Все эти факторы способны весомо повлиять на объёмы потребления тепловой энергии. На рис. 1 приведено схематичное изображение расхода тепловой энергии в жилом доме.



Рис. 1. Расход тепловой энергии в жилом доме

Как видно из рис. 1 полные потери тепла составляет: через потолок здания - 5%, каркасные стены - 17, пол подвала – 1, стены подвала – 20 %, через трещины в стенках, окнах и дверях – 38 %, через входной двери -3 %, через окно – 16 %.

Согласно приказу Минстроя России №399 от 06/06/2016 для вновь построенного, реконструированного или прошедшего капитальный ремонт многоквартирного дома класс энергоэффективности определяется органом государственного строительного надзора и указывается в заключении о соответствии требованиям энергетической эффективности. Застройщик при вводе МКД в эксплуатацию должен размещать указатель класса энергетической эффективности МКД на фасаде дома. В процессе эксплуатации многоквартирного дома класс энергетической эффективности устанавливается и подтверждается органом государственного жилищного надзора (ГЖИ). Акт о классе энергетической эффективности МКД входит в состав технической документации на многоквартирный дом.

Лицо, осуществляющее управление многоквартирным домом, при присвоении (либо подтверждении ранее присвоенного) класса энергетической эффективности так же должно размещать указатель класса энергетической эффективности МКД на фасаде дома.

Следует отметить, что класс энергоэффективности не присваивается при отсутствии общедомовых приборов учета. А высокие классы энергетической эффективности МКД В, А, А+, А++ не присваиваются при

отсутствии в таком доме ИТП с функцией автоматического погодного регулирования, индивидуальных приборов учета и светодиодного освещения мест общего пользования. Значительное влияние на объём начисления за отопление имеют мероприятия по энергосбережению, выполняемые как УК, так и каждым жителем многоквартирного дома. Для снижения потребления тепловой энергии в доме рекомендуется:

1. Установить приборы учета: общедомовые и индивидуальные (при наличии технической возможности). Именно они в дальнейшем позволят оценить эффект от реализации энергосберегающих мероприятий.
2. Установить в доме индивидуальный тепловой пункт (ИТП) с автоматическим погодным регулированием.
3. Промыть внутренние системы отопления и ГВС, утеплить ограждающие конструкции дома: окна, двери в подъездах и подвальных помещениях.

Вышеприведенные рекомендации в условиях Республики Таджикистан можно применить только в условиях города Душанбе, где имеет место централизованное отопление. При этом чтобы не было перерасхода и слишком жарко в квартирах, необходимо проводить регулировку расхода тепловой энергии в целях её сбережения. Осуществить это может организация, обслуживающая дом, в соответствии с планом мероприятий по энергоэффективному использованию внутридомовых систем, а собственник вправе проконтролировать исполнение. Если батареи слишком горячие, то сократить потребление тепла в квартире владелец может и самостоятельно специальным регулировочным вентилем (ручным или автоматическим) на радиаторе (при наличии технической возможности). Стоит отметить, что такая мера более эффективна, чем привычное многим открытие форточки, ведь в данном случае вы регулируете не только температуру в помещении, но и объём потреблённой тепловой энергии в квартире и, как следствие, во всём доме, а соответственно уменьшаете свой счёт.

В промышленных предприятиях и электрических сетях различного класса напряжения, в качестве критерия оценки энергетической эффективности использования энергетических ресурсов применяется интегральный показатель уровень технологического развития. При этом при составлении энергобаланса предприятия все различные виды энергии: потребляемые в технологическом процессе производств, вспомогательные, потери и другие должны быть приведены в эквивалентную энергию, которую называют условным топливом (у.т.). В качестве условного топлива принимают энергию равную количеству тепла, выделяемого при сгорании 123 г. бурого угля, которое равно 1 кВт*час электрической энергии.

Для повышения энергетической эффективности предприятия, в целом, необходимо выполнить следующее:

- анализ структуры расхода энергетических ресурсов;
- установить энергоемкие технологические процессы;
- выявить причины и основные источники потерь энергии;
- составить план экономических мероприятий и их внедрения по уменьшению потерь энергии.

В настоящее время, в Согдийской области Республики Таджикистан, в частности в городе Худжанд, наблюдается строительный бум. При этом, по результате ознакомления и обследования построенных многоквартирных жилых домов и проектируемых зданий установлено, что они не отвечают требованиям государственных стандартов по энергосбережению и повышению энергетической эффективности. Отсутствуют энергетический паспорт и энергетический сертификат.

Кроме того, электрические сети жилых зданий выполняются без учета требований электробезопасности и энергосбережения, отсутствуют служба энергомониторинга и эффективного использования оборудования и установок. В проектах новых и эксплуатирующийся жилых домов и общественных зданий не составляется энергетический паспорт, что затрудняет энергетическую сертификацию этих сооружений.

Таким образом, в результате анализа критериев экономической оценки энергетической эффективности, установлено, что:

- для оценки эффективности энергосберегающих технологий в промышленности, жилых и общественных зданий необходимо использовать интегральный показатель энергоэффективности уровень технологического развития, который определяется на базе показателей энергетической сертификации;

- для оценки эффективности электрических сетей, различного класса напряжения, необходимо использовать обобщенный показатель, число часов использования установленной активной мощности. Этот показатель определяется как отношение потребленной (переданной) электроэнергии к установленной (номинальной) мощности;

- для оценки эффективности электробытовых приборов, используемых в быту необходимо использовать обобщенный показатель класс энергоэффективности, которые обозначаются латинскими буквами A^{++} , A^{+} , A, B, C, D, E, F.

Настоящая научно-исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями науки в РТ до 2025 года, утвержденными правительством Республики Таджикистан и посвящена на реализацию

решения задач по разработке мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности производства.

В результате выполненной научно-исследовательской работы можно сделать следующие выводы:

1. Выполненный патентный поиск и литературный обзор по методам и средствам обеспечения энергосбережения и повышении энергоэффективности позволил выявить, что:

- в Республике Таджикистан потребление электроэнергии на единицу валового внутреннего продукта (ВВП) в два раза больше чем в среднем по миру и, практически, энергетические затраты составляют 60 % национального ВВП. В принятых законах РТ «Об энергосбережении» (2002 г.) и «Об энергосбережении и энергоэффективности» (2013 г.) отсутствуют механизм реализации и источники финансирования, а также инструменты поддержки и стимулирования инноваций в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности технологий и оборудования;

- на промышленных предприятиях, «Распределительные электрические сети» и других организациях городов и районов РТ отсутствуют служба энергомониторинга и эффективного использования оборудования и установок. В проектах новых и эксплуатирующийся жилых домов и общественных зданий не составляется энергетический паспорт, что затрудняет энергетическую сертификацию этих сооружений;

- в учебных планах высших технических учебных заведениях РТ не предусмотрены предмет «Основы энергосбережения и повышение энергоэффективности»

2. Анализа графиков электрических нагрузок, действующих схем распределительных сетей и режимов их работы в Худжандских электрических сетях (с 01.01. 22 г. «Распределительные электрические сети» в городе Худжанд») и схемы электроснабжения и режимов работы ткацкого цеха ООО «Джавони», а также режимов работы электропривода мощных насосных станций позволил установить, что:

- ежегодный прирост потребления электроэнергии по городу Худжанд, в среднем, составляет 17 %, технические потери электроэнергии в электрических сетях, в среднем, до 2020 г. включительно – 14,7 %;

- «Распределительные электрические сети» г. Худжанда состоит из правобережной и левобережной части, причем распределительная сеть правобережной части выполнена напряжением 10 кВ, а левобережная часть напряжением 6 кВ, причем, кабельные линии эксплуатируются более 30 лет и содержат большое количество муфт. Кроме того, темпы развития схем электроснабжения отстают от темпов роста потребления электроэнергии, при этом, качество электроэнергии в сетях низкого напряжения не отвечают

требованиям стандартов что указывает на наличие большого резерва снижения потерь электроэнергии в распределительных сетях;

- в отдельных подразделениях ООО «Джавони» доля расхода электроэнергии на единицу продукции значительно превышают нормативные. Например, путем составления энергетического баланса показано, что в ткацком цехе доля общих потерь электроэнергии составляет 16,4 %, на вспомогательные расходы приходится 30 %, а остальные 53,6 % на производства продукции. Кроме того, качество электроэнергии в распределительной сети 0,4 кВ оценивалось с помощью прибора ПКЭ (показатели качества электроэнергии) производства МАРС-ЭНЕРГО Российской Федерации;

- в электрической сети 110 кВ насосных станциях Согдийской области имеет место частые провалы напряжения при пусковых режимах мощных насосных агрегатов (Аштского, Зафаробадского, Б, Гафуровского и др), что влияет на работу других установок и снижает надежность электроснабжения, что поставил задачу разработки мероприятий по устранению существующих проблем.

3. В результате анализа режимов потребления электробытовыми приборами выявлено, что использование электроэнергии сельским населением (73% от общей численности РТ) составляет около 9%, в то время как городскому населению – 14 %, от общего количества производимой электроэнергии. Результаты проведенных в лабораторных условиях экспериментальных исследований по выявлению энергетической эффективности различных типов ламп для освещения помещений и бытовых электрокипятильников установлено, что:

- среды всех типов ламп самым энергоэффективным, дешевым, надежным в работе являются осветительные приборы на основе светодиодов. Так называемые энергоэффективные люминесцентные лампы обладают меньшей эффективностью, худшими показателями по светопередачи и спектральному составу и вредны при утилизации (наличие паров ртути);

- количество электроэнергии необходимое для кипячения единицы объема воды в электрокипятильниках зависит от устройства, электрической мощности материала из которого изготовлен прибор. Результаты экспериментальных исследований пяти типов электробытовых приборов показал, что наиболее энергетически эффективным является электрокипятильник с дисковым нагревательным корпусом и теплоизоляционным корпусом;

4. Выполнен анализ качества электроэнергии в распределительных электрических сетях промышленного предприятия ООО «Джавони» и «Распределительные электрические сети» г. Худжанд. Результаты анализа и

экспериментальных исследований качества электрической энергии в электрических сетях различного класса напряжений с использованием прибора ПКЭ выявлено, что наихудшие показатели качества электроэнергии наблюдается в сетях напряжением 0,4 кВ. Практически во всех жилых массивах показатели качества электроэнергии не соответствуют требованиям Межгосударственного стандарта ГОСТ -32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная, Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», которое распространяется и на территории Республики Таджикистан.

5. С целью исследования рабочих режимов регулируемых электроприводов переменного тока разработана её компьютерная модель в среде Matlab/Simulink. Результаты моделирования показали, что разработанная модель адекватна, т.е. достаточно хорошо симулирует процессы, происходящие в реальном электроприводе. Модель позволяет на стадии проектирования электропривода исследовать возможность и эффективность использования преобразователей частоты для скалярного управления электроприводов различных механизмов и машин.

6. Выполнен анализ и экспериментальные исследования, в среде Matlab/Simulink, пусковых режимов асинхронных двигателей при низком качестве электроэнергии в питающей сети, а именно при пониженном напряжении, пониженной частоты и провалах напряжения в сети. Новизна исследования заключается в компьютерном моделировании асинхронного двигателя в абсолютных единицах, а также в детальном графическом выводе результатов.

7. Выполнен анализ методов расчета потерь электроэнергии элементов распределительных электрических сетей. Анализ показал, что в электроэнергетической системе РТ распределение потерь электроэнергии, в процентном выражении от общего объема потерь составляют 66,7 % - нагрузочные потери в линиях электропередач и 8,5% в силовых трансформаторах, а потери холостого хода в трансформаторах – 16,2%. Причем на распределительные электрические сети приходится 78 %, а на передающие сети 220 кВ и выше остальные 22 %.

Следует отметить, что потери электроэнергии в электрических сетях зависят от многих социальных факторов, такие как уровень жизни населения, энергетической политики государства, кризисные явления и др. Объем потерь определяется общим количеством вырабатываемой электроэнергии. Среднее значение относительных потерь в Европе, Японии, США и Китай составляет 4 – 6,5 %, в России – 10,2 %. В Таджикистане коммерческие потери составляют около 15 %.

8. Разработаны технические мероприятия по повышению технического ресурса электрооборудования мощных оросительных насосных станций. Результаты исследования режимных характеристик асинхронных и синхронных электроприводов насосных станций при прямом и плавном пуске электродвигателей, на компьютерной модели, позволили предложить систему безударного пуска высоковольтных электродвигателей оросительных насосных станций первого подъема на основе инвертора тока. Разработанная система устраняет негативное воздействие переходных режимов на работу электрооборудования и повышает технический ресурс и надежность системы электроснабжения.

9. В выполненной НИР показано, что оптимизация режимов работы электроустановок является сложной многоуровневой задачей и для её решения необходим комплексный подход. В работе разработаны организационные мероприятия, необходимые для оптимизации режимов работы электрических сетей, различного класса напряжения. Кроме того, приведены рекомендуемые [Таблица 12-14]. основные типовые организационные мероприятия по энергосбережению в электрических сетях, промышленных предприятиях и в многоквартирных жилых домах.

10. Разработаны модели электрических сетей низкого напряжения в среде Multisim 14.01 и Matlab/Simulink и проведены виртуальные экспериментальные исследования зависимостей потерь мощности от коэффициента загрузки линий, не симметрии фазных нагрузок, не синусоидальности кривых тока и напряжений и режимов работы сети с компенсацией реактивной мощности. Результаты исследований показали, что потери электроэнергии в сети, для вышеназванных режимов возрастают на 15 – 25 % от нормативного значения.

11. Для разработки технических мероприятий по энергосбережению и повышения энергетической эффективности оборудования и установок, необходима организация и проведение энергетического мониторинга в городских электрических сетях, составления энергетического паспорта по результатам энергетического аудита и сертификации объектов, зданий, технологий, жилых многоквартирных домов и др.

Для решения комплекса задач, связанных с обеспечением энергосбережения, как комплекса правовых, организационных, научных, производственных, технических, информационных и экономических мер, реализация которых направлена на эффективное использование энергетических ресурсов и вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии, необходимо:

- создание правовой и нормативной базы, для проведения энергоаудита и энергомониторинга, во всех объектах, как в государственных, так и в частном секторе;

- проведение отбора и обучения технического персонала для проведения мероприятий, связанных с обеспечением и реализации задач энергосбережения, г.е, подготовка энергоменеджеров;

- оснащение объектов проведения энергомониторинга современными измерительными приборами и устройствами непрерывного контроля учета израсходованной энергии, отвечающие требованиям точности измерения, надежности работы и имеющие хорошие эксплуатационные характеристики;

- проведение организационных и технических мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности электрооборудований потребителей энергии.

12. В результате анализа критериев экономической оценки энергетической эффективности, согласно [стандарт 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышения энергоэффективности»] установлено, что:

- для оценки эффективности энергосберегающих технологий в промышленности, жилых и общественных зданий необходимо использовать интегральный показатель энергоэффективности уровень технологического развития, который определяется на базе показателей энергетической сертификации;

- для оценки эффективности электрических сетей, различного класса напряжения, необходимо использовать обобщенный показатель, число часов использования установленной активной мощности. Этот показатель определяется как отношение потребленной (переданной) электроэнергии к установленной (номинальной) мощности;

- для оценки эффективности электробытовых приборов, используемых в быту необходимо использовать обобщенный показатель класс энергоэффективности, которые обозначаются латинскими буквами A⁺⁺, A⁺, A, B, C, D, E, F.

13. Все поставленные задачи по разработке методов и средств обеспечения энергосбережения в промышленности и в быту полностью выполнены. Исследования были направлены в оценке состояния и решении задач по повышении энергетической эффективности электрооборудований промышленных предприятий, городских распределительных сетей и высоковольтных насосных станций.

14. Для решения вопросов обеспечения энергосбережения и повышения энергетической эффективности в промышленности, распределительных электрических сетях и в быту, по результатам

выполненной научно-исследовательской работы могут быть реализованы следующие:

Источники

1. Фрейдкина Е. М. Оценка эффективности энергосберегающих мероприятий //СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД. – 2016.
2. Фрейдкина Е. М. Методы и критерии оценки эффективности энергосбережения: учебное пособие //СПбГТУРП. СПб. – 2013.
3. Юдин А. И., Рассохин С. А. Оценка эффективности реконструкции старой жилой застройки с учетом применения энергосберегающих технологий //Коммунальное хозяйство городов. – 2008. – №. 82. – С. 300-306.
4. Квон Г. М. Некоторые аспекты оценки эффективности инвестиций в энергосбережение зданий //Вестник ТИСБИ. – 2012. – №. 2. – С. 68-76.
5. Акулова Я. Н. Система показателей оценки энергоэффективности как фактора экономического роста региональной экономики //Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №. 4 (165). – С. 33-38.

ЦИФРОВОЙ КОНТРОЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ: КАК МАШИННОЕ ЗРЕНИЕ СНИЖАЕТ РИСКИ НА АЭС

Ретунский Д. М.¹, Сакерин А. О.²

^{1,2}ФГАОУ ВО «СевГУ», г. Севастополь, Россия

^{1,2}retunsky.denis@yandex.ru, sakerin_andrey@mail.ru

В статье рассмотрено, как в 2020 году на Кольской АЭС была внедрена в промышленную эксплуатацию система машинного зрения, предназначенная для автоматического контроля за соблюдением персоналом правил ношения спецодежды и средств индивидуальной защиты, а также насколько это повлияло на безопасность. Представлены результаты 5 лет эксплуатации.

Ключевые слова: машинное зрение, искусственный интеллект, атомная станция, охрана труда, надёжность электроэнергетики.

DIGITAL SAFETY CONTROL: HOW MACHINE VISION REDUCES RISKS AT NUCLEAR POWER PLANTS

Retunsky D. M.¹, Sakerin A. O.²

^{1,2}Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

¹retunsky.denis@yandex.ru, ²sakerin_andrey@mail.ru

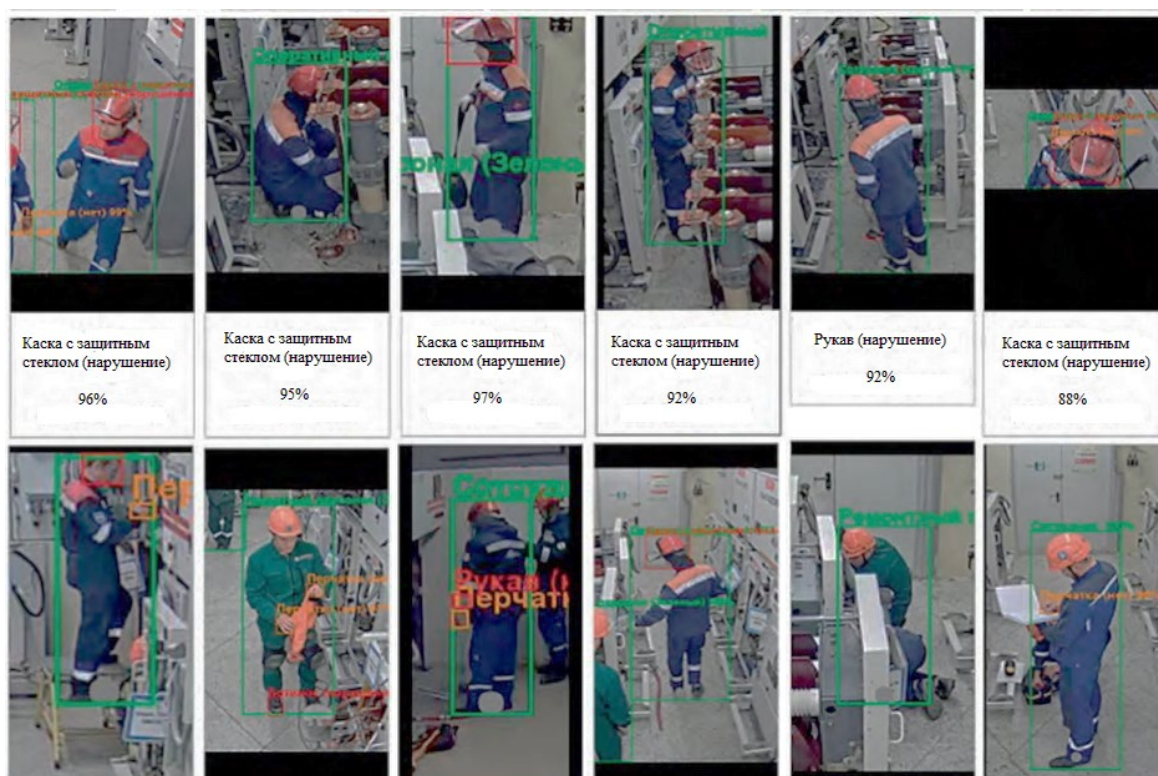
The article discusses how a machine vision system designed to automatically monitor personnel compliance with the rules for wearing special clothing and personal protective equipment was introduced into industrial operation at the Kola NPP in 2020, and how this affected safety. The results of 5 years of operation are presented.

Keywords: machine vision, artificial intelligence, nuclear power plant, labor protection, reliability of electric power industry.

В работе [1] указано, что в зонах обслуживания высоковольтного оборудования Кольской АЭС установили 53 промышленные камеры высокого разрешения. Система видеонаблюдения фиксирует все операции и переключения, а также следит за правильным использованием защитных средств. Машинное зрение позволяет обнаружить любые нарушения: поднятое забрало на каске, расстегнутую спецодежду, отсутствие защитных перчаток, незастегнутый подбородочный ремень или применение неподходящей спецодежды. Анализ изображений выполняет

самообучаемый искусственный интеллект. При выявлении несоответствий он немедленно отправляет сигнал: на мониторах руководителей смен и административно-технического персонала появляется снимок с выделенной областью нарушения (см. рисунок). Они оперативно связываются с сотрудником и при необходимости приостанавливают работы.

Также в исследовании [1] рассказано, как в течение нескольких месяцев специалисты обучали нейросеть контролировать использование средств индивидуальной защиты (СИЗ) в электроустановках. Система включает широкий спектр детекторов, которые можно настраивать, комбинировать и каскадировать, передавая данные от одного алгоритма к другому. Например, один детектор определяет наличие человека в кадре, другой анализирует его спецодежду, а третий выявляет нарушения в применении СИЗ, обязательных для данной группы работников. В отличие от решений других производителей, способных распознавать лишь ограниченный перечень защитных средств (в основном каски), система способна идентифицировать весь спектр СИЗ, используемых на атомных станциях.



Снимки работы персонала с выделенными областями нарушений

Система была первоначально внедрена в помещениях, где проводится обслуживание высоковольтного оборудования. Причиной для этого стали случаи несчастных происшествий на АЭС во время работы в комплектных распределительных устройствах 6 кВ (КРУ). За последнее время наиболее тяжелые инциденты, связанные с поражением электрической дугой, происходили именно при оперативных переключениях в этих зонах.

В марте 2025 года система также начала работать на Ленинградской атомной станции, где на энергоблоках РБМК и ВВЭР запустили промышленную эксплуатацию технологии видеоанализа соблюдения работниками требований охраны труда и промышленной безопасности. В рамках первого этапа к системе подключили 90 камер, что позволило контролировать в реальном времени около 45 помещений с электроустановками напряжением 6 и 10 кВ, о чем подробно рассказано в работе [2]. Расширение проекта на другие атомные станции будет проходить в два этапа. В первую очередь систему получают Калининская, Балаковская и Ростовская АЭС. На втором этапе оборудование установят на Нововоронежской, Белоярской, Смоленской и Курской станциях. Поставка оборудования запланирована на этот год, а на Кольской АЭС систему дополнительно модернизируют.

На других предприятиях, где цифровые технологии еще не стали частью рабочей практики, новые решения зачастую воспринимаются с настороженностью. Первоначально внедрение цифровых систем может казаться усилением контроля, однако со временем сотрудники начинают осознавать, что такие меры направлены на профилактику нарушений и способствуют выработке полезных привычек. Постепенно дисциплинарный контроль трансформируется в осознанное соблюдение правил безопасности. В этом смысле Кольская АЭС является ярким примером того, как цифровая трансформация может положительно повлиять на уровень безопасности и охраны труда.

Пилотный проект системы автоматического выявления нарушений в использовании средств индивидуальной защиты продемонстрировал высокую эффективность. Система позволяет фиксировать до 94–97% случаев несоблюдения правил, а ее наличие мотивирует сотрудников более ответственно относиться к требованиям безопасности [3]. Самым важным результатом стало значительное снижение числа нарушений: их количество уменьшилось более чем в 10 раз.

Источники

1. Автоматизация производства // Управление производством URL: <https://up-pro.ru/> (дата обращения: 13.03.2025).
2. Смирнов, В. П. «Развитие машинного зрения в системах промышленной безопасности» // *Труды конференции «Цифровая энергетика – 2023»*, МЭИ, 2023.
3. Павлов, Ю. В. «Цифровые технологии в электроэнергетике». – СПб.: Энергоатомиздат, 2021.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Тарасов Б.П.¹, Зарипов Д.К.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

tarasovbogdanpav@mail.ru

В работе описано оборудование, программное обеспечение и принцип действия устройства на базе Raspberry pi zero 2w на основе методики регистрации частичных разрядов для анализа состояния высоковольтных изоляторов воздушных линий электропередач.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, дистанционная диагностика, неразрушающий контроль.

DEVICE FOR ANALYZING THE CONDITION OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS

Tarasov B. P.¹, Zaripov D.K.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

tarasovbogdanpav@mail.ru

The paper describes the hardware, software, and operating principle of a Raspberry pi zero 2w device based on a partial discharge detection technique for analyzing the condition of high-voltage insulators of overhead power lines.

Keywords: overhead power transmission lines, remote diagnostics, non-destructive assay.

Высоковольтные изоляторы являются важным элементом, обеспечивающим надежность и безопасность электрических систем. Их основная функция заключается в предотвращении утечек электрического тока и защите оборудования от коротких замыканий. Однако со временем изоляторы могут подвергаться различным воздействиям, что может привести к их деградации. Поэтому важно регулярно проводить анализ их состояния.

Объект исследования – высоковольтная изоляция воздушных линий и подстанций

Предмет исследования – устройство контроля высоковольтной изоляции для раннего выявления и локализации дефектов электрооборудования.

Цель работы – разработка устройства для регистрации частичных разрядов.

Задачи:

1. Подбор оборудования для контроля высоковольтной изоляции воздушных линий и подстанций;
2. Разработка программного обеспечения для регистрации частичных разрядов;
3. Сборка и испытание устройства.

Для устройства были рассмотрены основные методы неразрушающего контроля для выявления дефектов высоковольтных изоляторов воздушных линий и подстанций: тепловизионный [1], электромагнитный и акустический методы [2].

В отличие от лабораторного оборудования [3] в устройстве применен емкостный датчик с антенной [4].

Описание оборудования и принцип действия устройства.

Схема устройства изображена на рисунке 1.

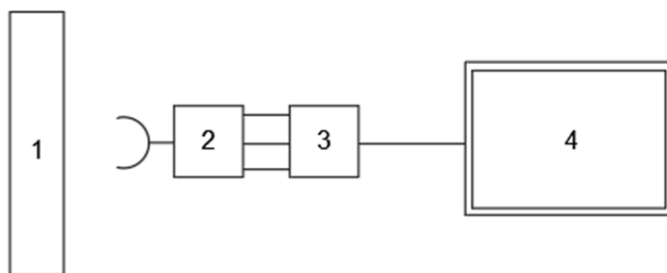


Рис. 1. Схема устройства. Изолатор-1; оптический индикатор с антенной-2; Raspberry pi zero 2w-3; сенсорный дисплей-4.

При работе с изолятором без дефекта на чувствительном элементе, который состоит из медной пластины, расположенной напротив изолятора, наводится эдс с частотой 50 Гц. На низкочастотном канале датчика появляется положительный сигнал. При возникновении частичных разрядов на медной пластине возникают высокочастотные колебания. На высокочастотном канале датчика появляется сигнал.

Микрокомпьютер с установленной операционной системой с частотой 2.5 МГц опрашивает контакты. После нескольких измерений выявлено оптимальное время обновления счетчика-5 секунд. После проведения 100 измерений строится график, и выводится в файл формате CSV, который обрабатывается без преобразования в программе Microsoft Excel.

В результате работы, подобрано оборудование для регистрации частичных разрядов, написано консольное приложение на языке C++ с

визуализацией данных в реальном времени с датчика, подобран оптимальный режим для опроса контактов. Результаты испытаний устройства после обработки в MS Excel изображены на рисунке 2.

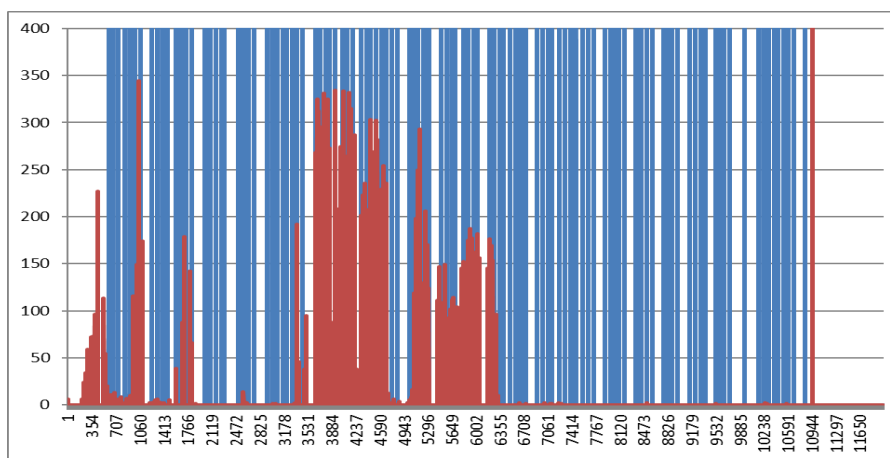


Рис. 2. Графики испытаний. Ось X- период измерений. Ось Y-количество полученных сигналов за период. Красный график- индикатор частичных разрядов; синий график- индикатор рабочего напряжения

Источники

1. Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Тарасов Б.П., Миронова Е.А., Насибуллин Р.А. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора// Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024; 26(6): С. 5-19.
2. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф., Андреев Н. К., Хамидуллин И. Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2022. №4.
3. Галиева Т. Г., Иванов Д. А., Садыков М. Ф., и др. Лабораторный стенд для разработки метода и системы непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования // Омский научный вестник. 2021 № 5 (179). С. 80-87.
4. Балобанов Р.Н., Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Маргулис С.М. Устройство оптической индикации дефекта высоковольтной изолирующей конструкции // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. №3-4. С. 119–125.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОМОЩЬЮ СТЕНДА ПРОФИ-А

Черниченко А.В.

ФГБОУ ВО МТУСИ, г. Москва, Россия

a.v.chernichenko@mtuci.ru

В статье рассмотрены возможности лабораторного стенда для исследования основных характеристик параметров электрических цепей по дисциплине «Электротехника». Лабораторные работы выполнены на стенде ПРОФИ-А производства компании ООО НПП Учтех-Профи, разрабатывающей учебные стенды для обучения студентов и учащихся различных специальностей средних и высших учебных заведений, изучающих широкий спектр дисциплин, связанных с естественными, электромеханическими и др. техническими науками.

Ключевые слова: лабораторные работы по электротехнике, электрические цепи, учебный стенд ПРОФИ-А.

INVESTIGATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF ELECTRICAL CIRCUIT PARAMETERS USING THE PROFI-A STAND

Chernichenko A. V.

MTUSI, Moscow, Russia

a.v.chernichenko@mtuci.ru¹

The article discusses the possibilities of a laboratory stand for studying the main characteristics of electrical circuit parameters in electrical engineering. Laboratory work was performed at the PROFI-A booth manufactured by NPP Uchtech-Profi LLC, which develops training stands for students and students of various specialties of secondary and higher educational institutions studying a wide range of disciplines related to natural, electromechanical and other technical sciences.

Keywords: laboratory work on electrical engineering, electrical circuits, PROFI-A training stand.

Подготовка кадров всех специальностей в Московском университете связи и информатики на кафедре Теории электрических цепей в современных условиях, осуществляется не только с помощью бесплатного виртуального программного обеспечения Microcap [1], но и на лабораторных стендах производства компании ООО НПП Учтех-Профи, разрабатывающей учебные

стенды для обучения студентов и учащихся различных специальностей средних и высших учебных заведений, изучающих широкий спектр дисциплин, связанных с естественными, электромеханическими и др. техническими науками. Моделирование электрических цепей проводится в программе Delta Profi стенда ПРОФИ-A [2]. Приведем примеры некоторых возможностей работы лабораторного стенда в Delta Profi (см. рис.1).

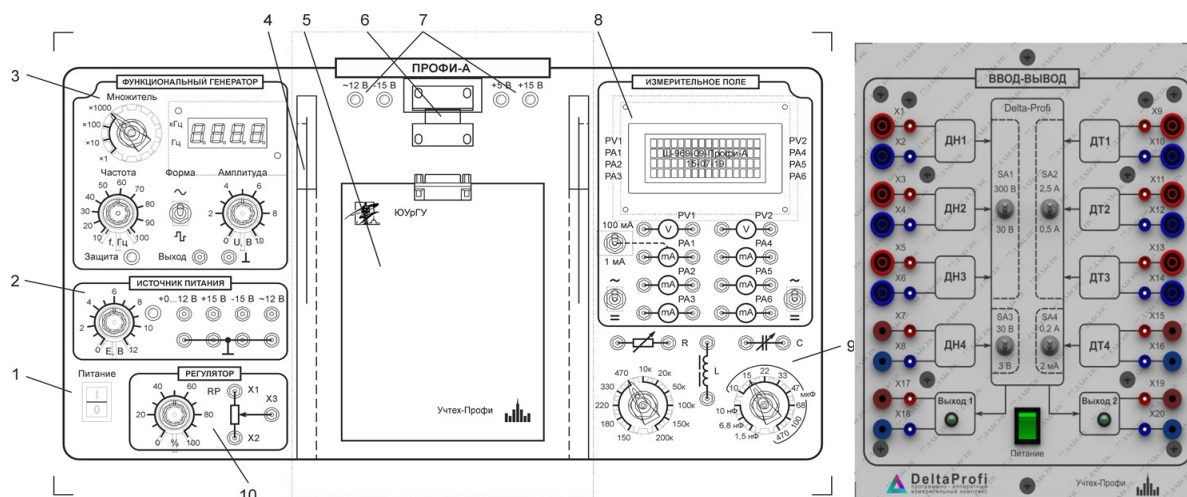


Рис. 1. Лицевая панель моноблока «Профи-А» и модуль ввода-вывода

Рассмотрим устройство стенда и лабораторную работу, которую можно выполнить (рис. 2). На центральной части лицевой панели устанавливается функциональный модуль проводимой лабораторной работы, который фиксируется с помощью направляющих и разъема. На рис. 1 обозначено: 1 – выключатель «Питание»; 2 – источники питания: регулируемый постоянный ток ($+0 \dots 12 \text{ В}$, 100 мА) с регулятором $E, \text{ В}$; источники питания постоянного тока $\pm 15 \text{ В}$; источник переменного тока $\sim 12 \text{ В}$; 3 – функциональный генератор, выходное напряжение которого с помощью тумблера «Форма» устанавливается синусоидальное или прямоугольное, регулируется по величине (регулятор «Амплитуда») и по частоте (регулятор «Частота» с переключателем «Множитель»); 4 – направляющие для крепления функционального модуля; 5 – место установки функционального модуля; 6 – разъем питания для функционального модуля; 7 – индикация подачи напряжений на разъем исследуемого модуля; 8 – измерительное поле с четырехстрочным индикатором и измерительными приборами (два вольтметра и четыре амперметра с тумблерами переключения режима работы по постоянному (=) или переменному (~) току). Предел измерения амперметра $PA1$ (1 мА или 100 мА) устанавливается соответствующим тумблером; 9 – дополнительные пассивные элементы электрических цепей:

регулируемые резистор и конденсатор, а также две индуктивности; 10 – регулятор (потенциометр).

Модуль ввода-вывода (рис. 1 справа) содержит четыре аналоговых датчика напряжения ДН1...ДН4, четыре датчика тока ДТ1...ДТ4 и два аналоговых выхода («Выход 1» и «Выход 2»). Датчики напряжения ДН1...ДН4 служат для измерения и осциллографирования напряжений. Датчики тока ДТ1...ДТ4 служат для измерения и осциллографирования токов.

Включение электропитания модуля осуществляется выключателем «Питание» на лицевой панели. На лицевой панели модуля установлены: тумблер SA1 переключения пределов измерений цифровых приборов ДН1, ДН2 и ДН3 «300 В» и «30 В»; тумблер SA2 переключения пределов измерений цифровых приборов ДТ1, ДТ2 и ДТ3 «2,5 А» и «0,5 А»; тумблер SA3 переключения пределов измерений прибора ДН4 «30 В» и «3 В»; тумблер SA4 переключения пределов измерений прибора ДТ4 «0.2 А» и «2 мА».

При измерениях напряжений соответствующие входы датчиков модуля подключаются к схеме электрической цепи параллельно исследуемому участку. Для измерения тока в ветвь электрической цепи необходимо включать токовые датчики модуля. Входы напряжения и тока при их совместном использовании измеряют активную мощность P , и величину угла сдвига фаз j (F_i) между мгновенными значениями синусоидальных напряжения u и тока i .

Запуск информационно-измерительного комплекса **DeltaProfi** осуществляется на компьютере с ОС Windows. Для этого необходимо запустить программу **DeltaProfi**, появится окно программы, где нужно выбрать требуемую работу в меню «Работы» или нажав кнопку «Выбор

работы...» . На экране монитора появится схема лабораторной работы (на вкладке «Мнемосхемы»). Переход между вкладками осуществляется с помощью кнопок «Стоп»  и «Пуск» . Запустить программу в работу нужно нажатием кнопки «Пуск» или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5, а закрыть - F6. Выбрав вкладку «Зависимости», можно получить графическую зависимость параметров электрической цепи.

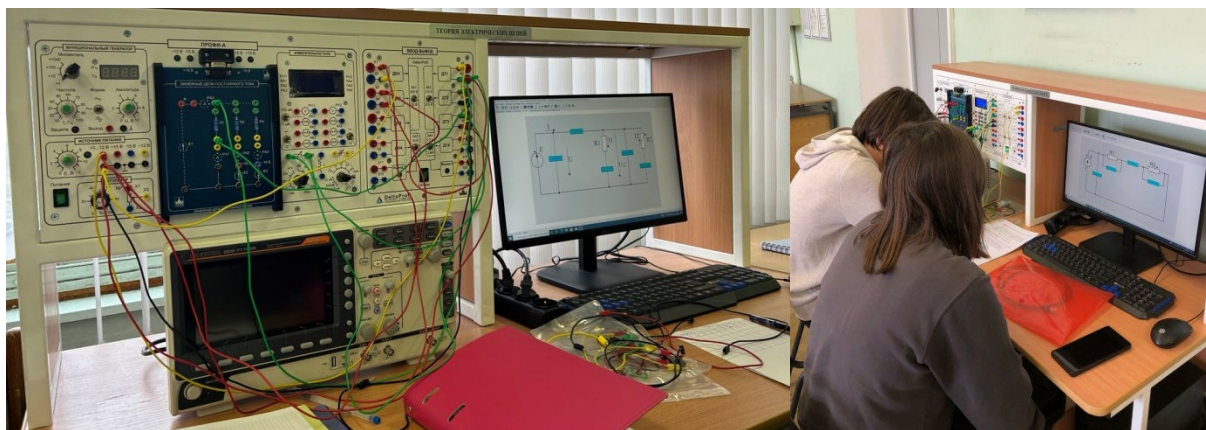


Рис. 2. Лабораторная работа «Линейная электрическая цепь постоянного тока»

Также в измерениях можно использовать визуализацию рассчитываемых характеристик с помощью осциллографа (рис. 3). Для исследования переходного процесса в цепи переменного тока с активно-индуктивным приемником установить на лицевой панели моноблока функциональный модуль «Переходные процессы» и собрать схему. В качестве шунта $R_{ш}$ использовать один из резисторов R_1 (10 Ом), R_2 (22 Ом), R_3 (47 Ом) функционального модуля «Переходные процессы».

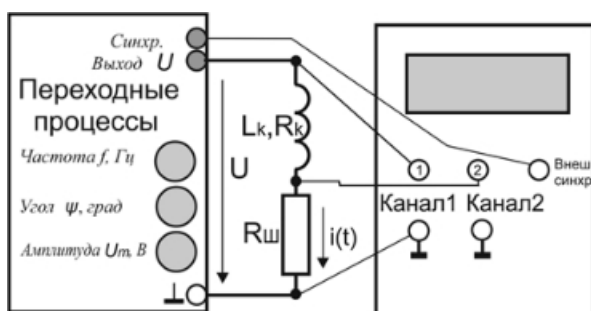


Рис. 3. Настройка оборудования

Включить осциллограф и установить в канале 1 масштаб по напряжению - 2 В/дел, в канале 2 – 500 мВ/дел (до 100 мВ/дел). Информация о этих настройках индицируется в правой части экрана (для осциллографа АКИП-4131/1). Установить масштаб по горизонтали – от 5 до 50 мс/дел. Рекомендуемые значения развертки в зависимости от частоты синусоидального сигнала приведены в таблице к лабораторной работе. Информация о этой настройке индицируется в верхней части экрана (для осциллографа АКИП-4131/1). Настроить синхронизацию - нажав кнопку «меню синхронизации». Кнопкой под экраном «Источник» задать ЕХТ/5, и ручкой «уровень синхронизации» установить 1 – 1,5 В. Информация о этих настройках индицируется в правой части экрана (для осциллографа АКИП-4131/1). Изменяя угол включения входного сигнала ψ регулятором «Угол», снять осциллограммы при различных углах включения. При этом определить, в каком случае переходный процесс в цепи отсутствует и когда

будет максимальное по модулю амплитудное значение тока i_{max} в цепи. Измерять осциллографом можно также в режиме курсоров максимальное по модулю амплитудное значение напряжения на шунте u_{Rmax} для каждого случая, предложенного в лабораторной работе.

В заключении можно рекомендовать использовать лабораторный стенд для подготовки студентов всех технических специальностей по дисциплине «Электротехника». Программное обеспечение стенда позволяет получить практические навыки сборки электрической цепи и визуально оценить необходимые характеристики измеряемых параметров.

Источники

1. Фриск В.В. Теория электрических цепей, схемотехника телекоммуникационных устройств, радиоприемные устройства систем мобильной связи, радиоприемные устройства систем радиосвязи и радиодоступа лабораторный практикум I-III/ Фриск В.В., Логвинов В.В.— М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2016.

2. Бородяню В. Н., Шулдяков В. В. Теория электрических цепей: Методические указания к проведению лабораторных работ. – Челябинск: Лабораторные системы, 2024.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 6-10 кВ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТИ

Чернышов В.А.¹, Семенихин Д.И.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

¹ blackseam78@mail.ru, ² semenihin_30_01_99@mail.ru

Высокая аварийность воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 6-10 кВ с изолированной нейтралью из-за однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ) во многом объясняется неэффективной работой механизма их финансового обеспечения. В статье рассматривается разработанная компьютерная программа предназначенная для определения оптимального долевого соотношения между различными категориями эксплуатационных затрат, осваиваемыми в отношении ВЛЭП напряжением 6-10 кВ с изолированной нейтралью, за установленный период времени, при котором продолжительности ее пребывания в условиях: - провоцирующегося ОЗНЗ, - развивающегося ОЗНЗ, - проявляющегося ОЗНЗ, - простоя из-за ОЗНЗ, не будут выходить за рамки допустимых значений, границы которых устанавливаются персонально для каждой ВЛЭП 6-10 кВ с учетом специфики ее эксплуатации и технического состояния. Оптимальное доленое соотношение определяется для следующих категорий затрат: а) затрат на покрытие ущерба; б) компенсационных затрат; в) затрат, связанных с упущенной выгодой; г) эксплуатационных затрат; д) инвестиционных затрат; е) затрат на техническое обслуживание и ремонт. Программа включает в себя нейросетевой модуль с функцией самообучения, что позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации ВЛЭП 6-10 кВ. Благодаря самообучению, нейронная сеть улучшает точность определения оптимальной структуры затрат путем анализа операционных данных и выявления новых паттернов в эксплуатационных процессах. Это обеспечивает повышенную гибкость и эффективность программы при работе с различными сценариями и особенностями эксплуатации ВЛЭП 6-10 кВ. Использование программы позволит электросетевым компаниям обеспечивать эффективную работу и рациональное расходование средств, снижать риски сбоев и повышать общую экономическую эффективность эксплуатации ВЛЭП 6-10 кВ.

Ключевые слова: нейросетевой определитель, оптимальная структура эксплуатационных затрат, воздушные линии электропередачи, самообучающаяся нейросеть, программное обеспечение, язык программирования Python

OPTIMIZATION OF OPERATING COSTS 6-10 kV FOR OVERHEAD POWER LINES USING NEURAL NETWORKS

Chernyshov V.A. ¹, Semenikhin D.I. ²

The high accident rate of overhead power lines (OHL) with a voltage of 6-10 kV and an isolated neutral due to single-phase ground faults (SPGF) can largely be attributed to the inefficient operation of their financial support mechanism. This article discusses a developed computer program designed to determine the optimal ratio of various categories of operating costs associated with 6-10 kV OHLs with an isolated neutral over a specified period, during which the duration of their presence under conditions of: - provoked SPGF, - developing SPGF, - manifesting SPGF, - downtime due to SPGF, does not exceed allowable values, the boundaries of which are set individually for each 6-10 kV OHL taking into account the specifics of its operation and technical condition. The optimal ratio is determined for the following categories of costs: a) damage coverage costs; b) compensation costs; c) costs related to lost profits; d) operating costs; e) investment costs; f) maintenance and repair costs. The program includes a neural network module with self-learning capabilities, allowing the system to adapt to changing operational conditions of the 6-10 kV OHL. Through self-learning, the neural network improves the accuracy of determining the optimal cost structure by analyzing operational data and identifying new patterns in operational processes. This ensures increased flexibility and efficiency of the program when dealing with various scenarios and specific features of operating 6-10 kV OHLs. The use of the program will enable electric utility companies to ensure effective operation and rational expenditure of funds, reduce the risks of failures, and enhance the overall economic efficiency of operating 6-10 kV OHLs.

Keywords: neural network identifier, optimal structure of operating costs, overhead power lines, self-learning neural network, software, Python programming language.

Перспективы использования нейронных сетей в сфере энергетики весьма обширны и многообещающие. Эти технологии способны оптимизировать процессы генерации и распределения электроэнергии, анализировать данные от датчиков и устройств, а также предсказывать потребление энергии и управлять нагрузками. Нейронные сети предоставляют возможность специалистам в области энергетики и инженерам взаимодействовать с математическими алгоритмами, создавая целостное представление о энергетической системе [1].

С учетом распространения идей интеллектуальной (Smart Grid) и цифровой энергетики, становится важным как внедрение современных информационно-телекоммуникационных технологий, так и улучшение технологической инфраструктуры, решения по развитию которой имеют стратегический характер. В настоящее время перед цифровизацией энергетики стоит задача усовершенствования технологий интеллектуальной поддержки принятия решений, направленных на снижение риска

возникновения неблагоприятных ситуаций. Одним из многообещающих методов в этом направлении является применение технологий машинного обучения, которые продемонстрировали свою эффективность в других сферах [2]. В условиях повышенной аварийности воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 6-10 кВ, вызванной однофазными (ОЗНЗ) и двойными замыканиями на землю (ДЗНЗ) [3], возникает необходимость в эффективном управлении финансовыми ресурсами. В ответ на эту проблему на кафедре электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО ОГУ им. И.С. Тургенева, в рамках инициативной НИР [4], была разработана тестовая версия программного обеспечения (ПО) «Нейросетевой определитель оптимальной структуры эксплуатационных затрат», предназначенная для анализа и оптимизации затрат, связанных с эксплуатацией ВЛЭП 6-10 кВ.

Основная задача разработанного ПО заключается в определении оптимального соотношения между различными категориями эксплуатационных затрат, осваиваемых электросетевой компанией в процессе эксплуатации ВЛЭП 6-10 кВ, таких как: затраты на покрытие ущерба; компенсационные затраты; затраты, связанные с упущенной выгодой; эксплуатационные затраты; инвестиционные затраты; затраты на техническое обслуживание и ремонт [5].

Как следует из названия ПО - «Нейросетевой определитель оптимальной структуры эксплуатационных затрат», оно включает в себя нейросетевой модуль с функцией самообучения, что позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации ВЛЭП. Нейронная сеть анализирует операционные данные и выявляет новые паттерны, что повышает точность определения оптимальной структуры затрат. Алгоритм работы ПО представлен на рисунке 1.

Разработанная программа учитывает различные состояния ВЛЭП 6-10 кВ, включая провоцируемые, развивающиеся и проявляющиеся ОЗНЗ и ДЗНЗ, а также простои из-за этих замыканий, выдавая рекомендации планово-экономическому отделу электросетевой компании, позволяющие существенным образом оптимизировать затраты при эксплуатации ВЛЭП 6-10 кВ с учетом их индивидуальных особенностей и характеристик. Данное обстоятельство позволит в значительной степени повысить технико-экономические показатели электросетевой компании и обеспечивать надежность работы подведомственных ей распределительных сетей 6-10 кВ и бесперебойность электроснабжения, питающихся от них агропромышленных потребителей.

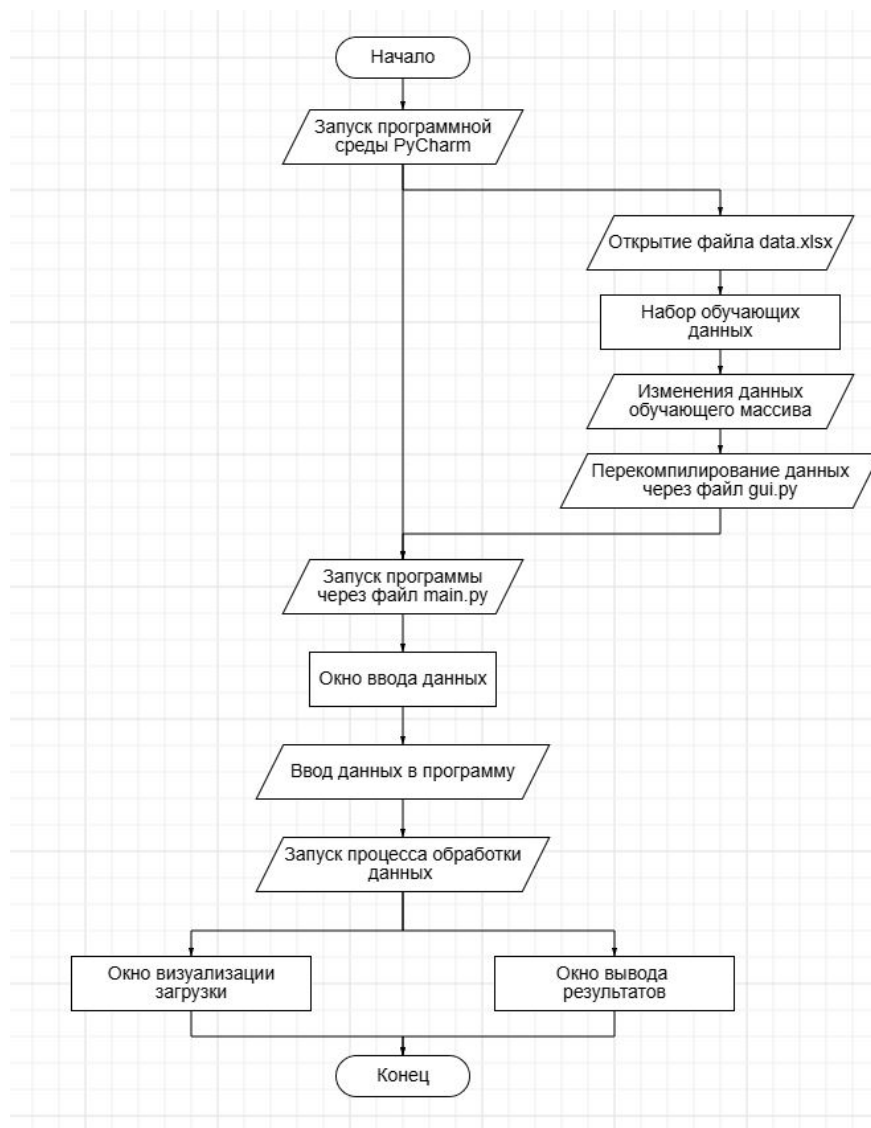


Рис. 1. Алгоритм работы ПО «Нейросетевой определитель оптимальной структуры эксплуатационных затрат»

Программа разработана на языке Python и использует такие библиотеки, как NumPy и Matplotlib для вычислений и визуализации данных, а также TensorFlow и Keras для разработки нейронных сетей. Программа совместима с операционными системами Windows, macOS и Linux и требует наличия интерпретатора Python и соответствующих библиотек. Она состоит из нескольких компонентов, таких как модуль для создания и обучения модели, а также графический интерфейс пользователя.

Модуль для создания и обучения модели: включает функции для определения архитектуры нейронной сети, обучения модели на данных и визуализации истории потерь.

В рис. 2 представлен массив обучающих данных, которые оператор вносит в процессе обучения нейронной сети. Эти данные включают в себя различные параметры, такие как затраты на техническое обслуживание,

компенсационные расходы, а также исторические данные о повреждениях и авариях на ВЛЭП 6-10 кВ. В процессе обучения оператор может настраивать гиперпараметры модели, такие как скорость обучения, количество эпох и размер батча. Это позволяет оптимизировать процесс обучения и добиться наилучших результатов. Кроме того, модуль предоставляет инструменты для мониторинга процесса обучения, включая графики, отображающие изменения потерь и точности на обучающей и валидационной выборках. После завершения обучения оператор имеет возможность оценить производительность модели на тестовом наборе данных, что позволяет определить ее обобщающую способность. В случае необходимости модуль также предоставляет функции для дообучения модели на новых данных или для ее переобучения с использованием измененной архитектуры.

Таким образом, данный модуль становится мощным инструментом для разработчиков и исследователей, позволяя им легко создавать, обучать и оценивать нейронные сети, а также визуализировать результаты их работы.

Графический интерфейс пользователя (GUI) предоставляет простой способ ввода параметров и получения результатов работы модели. Он позволяет пользователю вводить данные и видеть результаты предсказаний в удобном формате. На рисунках 3, 4, 5 и 6 соответственно изображены: окно при запуске программы; окно ввода данных в программу; окно визуализации обработки данных; окно вывода результатов расчета.

Кроме того, GUI предоставляет возможность просматривать результаты предсказаний и рекомендации по оптимизации затрат в удобном формате. Это делает программу доступной для специалистов с различным уровнем подготовки, что способствует более широкому внедрению нейросетевых технологий в практику электросетевых компаний.

Компьютерная программа «Нейросетевой определитель оптимальной структуры эксплуатационных затрат» обладает несколькими ключевыми преимуществами, отличающими ее от известных аналогов [6].

Во-первых, она обеспечивает экономическую эффективность, позволяя электросетевым компаниям рационально расходовать средства и снижать финансовые риски за счет оптимизации затрат.

Во-вторых, благодаря функции самообучения нейросеть демонстрирует гибкость, адаптируясь к новым условиям эксплуатации, что делает программу актуальной на длительный срок.

Наконец, удобный графический интерфейс упрощает взаимодействие с программой, делая её доступной даже для пользователей без глубоких технических знаний.

Использование нейронных сетей в энергетике становится все популярнее, это обусловлено тем, что модернизация систем управления

функционированием энергетическими объектами влечет за собой существенное увеличение количества технологических задач [7].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	0,50	0,30	0,20	0	0	0	1	1	0	-1
3	0,40	0,40	0,20	0	0	0	0	1	0	-1
4	0,40	0,30	0,20	0	0	0,10	0	1	0	-1
5	0,40	0,30	0,30	0	0	0	1	1	0	-1
6	0,50	0,30	0,20	0	0	0	1	1	0	-1
7	0,50	0,30	0,10	0	0	0,10	0	1	0	-1
8	0,40	0,20	0,30	0	0,10	0	1	1	0	-1
9	0,50	0,20	0,20	0	0,10	0	1	1	0	-1
10	0,20	0,10	0	0,30	0,20	0,20	0	1	-1	0
11	0,40	0,30	0,30	0	0	0	1	1	0	-1
12	0,50	0,30	0,20	0	0	0	1	1	0	-1
13	0,50	0,20	0,20	0	0	0,10	1	1	0	-1
14	0,50	0,20	0,30	0	0	0	1	1	0	-1
15	0,40	0,30	0,30	0	0	0	1	1	0	-1
16	0,40	0,30	0,20	0	0	0,10	0	1	0	-1
17	0,40	0,30	0,20	0,10	0	0	0	1	0	-1
18	0,40	0,30	0,20	0	0,10	0	1	1	0	-1
19	0,20	0,10	0	0,20	0,30	0,20	0	1	0	0
20	0,40	0,20	0,30	0,10	0	0	1	0	0	-1
21	0,40	0,20	0,30	0,10	0	0	1	0	0	-1
22	0,20	0	0,10	0,20	0,20	0,30	0	1	-1	0
23	0,40	0,20	0,30	0,10	0	0	1	0	0	-1
24	0,40	0,20	0,30	0	0,10	0	1	1	0	-1
25	0,40	0,20	0,30	0	0	0,10	1	1	0	-1
26	0,20	0	0,10	0,30	0,20	0,20	0	0	-1	0
27	0,10	0,10	0,10	0,30	0,20	0,20	0	0	0	0
28	0,30	0,10	0	0,20	0,20	0,30	0	1	-1	0
29	0,40	0,30	0,30	0	0	0	1	1	0	-1
30	0,30	0,40	0,30	0	0	0	0	1	1	-1
31	0,20	0,30	0,40	0	0	0,10	0	0	1	-1
32	0,20	0,40	0,40	0	0	0	0	0	1	-1
33	0,30	0,40	0,30	0	0	0	0	1	1	-1
34	0,30	0,40	0,20	0	0	0,10	0	1	0	-1
35	0,30	0,40	0,20	0	0,10	0	0	1	1	-1
36	0,30	0,30	0,30	0	0,10	0	1	1	1	-1
37	0,10	0,30	0	0,30	0,20	0,10	-1	1	0	-1
38	0,30	0,20	0,50	0	0	0	1	0	1	-1
39	0,30	0,30	0,40	0	0	0	1	0	1	-1
40	0,30	0,40	0,20	0	0	0,10	0	1	0	-1
41	0,40	0,40	0,20	0	0	0	0	1	0	-1
42	0,40	0,30	0,30	0	0	0	1	1	0	-1
43	0,40	0,30	0,20	0	0	0,10	0	1	0	-1

Рис. 2. Массив обучающих данных ПО

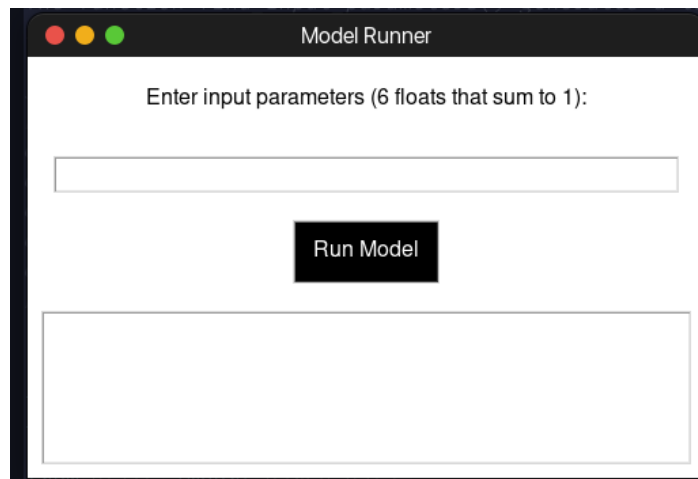


Рис. 3. Окно при запуске программы

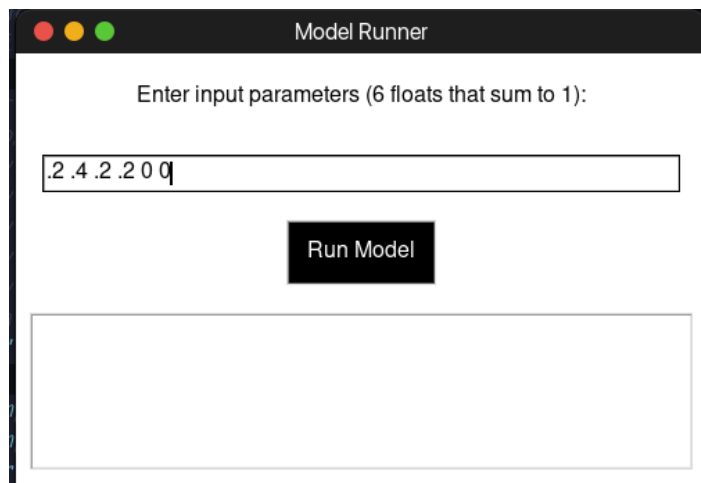


Рис. 4. Окно ввода данных в программу

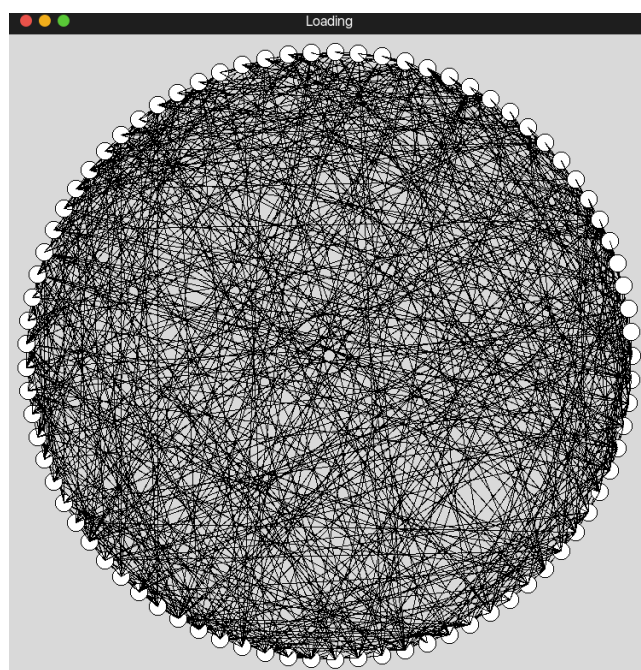


Рис. 5. Окно визуализации загрузки данных

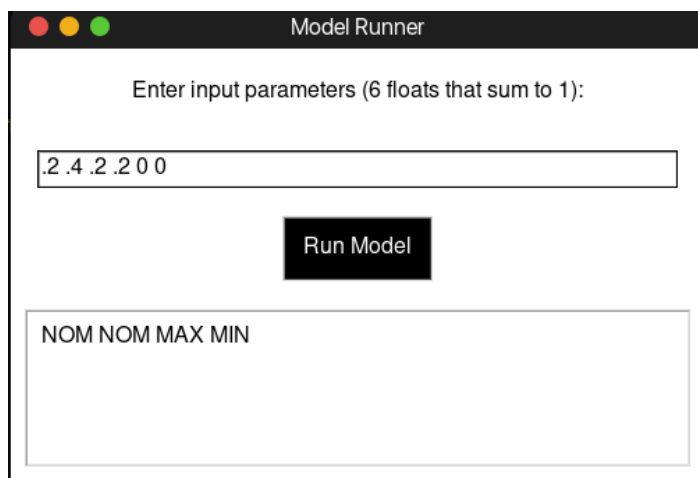


Рис. 6. Окно вывода результатов программы

Разработка и внедрение нейросетевого определителя оптимальной структуры эксплуатационных затрат» представляет собой важный шаг в направлении повышения эффективности эксплуатации воздушных линий электропередачи. Использование современных технологий и методов анализа данных открывает новые горизонты для оптимизации затрат в энергетическом секторе, что в свою очередь способствует улучшению надежности и безопасности электроснабжения [8, 9].

Источники

1. Лучинкин, В. Л. Перспективы применения нейронных сетей в энергетике / В. Л. Лучинкин, Р. С. Зарипова // Технологический суверенитет и цифровая трансформация: Международная научно-техническая конференция, Казань, 05 апреля 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 77-80
2. Массель, Л.В. Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики / Л. В. Массель, О. М. Гергет, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3(15). – С. 5-17.
3. Качанов, А.Н. Способ оперативного переключения двойных замыканий на землю на однофазные в воздушных электрических сетях 6-10 кВ / А.Н. Качанов, В.А. Чернышов, Д.И. Семенихин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2025. - № 1(369). – С.160-166

4. Инициативная НИР. Оптимизация процессов проектирования и функционирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения потребителей". – утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» № 1409 от 01.12.2022

5. Водяников, В.Т. Организационно экономические основы сельской электроэнергетики: Учебное пособие для вузов по агроинженерным специальностям. Издание второе переработанное и дополненное. – М.: ИКФ «Экмос», 2003. – 352 с.

6. Виноградов, А.В. Расчёт модели эффективности систем электроснабжения сельских потребителей с применением программного продукта «Gridsupply energy» / А.В. Виноградов, И.О. Голиков // Вестник НГИЭИ. 2021. № 2 (117). – С. 41-50).

7. Чепкасова, Т. А. Выявление актуальных направлений применения нейронных сетей в энергетике с помощью использования инструментов языка программирования Python / Т. А. Чепкасова // Современные тенденции в развитии экономики энергетике: Сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Минск, 03 декабря 2021 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. – С. 185

8. Обичкин Р.Ю., Данилов А.В., Петухов С.В., Надеин В.Ф. Применение современных технологий и методов в оптимизации систем электроснабжения // Научное обозрение. Технические науки. – 2024. № 4. С. 9-13

9. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ– ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ НОВОГО УСТРОЙСТВА, ПОЗВОЛЯЮЩЕГО ОПЕРАТИВНО ИДЕНТИФИЦИРОВАТЬ ОДНОФАЗНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 6-10 кВ

Чернышов В.А.¹, Пригодский М.О.²

^{1,2}. ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

¹blackseam78@mail.ru, ²prigodskymaks@gmail.com

В статье рассматриваются современные подходы к оперативной идентификации однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ) в воздушных электрических сетях напряжением 6-10 кВ с изолированной нейтралью. Авторы подчеркивают актуальность проблемы в условиях физического и морального износа электросетевой инфраструктуры. Предложенные методы включают реализацию кратковременных искусственных двойных замыканий, что позволяет оперативно выявлять места возникновения ОЗНЗ и повышать надежность электроснабжения. В статье также обсуждается интеграция спутниковых технологий и мобильной связи для дистанционного мониторинга и управления, что открывает новые возможности для эффективного реагирования на аварийные ситуации. Представленные решения направлены на сокращение времени простоя и повышение безопасности эксплуатации электросетей, что является важным шагом к устойчивому развитию энергетической отрасли. Разработка устройства шунтирования замыкания (УШЗ) представляет собой значимый вклад в эту область, обеспечивая надежную и быструю локализацию повреждений. УШЗ, как ключевой элемент предложенной системы, позволяет эффективно управлять токами нулевой последовательности и минимизировать последствия аварийных ситуаций. Интеграция современных телекоммуникационных технологий и спутникового позиционирования открывает новые горизонты для эффективного мониторинга и быстрого реагирования на аварийные ситуации. Данные технологии не только способствуют сокращению времени простоя, но и значительно снижают риски, связанные с эксплуатацией электросетевой инфраструктуры. Объединение усилий ученых, инженеров и практиков позволит создать еще более эффективные решения для обеспечения надежного электроснабжения и безопасности потребителей.

Ключевые слова: воздушная электрическая сети 6-10 кВ, изолированная нейтраль, однофазные замыкания на землю, искусственное двойное замыкание на землю, оперативная идентификация, спутниковые технологии, устройство шунтирования замыкания, повышение эффективности.

PREREQUISITES FOR CREATING A NEW DEVICE THAT ALLOWS FOR THE OPERATIONAL IDENTIFICATION OF SINGLE-PHASE GROUND FAULTS IN 6-10 kV NETWORKS

Chernyshov V.A.¹, Prigodskiy M.O.²

^{1,2} FSBEI HE «OSU named after I.S. Turgenev», Oryol, Russia

¹blackseam78@mail.ru, ²prigodskymaks@gmail.com

The article discusses modern approaches to the operational identification of single-phase ground faults (SPGF) in overhead electrical networks with a voltage of 6-10 kV and isolated neutral. The authors emphasize the relevance of the issue in the context of physical and moral wear of the electrical grid infrastructure. The proposed methods include the implementation of brief artificial double ground faults, which allow for the rapid identification of SPGF locations and enhance the reliability of power supply. The article also discusses the integration of satellite technologies and mobile communications for remote monitoring and control, opening new opportunities for effective response to emergency situations. The presented solutions aim to reduce downtime and improve the safety of electrical networks, marking an important step towards the sustainable development of the energy sector. The development of the grounding fault shunting device (GFSD) represents a significant contribution to this field, providing reliable and quick localization of damages. The GFSD, as a key element of the proposed system, effectively manages zero-sequence currents and minimizes the consequences of emergency situations. The integration of modern telecommunications technologies and satellite positioning opens new horizons for effective monitoring and rapid response to emergencies. These technologies not only help reduce downtime but also significantly lower the risks associated with the operation of electrical infrastructure. The collaboration of scientists, engineers, and practitioners will enable the creation of even more effective solutions for ensuring reliable power supply and consumer safety.

Keywords: overhead electrical networks 6-10 kV, isolated neutral, single-phase ground faults, artificial double ground fault, operational identification, satellite technologies, grounding fault shunting device, efficiency improvement.

Обеспечение оперативной идентификации однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ) для воздушных электрических сетей (ВЭС) 6-10 кВ с изолированной нейтралью в настоящее время является весьма актуальным вопросом не только для работников, эксплуатирующих их, но и для потребителей электрической энергии. Данное обстоятельство обусловлено большим физическим и моральным износом электросетевой инфраструктуры 6-10 кВ, делающим ее уязвимой к отказам при возникновении перенапряжений, обусловленных ОЗНЗ. Усугубляет ситуацию и тот факт, что многие электросетевые предприятия в виду нехватки материальных и трудовых ресурсов используют способ эксплуатации сетей данного класса

напряжения по фактическому состоянию. Перечисленные выше факторы приводят к тому, что на сегодняшний день на некоторых филиалах ПАО «Россети Центра» при установлении факта повреждения изоляции воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) напряжением 6-10 кВ реализуется практика ее незамедлительного отключения. И хотя оперативно идентифицировать фидер с ОЗНЗ не всегда удастся и он какое то время работает с ОЗНЗ, тем не менее такой подход сберегает ресурс изоляции ВЭС 6-10 кВ и в целом способствует снижению ее аварийности. Существенным минусом такого подхода является затяжной поиск мест возникновения ОЗНЗ, т.к. при снятом напряжении невозможно использовать переносные указательные приборы и единственным инструментарием является опыт и наблюдательность персонала оперативно-выездной бригады (ОВБ). В свою очередь, затяжной поиск места возникновения ОЗНЗ обуславливает ущерб от недоотпуска электрической энергии и вреда, нанесенного потребителям в связи с их несанкционированным отключением.

На основании имеющегося научного задела [1, 2], в рамках выполнения инициативной НИР [3], сотрудниками кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» на сегодняшний день разработаны несколько способов [4, 5], позволяющих быстро идентифицировать ОЗНЗ на ВЛЭП 6-10 кВ посредством реализации кратковременных искусственных двойных замыканий на землю (ДЗНЗ) и оперативно предпринять ряд мероприятий, направленных на повышение надежности работы ВЭС 6-10 кВ и ее безопасности, а также бесперебойности электроснабжения ее потребителей. Послужившая при этом, в качестве одного из прототипов, принципиальная схема способа идентификации опоры с замыканием на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью [1] представлена на рисунке 1.

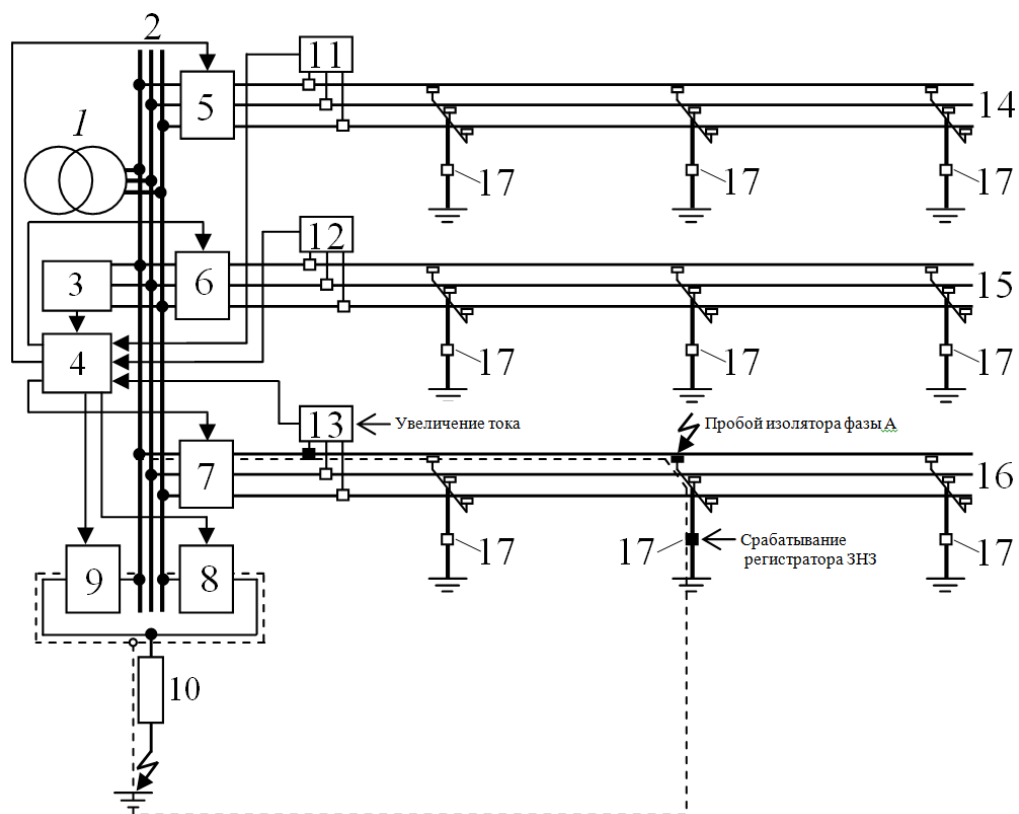


Рис. 1. Принципиальная схема способа идентификации опоры с замыканием на землю в распределительных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью

Схема, представленная на рисунке 1 содержит следующие элементы: силовой трансформатор 1, шины низковольтного напряжения 2, устройство контроля изоляции 3, блок контроля и управления 4, отходящие ВЛЭП 14, 15 и 16, опоры которых оснащены регистраторами 17 протекания тока, трехфазные выключатели 5, 6 и 7, однофазные выключатели 8 и 9, токоограничивающее сопротивление 10, датчики тока 11, 12, 13.

Предлагаемый способ работает следующим образом. При возникновении ОЗНЗ, в любой ВЛЭП, например в линии 16, в фазе А, устройство контроля изоляции 3, подключенное к шинам низковольтного напряжения 2 силового трансформатора 1, регистрирует появление напряжения нулевой последовательности и формирует сигнал, который поступает на блок управления 4. Блок управления посредством выключателей 7 и 6 обеспечивает такую коммутацию двух любых фаз шин низковольтного напряжения 2 на землю, при которой в одной из отходящих ВЛЭП появится увеличение тока. Увеличение тока в одной из фаз отходящей линии обусловлено протеканием тока искусственного ДЗНЗ, протекающего также через опору с дефектной изоляцией, оснащенную регистратором 17 протекания тока. Сигнал с датчика тока 13 об увеличении тока поступает на блок управления 4, который формирует сигнал на отключение этой линии по факту ее ОЗНЗ. Ремонтный персонал производит осмотр опор этой линии и отыскивают ту опору, на которой зарегистрирован факт протекания тока, и идентифицируют ее как опору с ОЗНЗ.

Предлагаемый способ позволяет персоналу ОВБ предварительно определить отходящую от подстанции линию с ОЗНЗ, а в дальнейшем и опору на которой оно произошло. Учитывая, что способ позволяет быстро отыскивать место возникновения ОЗНЗ при снятом напряжении, он не только повышает безопасность и бесперебойность электроснабжения, но и надежность функционирования ВЭС 6-10 кВ за счет сокращения времени существования в ней перенапряжений, инициируемых ОЗНЗ и недопущения возникновения ДЗНЗ.

В процессе дальнейшей работы над усовершенствованием данного способа его разработчиками было установлено, что применение в нем современных телекоммуникационных технологий может способствовать значительному расширению его функциональных возможностей, что открывает перед ним новый горизонт массового применения. Данное обстоятельство обусловлено тем, что в электроэнергетике с каждым годом все активнее внедряются система спутникового позиционирования, а также прием (передача) информации по волновым каналам мобильной связи (сети 3G и 4G). Например, для управления беспилотными летательными аппаратами, осуществляющими мониторинг ВЭС 6-10 кВ используется система спутникового позиционирования на местности [6]. Данной системой оборудуются автомобили ОВБ, это позволяет более эффективно использовать спецтехнику, снижать расходы на ее эксплуатацию. Современная система спутникового мониторинга позволяет диспетчеру в режиме реального времени отслеживать передвижение персонала ОВБ и координировать его действия при проведении на ВЛЭП 6-10 кВ аварийно-восстановительных работ. При этом традиционная радиосвязь УКВ диапазона используется в основном как средство общения между диспетчером и работниками ОВБ, выполняющими аварийно-восстановительные работы на воздушных ВЛЭП 6-10 кВ.

На рисунке 2 представлена функциональная схема, наглядно отображающая общий принцип функционирования современных беспроводных каналов приема (передачи) информации в ВЭС 6-10 кВ с изолированной нейтралью.

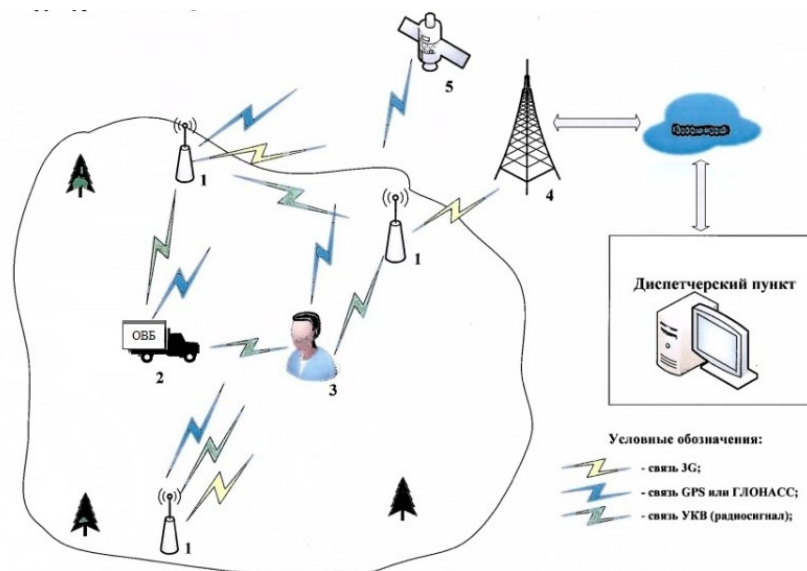


Рис. 2. Функциональная схема, наглядно отображающая общий принцип функционирования современных беспроводных каналов приема (передачи) информации

Конвергенция способа идентификации опоры с замыканием на землю в распределительных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью и технологии спутникового позиционирования, в дальнейшем, позволила разработать способ дистанционной идентификации места возникновения ОЗНЗ в воздушной ВЛЭП 6-10 кВ [2].

Суть предполагаемого способа поясняется на рисунке 3, где представлена принципиальная схема самоидентификации ОЗНЗ с изолированной нейтралью посредством спутниковой системы навигации.

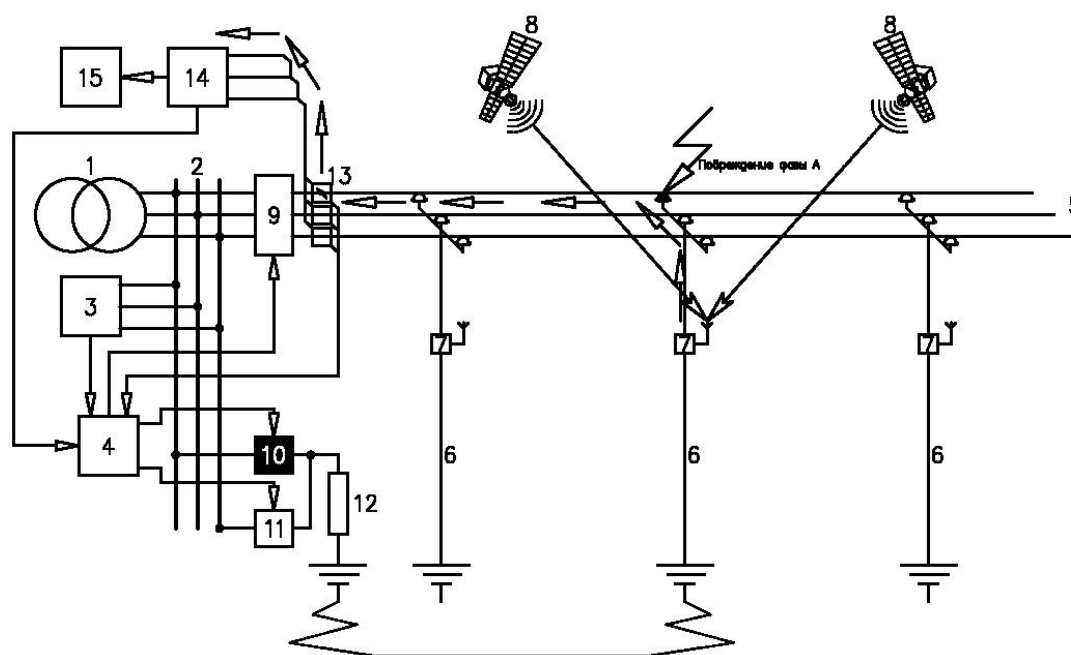


Рис. 7. Принципиальная схема самоидентификации ОЗНЗ с изолированной нейтралью посредством спутниковой системы навигации

Принципиальная схема содержит: силовой трансформатор 1, шины низковольтного напряжения 2, устройство контроля изоляции 3, блок контроля и управления 4, отходящая ВЛЭП 5, каждая из опор 6 которой оснащена приемо-передатчиком спутниковых радиосигналов 7, космические спутники глобальной системы позиционирования 8, трехфазный выключатель 9, однофазный выключатель 10, 11, токоограничивающее сопротивление 12, датчик тока 13, блок спутниковой системы навигации 14, дисплей идентификации 15.

Предлагаемый способ функционирует следующим образом. При повреждении фазной изоляции любой из опор 6, например изоляции фазы А, отходящей ВЛЭП 5, устройство контроля изоляции 3, подключенное к шинам низковольтного напряжения 2 силового трансформатора 1, регистрирует появление напряжения нулевой последовательности и формирует сигнал, который поступает на блок контроля и управления 4. Блок контроля и управления 4 посредством однофазных выключателей 10 и 11 обеспечивает такую коммутацию двух любых фаз (например фаз А и С) шин низковольтного напряжения 2 на землю, при которой в одной из отходящих ВЛЭП (в нашем случае в ВЛЭП 5) появится увеличение тока, контролируемое датчиком тока 13. Увеличение тока в одной из фаз отходящей ВЛЭП обусловлено протеканием тока искусственного двойного ОЗНЗ. При этом ток искусственного двойного ЗНЗ, протекая также через опору с дефектной изоляцией, активизирует в работу установленный на ней приемо-передатчик спутниковых радиосигналов 7. Приемо-передатчик 7, потребляя ток искусственного двойного ЗНЗ, принимает радиосигналы от спутников 8 глобальной системы позиционирования и обеспечивает их передачу по проводам отходящей ВЛЭП 5 на питающую электростанцию, где посредством датчика тока 13 сигналы считываются и направляются на обработку в блок спутниковой системы навигации 14. Блок спутниковой системы навигации 14, вычисляя географические координаты места приема спутниковых радиосигналов и сопоставляя их с предварительно зафиксированными географическими координатами каждой из опор, выводит информацию на дисплей идентификации 15 персоналу оперативно-выездной бригады, о том в какой из отходящих ВЛЭП, на какой из опор, а также на какой фазе произошло ЗНЗ. При этом блок спутниковой системы навигации 14, формирует сигнал блоку контроля и управления 4 на автоматическое отключение отходящей ВЛЭП 5 с ЗНЗ, а также включенной на землю одной из фаз шин низковольтного напряжения.

Идеи, заложенные в рассмотренных выше способах [1, 2], нашли практическое воплощение в электротехническом комплексе [7], который с 2016 года успешно реализуется на рынке электротехнической продукции компанией «Релематика». Принципиальная схема отображающая принцип работы данного комплекса представлена на рисунке 4.

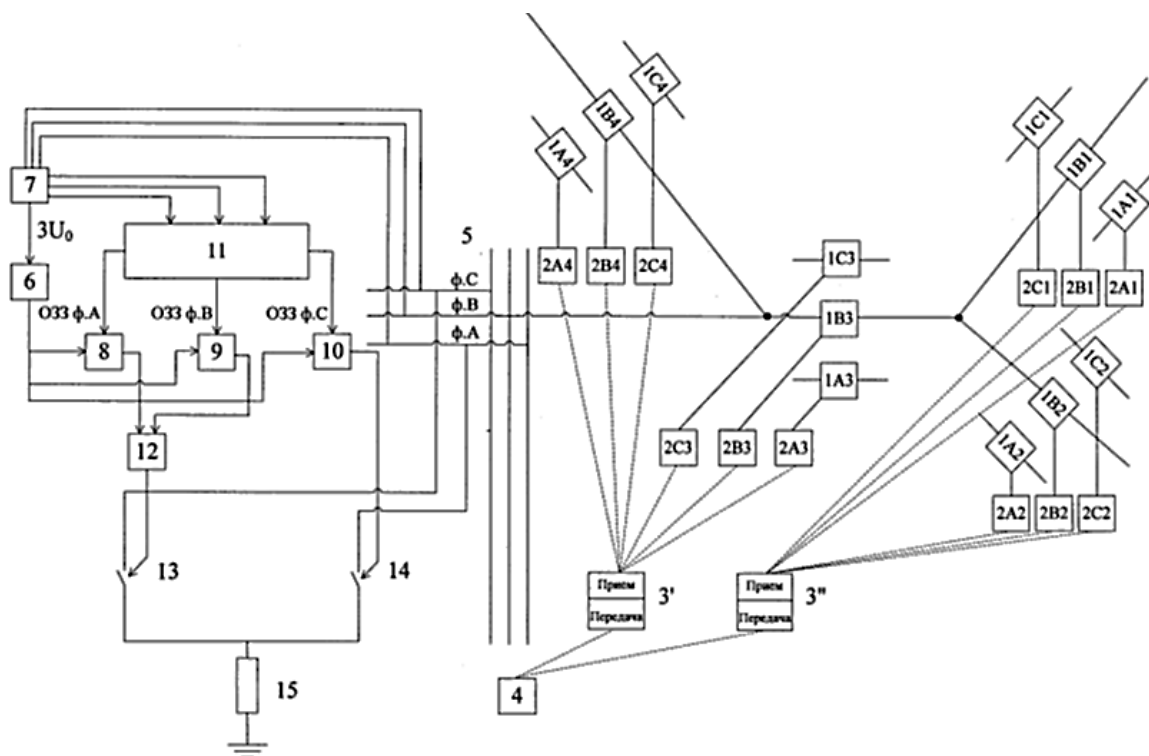


Рис. 4. Принципиальная схема электротехнического комплекса для определения повреждённого участка воздушной линии электропередачи с ответвлениями в распределительной сети 6-35 кВ

Данный комплекс предназначен для определения местоположения ОЗНЗ в ВЛЭП с ответвлениями в распределительных сетях среднего напряжения (6-35 кВ). Устройство включает в себя следующие элементы:

1. Датчики тока (1A1, 1B1, 1C1 и др.): устанавливаются в каждой фазе (А, В, С) на ответвлениях, фиксируют значения токов и передают данные на индикаторы.

2. Индикаторы тока (2A1, 2B1, 2C1 и др.): обрабатывают данные от датчиков и сигнализируют о наличии токов, указывающих на повреждения.

3. Приемопередатчики (3' и 3''): Установлены на ответвительных опорах, передают информацию о состоянии токов по радиосвязи на приемник.

4. Приемник (4): Установлен на подстанции, принимает закодированные сигналы от приемопередатчиков и расшифровывает информацию о повреждениях.

5. Реле напряжения нулевой последовательности (6): контролирует состояние сети, определяет наличие нулевой последовательности напряжения для выявления поврежденной фазы.

6. Избиратель поврежденных фаз (11): определяет, какая из фаз (А, В или С) повреждена, и передает данные на логические элементы.

7. Элементы «И» (8, 9, 10): обрабатывают сигналы от избирателя поврежденных фаз; каждый элемент отвечает за одну из фаз и активируется при обнаружении повреждения.

8. Элемент «ИЛИ» (12): объединяет выходы элементов «И» и активирует управляемые входы выключателей при наличии повреждений.

9. Выключатели (13 и 14): Управляют подключением заземленного резистора к неповрежденной фазе в зависимости от состояния поврежденной фазы.

10. Резистор (15): Подключается между шинами распределительного устройства и землей для создания дополнительного тока в неповрежденной фазе, что позволяет активировать индикаторы.

Принцип работы устройства заключается в следующем:

- Датчики фиксируют токи в фазах и передают данные индикаторам.
- Индикаторы сигнализируют о наличии токов, а приемопередатчики передают информацию на подстанцию.
- В случае повреждения реле определяет состояние сети, а избиратель выявляет поврежденную фазу.

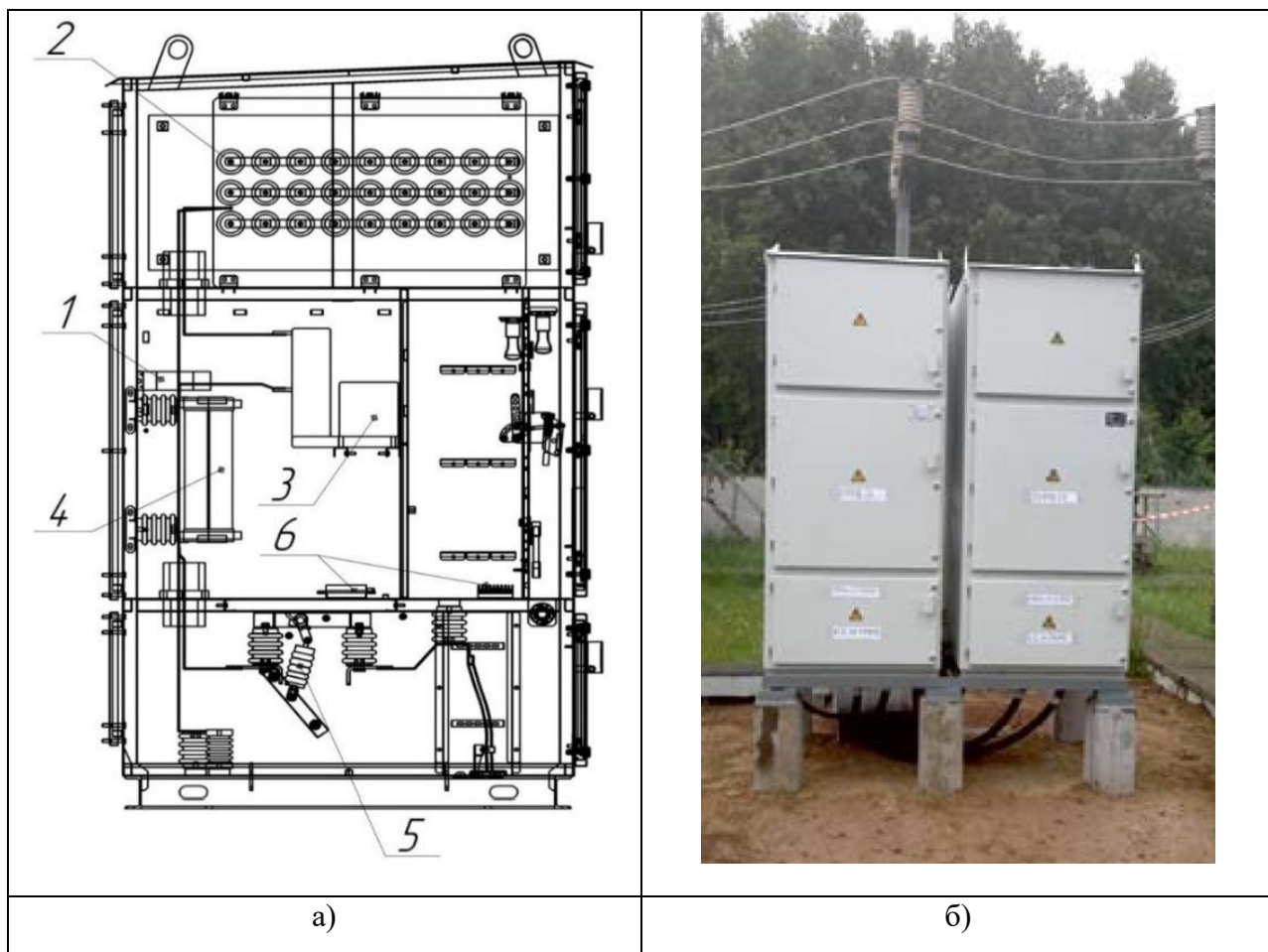


Рис. 5. Устройство шунтирования замыкания (УШЗ): а) компоновка шкафа УШЗ: 1 – трансформатор тока нулевой последовательности ТЗЛМ1-1 (1 шт.); 2 – резистор С5- 40 В, 33 Ом, 550 Вт (54 шт.); 3 – вакуумный однополюсной контактор типа КВО-10-4/400 (2 шт.); 4 – предохранитель ПКТ 103-10-80-20 У3 (2 шт.); 5 – разъединитель РВ-10-630 УХЛ2; 6 – нагревательный элемент DJR-S100, 100 Ватт (4 шт.); 7 – ячейка КСО-10-80-88-У1 (1 шт.); б) Шкаф УШЗ, установленный на двухсекционном РУ ПС 110/10 кВ.

- Элементы «И» обрабатывают сигналы, и при необходимости активируются выключатели для подключения резистора. Это создает дополнительный ток в неповрежденной фазе, позволяя индикаторам сработать и передать информацию о повреждении на приемник.

Основным элементом данного комплекса является устройство шунтирования замыкания (УШЗ), внешний вид которого представлен на рисунке 5 [8].

Разработка и внедрение новых способов оперативной идентификации однофазных замыканий на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью представляет собой важный шаг к повышению их надежности и безопасности функционирования. Интеграция современных телекоммуникационных технологий и спутникового позиционирования открывает новые горизонты для эффективного мониторинга и быстрого реагирования на аварийные ситуации. Это не только способствует сокращению времени простоя и устранения неполадок, но и значительно снижает риски, связанные с эксплуатацией электросетевой инфраструктуры [9]. В этой связи очень важно продолжать исследовать и развивать данные технологии, чтобы адаптироваться к вызовам, которые ставит перед нами быстро меняющийся мир энергетики.

Объединение усилий ученых, инженеров и практиков позволит создать еще более эффективные решения для обеспечения надежного электроснабжения и безопасности потребителей. Таким образом, дальнейшая работа в этом направлении может стать основой для устойчивого развития энергетической отрасли в будущем.

Источники

1. Патент № 2317624 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16, B60M 3/00. Способ идентификации опоры с замыканием на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью: № 2006136746/09: заявл. 16.10.2006: опубл. 20.02.2008 / А. И. Гавриченко, В. А. Чернышов ; заявитель Федеральное государственное учреждение высшего профессионального образования "Орловский государственный аграрный университет" (ФГОУ ВПО ОрелГАУ).

2. Патент № 2461109 С2 Российская Федерация, МПК H02H 3/16, G01R 31/08. Способ дистанционной идентификации опоры с замыканием на землю в сетях с изолированной нейтралью посредством спутниковой навигации: № 2010149823/07: заявл. 03.12.2010: опубл. 10.09.2012 / В. А. Чернышов, Л. А. Чернышова ; заявитель Федеральное государственное

учреждение высшего профессионального образования "Орловский государственный аграрный университет" (ФГОУ ВПО ОрелГАУ).

3. Инициативная НИР. Оптимизация процессов проектирования и функционирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения потребителей". – утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» № 1409 от 01.12.2022

4. Патент № 2798464 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16. Способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью: № 2022133602: заявл. 20.12.2022: опубл. 23.06.2023 / А.Н. Качанов, В. А. Чернышов, А.С. Даровых, Г.В. Лукьянов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева".

5. Патент № 2809770 С1 Российская Федерация, МПК H02H 9/08. Способ перевода разнесенного двойного замыкания на землю в однофазное в сетях с изолированной нейтралью : № 2022133610 : заявл. 20.12.2022 : опубл. 18.12.2023 / А. Н. Качанов, В. А. Чернышов, Г. В. Лукьянов, А. С. Даровых ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени И.С. ТУРГЕНЕВА"..

6. Чернышов, В. А. Использование транспозиции проводов для идентификации района аварийной посадки беспилотного летательного аппарата, осуществляющего мониторинг ЛЭП 10 кВ / В. А. Чернышов, М. О. Пригодский // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: Материалы XXI международной научно-практической конференции, Орёл, 15–16 ноября 2023 года. – Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2023. – С. 29-33. – EDN BLRVZN.

7. Патент № 2744035 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08. Устройство определения повреждённого участка воздушной линии электропередачи с ответвлениями в распределительной сети 6-35 кВ: № 2020124768: заявл. 16.07.2020: опубл. 02.03.2021 / С. В. Иванов, А. В. Рекеев, А. В. Стебеков, А. В. Буров; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Релематика", Акционерное общество "Россети Тюмень".

8. Лопатин, В. В. Система определения места повреждения воздушных линий электропередачи 6-35 кВ. Опыт применения в АО "Россети Тюмень" / В. В. Лопатин // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3(44). – С. 94-99.

9. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ – ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.

ПРИМЕНЕНИЕ СИЛОВЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СРЕДСТВ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ВОЗДУШНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ

Чернышов В.А.¹, Качанов А.Н.², Коренков Д. А.³, Астафьев Н.А.⁴

^{1,2,3,4} ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

¹blackseam78@mail.ru, ²kan@ostu.ru, ³dimas.corenkov@yandex.ru, ⁴astafiev.nikita@yandex.ru

В статье рассматривается вопрос о целесообразности применения высоковольтных разделительных трансформаторов в качестве альтернативных средств ограничения перенапряжений в воздушных электрических сетях (ВЭС) напряжением 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью. Актуальность темы обусловлена высокой аварийностью отключений потребителей, инициируемых однофазными замыканиями на землю (ОЗНЗ), которые кроме всего прочего представляют серьезную опасность для их жизнедеятельности. Авторы предлагают подключать воздушные линии электропередачи (ВЛЭП) 6-10 кВ с поврежденной изоляцией к питающей сети через разделительные трансформаторы. В случае возникновения в ВЛЭП 6-10 кВ ОЗНЗ это позволит не только исключить воздействие перенапряжений на отделившуюся часть сети, но и минимизировать величину тока ОЗНЗ в поврежденной линии. В целом, предлагаемое инженерно-техническое решение будет способствовать повышению надежности работы ВЭС 6-10 кВ, безопасности ее функционирования, минимизации убытков электросетевой компании от недоотпуска электрической энергии, а также сокращению потенциального ущерба для потребителей, инициируемого нарушением их социальной и производственной жизнедеятельности. Представленные технико-экономические расчеты раскрывают потенциал предлагаемого инженерно-технического решения и предварительно подтверждают целесообразность его практической реализации. Материал статьи будет полезен специалистам в области электроэнергетики, так как предлагает новый подход к повышению эффективности работы ВЭС 6-10 кВ с изолированной нейтралью в условиях ОЗНЗ.

Ключевые слова: воздушная электрическая сеть 6-10 кВ с изолированной нейтралью, воздушная линия электропередачи 6-10 кВ, однофазное замыкание на землю, ограничение перенапряжений, разделительный трансформатор, технико- экономическое обоснование.

APPLICATION OF POWER SEPARATION TRANSFORMERS AS ALTERNATIVE MEANS FOR OVERVOLTAGE LIMITATION IN AIR ELECTRIC NETWORKS OF 6-10 kV

Chernyshov V.A.¹, Kachanov A.N.², Korenkov D.A.³, Astafyev N.A.⁴

^{1,2,3,4} FSBEI HE «OSU named after I.S. Turgenev», Oryol, Russia

¹blackseam78@mail.ru, ²kan@ostu.ru, ³dimas.corenkov@yandex.ru,

⁴astafiev.nikita@yandex.ru

The article discusses the feasibility of using power separation transformers as alternative means to limit overvoltages in air electric networks (AEN) with a voltage of 6-10 kV, operating with an isolated neutral. The relevance of the topic is due to the high incidence of consumer outages caused by single-phase ground faults (SPGF), which pose a serious threat to their safety. The authors propose to automatically connect overhead power lines (OPL) of 6-10 kV with damaged insulation to the supply network through separation transformers. In the event of a SPGF in the OPL, this will not only eliminate the impact of overvoltages on the isolated part of the network but also minimize the magnitude of the SPGF current in the damaged line. Overall, the proposed engineering and technical solution will contribute to enhancing the reliability of AEN operation at 6-10 kV, ensuring its safe functioning, minimizing losses for the electric grid company due to unprovided electricity supply, and reducing potential damage to consumers caused by disruptions to their social and production activities. The presented technical and economic calculations reveal the potential of the proposed engineering and technical solution and preliminarily confirm its feasibility for practical implementation. This material will be useful for specialists in the energy sector, as it offers a new approach to improving the efficiency of AEN with an isolated neutral under SPGF conditions.

Keywords: air electric network 6-10 kV with isolated neutral, overhead power line 6-10 kV, single-phase ground fault, overvoltage limitation, separation transformer, technical and economic justification.

На сегодняшний день общая протяженность воздушных электрических сетей (ВЭС) 6-10 кВ с изолированной нейтралью в России превышает 1 миллион километров. Более 70 % повреждений в этих сетях возникают из-за однофазных замыканий на землю (ОЗНЗ), которые могут быть вызваны обрывами проводов или пробоями изоляторов. Изолированная нейтраль позволяет сохранять электроснабжение потребителей в течение ограниченного времени, необходимого для выявления ОЗНЗ, так как уровень линейного напряжения на вводах потребительских подстанций остается стабильным. Но одновременно с этим в электрически связанной ВЭС 6-10 кВ возникают перенапряжения на неповрежденных фазах, создавая потенциально опасные условия работы для её изоляции. Поиск места возникновения ОЗНЗ на ВЛЭП 6-10 кВ под напряжением является сложным и не безопасным видом работ. Это обусловлено формированием шагового напряжения, а также большой протяженностью и разветвленностью ВЛЭП данного класса напряжения,

трассы которой могут проходить по пересеченной и труднодоступной местности. Усложняют ситуацию также тёмное время суток и неблагоприятные погодные условия (ветер, дождь, туман и снег). Неравномерный физический износ изоляции ВЭС 6-10 кВ также снижает вероятность успешного поиска ОЗНЗ. Данное обстоятельство обусловлено тем, что во время поисковых работ может произойти повреждение изоляции на других фаз электрически связанной ВЭС 6-10 кВ, что может привести к возникновению более серьезного аварийного режима – двойного замыкания на землю (ДЗНЗ). Этот режим является одной из основных причин выхода из строя дорогостоящего подстанционного и электросетевого оборудования, что может вызвать длительные аварийное отключение одновременно нескольких ВЛЭП 6-10 кВ. Практикующийся в последнее время сценарий незамедлительного отключения ВЛЭП 6-10 кВ с ОЗНЗ предполагает дальнейшее отыскание места возникновения ОЗНЗ производить при снятом напряжении, что исключает возникновение перенапряжений и обеспечивает электробезопасность персонала и потребителей. Однако, невозможность использования поисковых приборов для обнаружения места ОЗНЗ, не позволяет оперативно реализовывать данный процесс и зачастую приводит к длительным перерывам в электроснабжении потребителей, что является на сегодняшний день весьма актуальной проблемой [1]. В целях решения данной проблемы сотрудниками кафедры электрооборудования и энергосбережения ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», в рамках инициативной НИР [2], был разработан способ [3], согласно которому при возникновении ОЗНЗ на ВЛЭП 6-10 кВ, эта линия будет подключаться к питающей сети через разделительный трансформатор, позволяющий на время поиска ОЗНЗ гальванически отделить её от остальной ВЭС 6-10 кВ, исключив тем самым воздействие на нее перенапряжений.

Произведем технико-экономическое обоснование целесообразности применения высоковольтного разделительного трансформатора для защиты от перенапряжений ВЭС 10 кВ на примере ВЛЭП 10 кВ (рисунок 1), находящейся в управлении Верховского РЭС филиала ПАО «Россети Центр»- «Орелэнерго». Общая протяженность данной ВЛЭП 10 кВ составляет 20,8 км, она отходит от ПС 35/10 кВ «Подлесная» и обеспечивает электроснабжение ряда сельскохозяйственных потребителей.

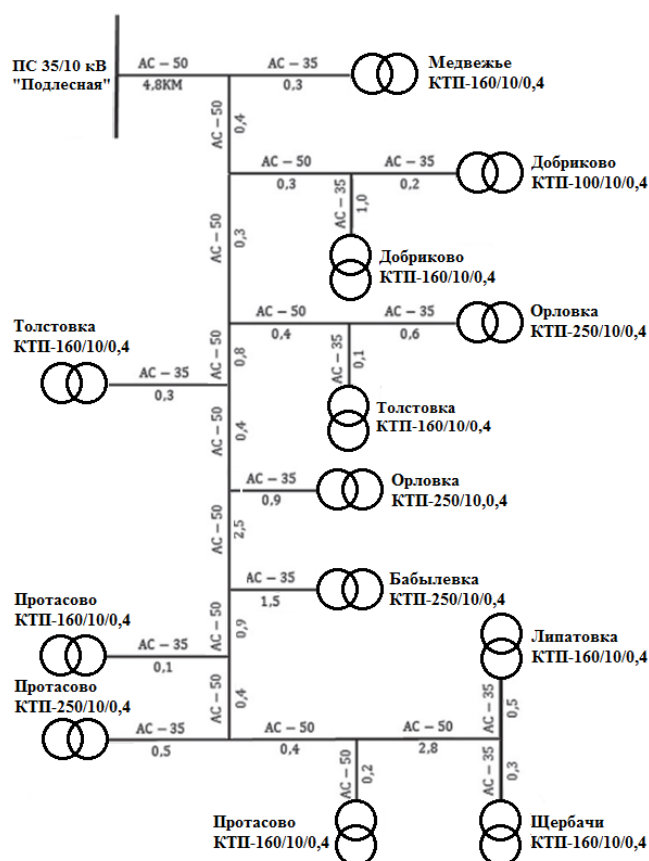


Рис. 1. Схема ВЛЭП 10 кВ, отходящая от ПС 35/10 кВ «Подлесная»

Сведения об аварийных отключениях данной линии за исследуемый период были получены из программного комплекса, с помощью которого оперативно-диспетчерская служба регистрирует аварийные инциденты.

Для расчета недоотпуска электроэнергии использовались сведения об отключаемой нагрузке в каждом случае аварии, зафиксированные в данной программе. Аварийные отключения данной ВЛЭП были вызваны возникновением на ней (в течение года) 3-х устойчивых ОЗНЗ с последующим их переходом в ДЗНЗ в ВЭС 10 кВ. Время перерыва в работе ВЛЭП 10 кВ составило 25,4 часа, что обусловлено временем отыскания (20 ч.) и устранения (5,4 ч.) данных повреждений. Недоотпуск электрической энергии за исследуемый период составил 30511 кВт·ч в год. Ущерб от недоотпуска электрической энергии при текущей стоимости электроэнергии ($C_{\text{ээ}}$) для потребителей среднего второго напряжения (СН II) 7,8 руб./кВт·ч составил 237986 руб. Ущерб, нанесенный потребителям в связи прерыванием технологического процесса, составил 549198 руб. Полный ущерб, вызванный аварийным отключением ВЛЭП 10 кВ, составил 787184 руб. [4]. Учитывая, что суммарная полная мощность всех КТП 10/0,4 кВ составляет 2380 кВА, а коэффициент их загрузки в среднем составляет 0,65, в результате чего мощность, потребляемая ВЛЭП 10 кВ, составляет 1547 кВА.

Для подключения данной ВЛЭП 10 кВ потребуется высоковольтный разделительный трансформатор ТСЛ-1600/10 (трансформатор сухой с литой изоляцией), который с высокой долей вероятности позволит предотвратить ущерб, наносимый ее аварийным отключением при ОЗНЗ.

В процессе технической проработки варианта подключения силового разделительного трансформатора к ВЭС 6-10 кВ, была принята схема коммутации, активизирующая его в работу, представленная на рисунке 2.

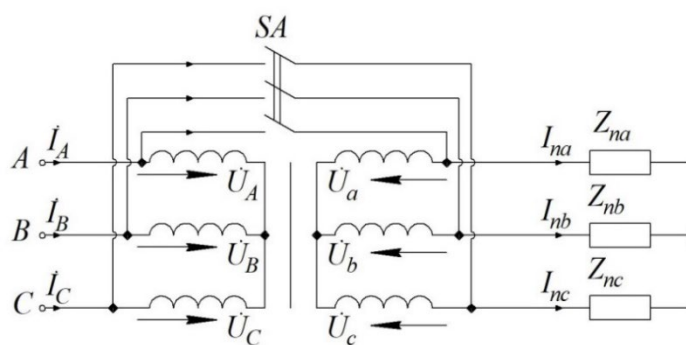


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема коммутации, активизирующая в работу силовой разделительный трансформатор

В результате математического моделирования мощности, передаваемой через разделительный трансформатор ТСЛ-1600/10 в различных режимах его работы при замкнутом и разомкнутом состоянии контактов коммутационного аппарата SA (вакуумного выключателя), были получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета характеристик разделительного трансформатора ТСЛ-1600/10

	$P_a=P_b=P_c=0,$ $R_n = \infty$	$P_a=P_b=P_c=$ $=(1/3)S_{ном},$ $R_n = \infty$	$P_a=P_b=P_c=0,$ $R_n = R_{пер}$	$P_a=P_b=P_c=$ $=(1/3)S_{ном},$ $R_n = R_{пер}$	$P_a=0,7S_{ном};$ $P_b=0,2S_{ном};$ $P_c=0,1S_{ном};$ $R_n = R_{пер}$
$I_{\mu A}/I_{\mu B}/I_{\mu C}, A$	0,586	0,583	0,586	0,586	0,586
$P_n, кВт$	0	1571	0	1595	1101
$P_{\kappa}, кВт$	$0,386 \cdot 10^{-3}$	11,33	$0,116 \cdot 10^{-3}$	$9,371 \cdot 10^{-3}$	$5,398 \cdot 10^{-3}$
$P_x, кВт$	3,299	3,267	3,299	3,294	3,296

Анализ результатов позволил установить, что энергетические показатели разделительного трансформатора не выходят за рамки

допустимых значений [5] в случае глухого соединения первичной и вторичной обмоток по схеме «звезда», как при замкнутом, так и при разомкнутом положении контактов коммутационного аппарата SA.

Стоимость силового разделительного трансформатора ($C_{\text{рт}}$) ТСЛ-1600/10 в среднем составляет 1800000 руб. Стоимость коммутационного аппарата SA ($C_{\text{ка}}$) при использовании трехполюсного вакуумного выключателя в среднем составляет 100000 руб.

Стоимость годовых потерь электроэнергии ($C_{\text{пз}}$) в силовом разделительном трансформаторе при разомкнутых и замкнутых контактах коммутационного аппарата SA составляет [6]:

$$C_{\text{пз}} = T_1 \cdot (P_{\text{х(р.к)}} + P_{\text{к(р.к)}}) \cdot \Pi_{\text{ээ}} + T_2 \cdot (P_{\text{х(з.к)}} + P_{\text{к(з.к)}}) \cdot \Pi_{\text{ээ}}, \quad (1)$$

где T_1 , T_2 – количество часов работы ВЛЭП 10 кВ соответственно при разомкнутых (20 ч) и замкнутых (8740 ч) контактах коммутационного аппарата SA;

$P_{\text{х(р.к)}}$, $P_{\text{х(з.к)}}$ – потери холостого хода разделительного трансформатора, соответственно при разомкнутых (3,267 кВт) и замкнутых (3,294 кВт) контактах коммутационного аппарата SA;

$P_{\text{к(р.к)}}$, $P_{\text{к(з.к)}}$ – потери короткого замыкания разделительного трансформатора, соответственно при разомкнутых (11,33 кВт) и замкнутых (0,0094 кВт) контактах коммутационного аппарата SA;

$\Pi_{\text{ээ}}$ – стоимость электроэнергии для потребителей среднего второго напряжения (СН II) 7,8 руб./кВт·ч.

$$C_{\text{пз}} = 20 \cdot (3,267 + 11,33) \cdot 7,8 + 8740 \cdot (3,294 + 0,0094) \cdot 7,8 = 2277,13 + 225199,38 = 227477$$

Стоимость ликвидируемого ущерба ($C_{\text{лу}}$), обеспечиваемая при подключении ВЛЭП 10 кВ с ОЗНЗ через высоковольтный разделительный трансформатор ТСЛ-1600/10, составляет 787184 руб. [4].

С учетом обозначенных выше основных экономических показателей годовой срок окупаемости капитальных вложений, связанных с приобретением силового разделительного трансформатора и трехполюсного вакуумного выключателя, составляет [6]:

$$T_{\text{ок}} = (C_{\text{рт}} + C_{\text{ка}}) / (C_{\text{лу}} - C_{\text{пз}}), \quad (2)$$

$$T_{\text{ок}} = (1800000 + 100000) / (787184 - 227477) = 3,4 \text{ года}$$

Необходимо отметить, что при расчете данного срока окупаемости не учитывались капитальные вложения, связанные с проведением электромонтажных работ, а также эксплуатационные издержки, связанные с проведением технического обслуживания и текущего ремонта приобретаемого электрооборудования, что в целом занижает срок окупаемости. Однако на уменьшение срока окупаемости значительно повлияли бы неучтенные [6]: а) годовая экономия, обусловленная повышением эксплуатационной надежности линейной изоляции ВЭС 10 кВ за счет предотвращения воздействия на нее перенапряжений, возникающих

при ОЗНЗ; б) потенциальный ликвидируемый ущерб, наносимый электросетевому и подстанционному оборудованию ВЭС 10 кВ, обусловленный возникновением ДЗНЗ.

Представленные техническое обоснование способа подключения разделительного трансформатора и предварительное экономическое обоснование целесообразности его применения в ВЭС 10 кВ могут представлять профессиональный интерес для Федеральной сетевой компании ПАО «Россети», а также сторонних организаций, занимающихся продвижением новых технологий в электроэнергетике.

Источники

1. Качанов, А. Н. К вопросу оценки эффективности функционирования воздушных электрических сетей напряжением 10 кВ с изолированной нейтралью / А. Н. Качанов, В. А. Чернышов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 11. – С. 24-29.

2. Инициативная НИР. Оптимизация процессов проектирования и функционирования электротехнических комплексов и систем электроснабжения потребителей". – утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» № 1409 от 01.12.2022.

3. Патент № 2798464 С1 Российская Федерация, МПК H02H 3/16. Способ автоматического устранения перенапряжения при однофазном замыкании на землю в электрической сети с изолированной нейтралью: № 2022133602: заявл. 20.12.2022: опубл. 23.06.2023 / А.Н. Качанов, В. А. Чернышов, А.С. Даровых, Г.В. Лукьянов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева".

4. Некрасов, А.И. Многокритериальная оценка применения элементов воздушных линий электропередач 10 кВ /А.И. Некрасов, П.Н. Подобедов // «Агроинженерия». 2018. – Вестник №1. – С. 63-67

5. Трансформаторы сухие с литой изоляцией до 10 кВ [Электронный ресурс]. - URL: http://www.mitek.spb.ru/files/tsl_tszl_1414615883.pdf (дата обращения: 22.01.2025).

6. Водяников, В.Т. Организационно экономические основы сельской электроэнергетики: Учебное пособие для вузов по агроинженерным специальностям. Издание второе переработанное и дополненное. – М.: ИКФ «Экмос», 2003. – 352 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Чистяков А.В.¹, Голубева И.Л.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

chistik2k7@gmail.com

В данной работе проведён сравнительный анализ твердотельного и поверхностного моделирования при проектировании оборудования для электросетей. Рассматриваются особенности применения каждого метода, их влияние на точность, надёжность и эффективность инженерных решений, а также роль в повышении безопасности и экономической целесообразности.

Ключевые слова: твердотельное моделирование, поверхностное моделирование, CAD, электросети, проектирование, надёжность

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOLID-STATE AND SURFACE MODELING IN THE DESIGN OF ELECTRICAL NETWORK EQUIPMENT

Chistyakov A.V.¹, Golubeva I.L.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

chistik2k7@gmail.com

In this paper, a comparative analysis of solid-state and surface modeling in the design of equipment for power grids is carried out. The specifics of the application of each method, their impact on the accuracy, reliability and efficiency of engineering solutions, as well as their role in improving safety and economic feasibility are considered.

Keywords: solid-state modeling, surface modeling, CAD, power grids, design, reliability.

В инженерной практике проектирование электротехнического оборудования требует высокой точности и детализации, что обеспечивается современными CAD-системами. Эти инструменты позволяют последовательно прорабатывать конструкцию — от общей компоновки до отдельных узлов, включая подбор материалов и расчёты нагрузок. При этом выбор оптимального метода моделирования напрямую влияет на качество и

достоверность результатов. Основными подходами в этой области остаются твердотельное и поверхностное моделирование [1].

Твердотельное моделирование даёт возможность создавать детализированные объёмные модели, содержащие информацию о физических параметрах: массе, плотности, моменте инерции и даже теплопроводности. Такие модели представляют собой замкнутые тела, поэтому CAD-система способна автоматически рассчитывать площади, объёмы, центры тяжести и другие важные характеристики. Это особенно полезно в энергетическом машиностроении, где малейшие просчёты в конструкции могут привести к ощутимым последствиям — от перерасхода материалов до некорректного функционирования высоковольтного оборудования. Например, при проектировании шкафов КРУ (комплектных распределительных устройств) важно учитывать и вибрационные нагрузки, и тепловые режимы, чтобы избежать перегрева. Твердотельное моделирование облегчает такие расчёты, поскольку любая деталь имеет чётко заданную толщину и структуру.

Помимо прочностных и тепловых расчётов, твердотельные модели существенно ускоряют процедуру подготовки производственной документации. Практически любые сборочные чертежи и спецификации формируются автоматически на основе заложенных в 3D-модель параметров. Это не только снижает вероятность ошибок при ручном черчении и оформлении, но и упрощает процесс согласования между конструкторским, технологическим и производственным отделами. Также возрастает прозрачность и управляемость на всем жизненном цикле изделия, ведь данные из CAD-системы могут использоваться и в ERP-системах, и в PDM/PLM-решениях, где фиксируются изменения и формируются заявки на закупку материалов [2].

Поверхностное моделирование, ориентированное на создание внешних оболочек и контуров объекта, даёт дизайнерам и инженерам большую свободу при первоначальной проработке формы. Оно востребовано на начальных этапах проектирования, когда важны общие пропорции, обтекаемость и эстетические аспекты изделия. В энергетике это может проявляться, например, при проектировании корпусов подстанций или трансформаторов, где нужно адаптировать конструкцию к особенностям городской среды или вписать её в ограниченное пространство с учётом архитектурных требований. Поверхностные модели позволяют быстро изменять геометрию, «перекраивая» отдельные участки оболочки без необходимости перестраивать всю структуру, что существенно экономит время.

Однако у поверхностного моделирования есть и свои ограничения. Поскольку в нём не задаётся замкнутый объём и толщина, такие модели не всегда подходят для точных расчётов массы, механических напряжений, тепловых нагрузок и других критичных параметров, влияющих на надёжность и экономическую эффективность оборудования. В результате, если проект требует дальнейших инженерных исследований, часто приходится либо вручную утолщать поверхностную модель, либо переводить её в твердотельный формат, что может привести к дополнительным трудозатратам [3].

Важность правильного выбора между этими методами особенно заметна в условиях серийного производства и в больших инфраструктурных проектах. Ошибки при виртуальной сборке ведут к рискам аварийных ситуаций, финансовым потерям и снижению надёжности энергосистем. Твердотельное моделирование в этом плане более безопасно, поскольку позволяет заранее обнаружить пересечения деталей, нестандартные зазоры, а также выявить потенциальные зоны перегрева и механического повреждения. В свою очередь, поверхностные модели часто используются в рекламных и презентационных целях, а также для предварительной компоновки объектов в виртуальном пространстве, когда важнее показать внешний вид и расположение в стеснённых условиях [4].

Сегодняшние тенденции в цифровизации и развитии BIM-технологий способствуют ещё более тесной интеграции твердотельных и поверхностных моделей в единую информационную среду. Например, в рамках одного проекта может применяться твердотельная модель для расчётов и инженерного анализа, а поверхностная — для быстрого рендеринга и презентации заказчику. Подобная совокупность данных облегчает коммуникацию между разными подразделениями: конструкторы и инженеры получают точную геометрию для расчётов, маркетологи и проектировщики — высококачественные визуализации и анимации.

Кроме того, в перспективе планируется активно внедрять «цифровые двойники» электросетевых объектов. Это означает, что в виртуальной среде будут аккумулироваться все данные об изделии: информация о размерах, материалах, условиях эксплуатации и даже реальном износе в ходе эксплуатации. Благодаря этому становится возможным проводить прогнозную аналитику, оценивать вероятность отказов оборудования, планировать техобслуживание и оптимизировать управление сетями. Технологии BIM и PLM позволяют объединять данные, полученные из CAD-систем, с информацией от смежных процессов, повышая точность и надёжность инженерных решений [5].

Таким образом, выбор между твердотельным и поверхностным моделированием имеет стратегическое значение для создания эффективного, безопасного и экономически выгодного оборудования в сфере энергетики и электросетевой инфраструктуры. Твердотельные модели дают инженерную точность и глубокую аналитику, что важно при производстве и эксплуатации. Поверхностные модели, в свою очередь, обеспечивают гибкость и скорость при поиске оптимальных форм, а также позволяют эффективно работать над эстетикой и эргономикой. В современных условиях эти методы часто используются в комплексе, взаимодополняя друг друга и повышая конкурентоспособность предприятий. Такая комбинация даёт возможность запускать инновационные проекты быстрее, точнее и с меньшим количеством ошибок на всех этапах жизненного цикла оборудования.

Источники

1. Cad что такое. — URL: <https://skyeng.ru/magazine/wiki/it-industriya/chto-takoe-cad/> (дата обращения: 05.04.2025).
2. Руппель, А. А., Ефимов, А. В. Твердотельное моделирование и его применение в САПР. Пример использования твердотельного моделирования при создании математической модели дорожной техники на примере моделирования экскаватора ЭО 3322 / А. А. Руппель, А. В. Ефимов [Текст] // Компьютерные и информационные науки. С. 1-4.
3. Поверхностное моделирование // Высокие технологии. URL: <https://vys-tech.ru/2017/08/04/poverxnostnoe-modelirovanie/> (дата обращения: 05.04.2025).
4. Твердотельное/поверхностное 3D моделирование. URL: <http://world-of-cnc.com/technology/tverdotelnoepoverhnostnoe-3d-modelirovanie/?lang=ru> (дата обращения: 07.04.2025).
5. BIM-проектирование в строительстве. URL: <https://bim-smeta.ru/programmy-dlja-proektirovanija/> (дата обращения: 07.04.2025)

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ SAIDI И SAIFI ПО ДАННЫМ СИСТЕМА УЧЕТА

Шайхутдинов А.А.¹, Валиуллина Д.М.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
shaykhudinov_azamat@bk.ru

В данной статье представлен алгоритм автоматизированного расчета показателей надежности электроснабжения SAIDI и SAIFI на основе данных системы учета электроэнергии. Описаны этапы алгоритма, методы обработки данных и результаты апробации на реальных данных. Показана эффективность и точность алгоритма для мониторинга и анализа надежности электроснабжения.

Ключевые слова: SAIDI, SAIFI, надежность электроснабжения, система учета, автоматизация, алгоритм, электроэнергетика, показатели надежности, мониторинг, анализ.

ALGORITHM FOR AUTOMATED DETERMINATION OF RELIABILITY INDICATORS SAIDI AND SAIFI BASED ON DATA FROM THE ACCOUNTING SYSTEM

Shaikhutdinov A. A.¹, Valiullina D. M.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
shaykhudinov_azamat@bk.ru

This article presents an algorithm for automated calculation of power supply reliability indicators SAIDI and SAIFI based on electricity metering system data. The algorithm stages, data processing methods and results of testing on real data are described. The efficiency and accuracy of the algorithm for monitoring and analyzing power supply reliability are shown.

Keywords: SAIDI, SAIFI, power supply reliability, metering system, automation, algorithm, electric power industry, reliability indicators, monitoring, analysis.

Современные требования к качеству электроснабжения подразумевают не только стабильное напряжение и частоту, но и высокую надежность. Показатели SAIDI (System Average Interruption Duration Index) и SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) являются ключевыми индикаторами надежности электроснабжения и широко используются для оценки работы электросетевых компаний. Ручной расчет данных показателей – трудоемкий и подверженный ошибкам процесс. В связи с

этим, актуальной задачей является разработка алгоритмов автоматизированного расчета SAIDI и SAIFI на основе данных системы учета электроэнергии. [1, с. 52]

Существующие подходы к расчету SAIDI и SAIFI, как правило, основываются на ручном сборе и обработке данных об отключениях электроэнергии. Такой подход требует значительных временных затрат и подвержен человеческому фактору, что может приводить к неточностям в расчетах. Автоматизация расчета данных показателей позволяет существенно повысить оперативность и точность оценки надежности энергоснабжения.

Целью данной работы является разработка и описание алгоритма автоматизированного определения показателей надежности SAIDI и SAIFI на основе данных системы учета электроэнергии. Предлагаемый алгоритм обеспечивает возможность оперативного мониторинга надежности энергоснабжения и принятия обоснованных решений по оптимизации работы электросетевого комплекса [1, с. 52].

Предлагаемый алгоритм состоит из следующих этапов:

Получение данных из системы учета электроэнергии. На данном этапе осуществляется получение данных об отключениях электроэнергии из системы учета, включая информацию о времени начала и окончания отключения, а также количестве потребителей, затронутых отключением.

Фильтрация и очистка данных. Полученные данные подвергаются фильтрации для исключения некорректных или неполных данных. Также осуществляется очистка данных от дубликатов и ошибок.

Агрегирование данных. Данные агрегируются по времени (например, по часам, дням, месяцам) и по географическому расположению (например, по районам, подстанциям).

Расчет показателей SAIDI и SAIFI. На основе агрегированных данных рассчитываются показатели SAIDI и SAIFI по следующим формулам:

$$SAIDI = (\text{Сумма продолжительности всех отключений для каждого потребителя}) / (\text{Общее количество потребителей})$$

$$SAIFI = (\text{Сумма количества всех отключений для каждого потребителя}) / (\text{Общее количество потребителей})$$

Визуализация и анализ результатов. Результаты расчета показателей SAIDI и SAIFI визуализируются в виде графиков и таблиц для наглядного представления и анализа.

Предложенный алгоритм может быть реализован с использованием различных языков программирования и библиотек. В качестве примера приведем реализацию алгоритма с использованием языка программирования Python и библиотеки Pandas.

pythonКопировать

```
import pandas as pd

# Загрузка данных из CSV файла
data = pd.read_csv('data.csv')

# Фильтрация данных (пример)
data = data[data['duration'] > 0]

# Агрегирование данных по потребителям
aggregated_data = data.groupby('consumer_id').agg({'duration': 'sum', 'interruption': 'count'})

# Расчет показателей SAIDI и SAIFI
total_consumers = len(aggregated_data)
total_duration = aggregated_data['duration'].sum()
total_interruptions = aggregated_data['interruption'].sum()

SAIDI = total_duration / total_consumers
SAIFI = total_interruptions / total_consumers

print(f'SAIDI: {SAIDI}')
print(f'SAIFI: {SAIFI}')
```

Алгоритм с использованием языка программирования Python и библиотеки Pandas

Предложенный алгоритм позволяет автоматизировать процесс расчета показателей надежности SAIDI и SAIFI на основе данных системы учета электроэнергии. Автоматизация расчета данных показателей позволяет повысить оперативность и точность оценки надежности энергоснабжения, что способствует принятию обоснованных решений по оптимизации работы электросетевого комплекса. Преимуществами автоматизации расчета показателей являются снижение трудозатрат и исключение ошибок, связанных с ручной обработкой данных. Результаты работы алгоритма могут быть использованы для мониторинга и анализа надежности энергоснабжения, выявления проблемных участков сети и оценки эффективности мероприятий по повышению надежности.

В данной статье предложен алгоритм автоматизированного определения показателей надежности энергоснабжения SAIDI и SAIFI на основе данных системы учета электроэнергии. Алгоритм состоит из этапов получения, фильтрации, агрегирования и расчета данных, а также

визуализации и анализа результатов. Приведен пример реализации алгоритма с использованием языка программирования Python и библиотеки Pandas. Предложенный алгоритм позволяет повысить оперативность и точность оценки надежности энергоснабжения, что способствует принятию обоснованных решений по оптимизации работы электросетевого комплекса. В дальнейшем планируется расширение функциональности алгоритма, включая возможность учета различных типов отключений и интеграцию с другими информационными системами. [4, с. 9]

Источники

1. Данилов М.И. О выявлении и расчёте потерь электроэнергии автоматизированными системами учёта распределительных сетей при несанкционированных потреблении. – Электричество, 2021, № 6, с. 51–61.
2. Кучерявенков А.А., Горожанкин П.А. Централизованное решение по автоматике распределителей 6–10 кВ с использованием «умных» разъединителей и выключателей нагрузки. – Электроэнергия. Передача и распределение, 2023, № 4(79), с. 90–93.
3. Тивари А., Тивари С. Оценка клиентоориентированных показателей и исследование надежности системы электроснабжения. – Надежность, 2023, т. 23, № 2, с. 49–56.
4. Обоскалов В.П., Герасименко А.А. Определение предела мощности, передаваемой по линии электропередачи, при оценке балансовой надежности электроэнергетических систем. – Электричество, 2023, № 7, с. 6–19.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ПОЛЮСОПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ОБМОТКИ С СООТНОШЕНИЕМ ПОЛЮСОВ 3/4

Шамсутдинов Х.Ф.

ТГТУ, г. Ташкент, Республика Узбекистан

shamsutdinovh83@gmail.com

В статье представлена методика построения полюсопереключаемых обмоток для двухскоростных асинхронных двигателей с близким соотношением полюсов 3/4 при 36 пазах статора, получившее широкое распространение на электрическом приводе турбомеханизмов. Обоснованно необходимость применения на электроприводах турбомеханизмов двухскоростных асинхронных двигателей в целях экономии электрической энергии при менее загруженных режимах работы механизма. Применяемые, в настоящее время, двухскоростные двигатели имеют две отдельные обмотки, что ухудшает их массогабаритные показатели. Применение одной полюсопереключаемой обмотки в двухскоростных двигателях дает возможность экономии обмоточной меди и изоляционных материалов.

Описана методика построения полюсопереключаемых обмоток с соотношением пар полюсов 3/4 при 36 пазах статора на основе базовой схемы «три трехфазные звезды» и «три трехфазные звезды с дополнительными ветвями», где в качестве исходной обмотки взяты m -зонные обмотки с числами пар полюсов $p_1=3$ и $p_2=4$.

Ключевые слова: обмотка, полюс, турбомеханизм, электрический привод, магнитопровод, двухскоростной двигатель, базовая схема, дискретно-заданная пространственная функция, паз, слой.

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF A POLE- SWITCHED WINDING WITH A POLE RATIO OF 3/4

Shamsutdinov H.F.

TSTU, Tashkent, Republic of Uzbekistan

shamsutdinovh83@gmail.com

The article presents a method for constructing pole-switching windings for two-speed asynchronous motors with a close pole ratio of 3/4 with 36 stator slots, which has become widespread in the electric drive of turbomechanisms. The need to use two-speed asynchronous motors in electric drives of turbomechanisms in order to save electric energy at less loaded operating modes of the mechanism is substantiated. The two-speed motors currently used have

two separate windings, which worsens their weight and size parameters. The use of one pole-switching winding in two-speed motors makes it possible to save winding copper and insulating materials.

The paper describes a method for constructing pole-switching windings with a pole pair ratio of 3/4 with 36 stator slots based on the basic scheme of “three three-phase stars” and “three three-phase stars with additional branches”, where m-zone windings with pole pair numbers $p_1=3$ and $p_2=4$ are taken as the initial winding.

Keywords: winding, pole, turbomechanism, electric drive, magnetic circuit, two-speed motor, basic circuit, discretely specified spatial function, groove, layer.

Турбомеханизмы ежегодно потребляют около 25% всей электроэнергии, вырабатываемой энергосистемами страны. Высокое энергопотребление этих объектов придает важное народнохозяйственное значение проблеме экономии электроэнергии [1].

Широко применяемый, в настоящее время, количественный способ регулирования производительности турбомеханизмов (центробежных насосов, вентиляторов, компрессоров), основанный на дросселировании на стороне нагнетания, характеризуется значительным снижением КПД, увеличением расхода электрической энергии. При качественном способе (изменении числа оборотов приводного двигателя) возможно повышение КПД установки в среднем на 20% по сравнению с количественным способом [2].

Наряду с частотным регулированием получили распространение электропривода с многоскоростными двигателями. Эти привода имеют ряд достоинств: относительная дешевизна и простота в управлении и эксплуатации, а также большая эффективность с точки зрения экономии электроэнергии при менее жестких требованиях к электроприводу [3].

К сожалению, большое количество двухскоростных электродвигателей, используемых в турбомеханизмах, имеет две отдельные обмотки статора, что ухудшает их массогабаритные показатели и эксплуатационные характеристики. Применение одной полюсопереключаемой обмотки, имеющей две группы выводов для каждой полюсности, позволяет увеличить полезную мощность двигателя, т.е. более эффективно использовать активную часть машины, сэкономить обмоточную медь и изоляционные материалы, повысить энергетические показатели, а также дает возможность приблизить двухскоростной асинхронный двигатель по массогабаритным показателям к обычным серийным односкоростным двигателям [5].

На основе метода «Дискретно-заданные пространственные функции» (ДЗПФ) разработано множество схем полюсопереключаемых обмоток на широкий диапазон соотношения полюсов и фаз [10].

Наиболее рациональные соотношения чисел пар полюсов для турбомеханизмов являются близкие соотношения пар полюсов $2/3$, $3/4$, $5/6$ и т.д. по схемам $YYY/YYYY$, $YYY/YYYY$ с дополнительными ветвями. Они очень удобны в эксплуатации, так как не требуют дополнительных переключающих устройств при изменении частоты вращения [6].

В качестве примера рассмотрим построение полюсопереключаемой обмотки с соотношением пар полюсов $3/4$. За исходные обмотки возьмем две двухслойные петлевые m -зонные обмотки статора, размещенные в 36 пазах, с числами пар полюсов $p_1=3$ и $p_2=4$, шагом $y=1-7$ и $y=1-5$ (табл.1, 2).

Таблица 1

Двухслойная петлевая обмотка с числами пар полюсов $p_2=4$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	stator slots
<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	$p_2=4$
a	a	a	b	b	b	c	c	c	a	a	a	b	b	b	c	c	c	poles

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	stator slots
<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	$p_2=4$
a	a	a	b	b	b	c	c	c	a	a	a	b	b	b	c	c	c	poles

Таблица 2

Двухслойная петлевая обмотка с числами пар полюсов $p_1=3$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	stator slots
<u>e</u>	<u>e</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	$p_1=3$
d	d	d	d	e	e	e	e	f	f	f	f	d	d	d	d	e	e	poles

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	stator slots
<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	$p_1=3$
e	e	f	f	f	f	d	d	d	d	e	e	e	e	f	f	f	f	poles

В соответствии с развернутой схемой получена ДЗПФ каждой обмотки отдельно (табл.1, 2), дискретными элементами которой являются пары состояний проводников, например, для $p_1=3$ D, E, F- положительное направление тока (т.е. “от нас”), а D, E, F - отрицательное (т.е. “к нам”), За положительное направление тока обычно принимается нижний слой обмотки.

Рассматривая одновременно эти обмотки, можно произвести δ -сдвиг верхней ДЗПФ $p_1=3$ полюсной обмотки влево на один паз (табл. 3) и δ -сдвиг верхней ДЗПФ $p_2=4$ полюсной обмотки - вправо на один паз (табл. 4), и тем самым найти оптимальный шаг, удовлетворяющий каждую обмотку одновременно, в данном случае $y=5$.

Таблица 3

Проведение на δ сдвига обмотки с числом пар полюсов $p_2=4$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	stator slots
<u>b</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	$\rightarrow \delta$
a	a	a	b	b	b	c	c	c	a	a	a	b	b	b	c	c	c	$p_2=4$

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	stator slots
<u>b</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>b</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>c</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>a</u>	<u>b</u>	$\rightarrow \delta$
a	a	a	b	b	b	c	c	c	a	a	a	b	b	b	c	c	c	$p_2=4$

Таблица 4

Проведение на δ сдвига обмотки с числом пар полюсов $p_1=3$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	stator slots
<u>e</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>d</u>	$\rightarrow \delta$
d	d	d	d	e	e	e	e	f	f	f	f	d	d	d	d	e	e	$p_1=3$

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	stator slots
<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>f</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>d</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	<u>e</u>	$\leftarrow \delta$
e	e	f	f	f	f	d	d	d	d	e	e	e	e	f	f	f	f	$p_1=3$

Наряду со δ - сдвигом в рассматриваемом методе имеется возможность выполнять γ - сдвиг, который осуществляется путем смещения с неизменным взаимным расположением нижней и верхней ДЗПФ одной из обмоток относительно ДЗПФ другой обмотки; γ - сдвиг не нарушает соответствие, установленное сдвигом δ , и в ряде случаев приводит к относительному улучшению электромагнитных свойств ППО.

Объединение групп катушек в обмотку осуществляется в соответствии с соединениями катушек в базовой схеме YYY/YYY [8].

Расположив нижний ряд каждой обмотки друг под другом (табл.5), по состоянию наименования фазы в пазу с одной и другой обмотки можно определить ветвь, которой соответствует тот или иной номер катушки. Например, паз №1 при $p_1=3$ полюсной обмотки соответствует фазе D , а при $p_2=4$ фазе A , следовательно, принадлежит ветви $A-D$. Основываясь на этом принципе, составляем таблицу с номерами катушек, сгруппированных в ветви базовой схемы (табл.6).

Полученная полюсопереключаемая обмотка симметрична по отношению к источнику питания со стороны $2p_1$ полюсности, а со стороны $2p_2$ имеет расхождение векторов ЭДС между ветвями одноименной фазы $A-D$ и $A-E$ по амплитуде на 4,9% и по фазе на 11 эл.градусов, соответственно это приводит к различию обмоточных коэффициентов (табл. 7, 8).

Таблица 5

Определение катушек в ветвях двухскоростной обмотки

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	stator slots
d	d	d	d	e	e	e	e	f	f	f	f	d	d	d	d	e	e	$p_1=3$
a	a	a	b	b	b	c	c	c	a	a	a	b	b	b	c	c	c	$p_2=4$

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	stator slots
e	e	f	f	f	f	d	d	d	d	e	e	e	e	f	f	f	f	$p_1=3$
a	a	a	b	b	b	c	c	c	a	a	a	b	b	b	c	c	c	$p_2=4$

Таблица 6

Группирования катушек в ветви по базовой схеме YYY/YYY

Номера катушек	Ветви базовой схемы YYY/YYY								
	a-d	a-e	a-f	b-d	b-e	b-f	c-d	c-e	c-f
	1, 2, 3, 28	19, 20 29, 30	10, 11, 12, 21	4, 13, 14, 15	5, 6, 31, 32	22, 23, 24, 33	16, 25, 26, 27	7, 8, 17, 18	9, 34, 35, 36

Таблица 7

Обмоточные коэффициенты со стороны $p_1=3$

	Ветви БС YYY/YYY при $p_1=3$								
	<i>d-a</i>	<i>d-b</i>	<i>d-c</i>	<i>e-a</i>	<i>e-b</i>	<i>e-c</i>	<i>f-a</i>	<i>f-b</i>	<i>f-c</i>
<i>A</i>	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
<i>k_{обм}</i>	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808	0,808
<i>Z</i>	210	210	210	330	330	330	90	90	90

Таблица 8

Обмоточные коэффициенты со стороны $p_2=4$

	Ветви БС YYY/YYY при $p_2=4$								
	<i>a-d</i>	<i>a-e</i>	<i>a-f</i>	<i>b-d</i>	<i>b-e</i>	<i>b-f</i>	<i>c-d</i>	<i>c-e</i>	<i>c-f</i>
<i>A</i>	6,61	6,95	6,61	6,61	6,95	6,61	6,61	6,95	6,61
<i>k_{обм}</i>	0,827	0,869	0,827	0,827	0,869	0,827	0,827	0,869	0,827
<i>Z</i>	39	50	61	159	170	181	279	290	301

Для улучшения электромагнитных свойств и в случаях, когда требуется высокое использование активной части машины (особенно в машинах большой мощности), целесообразно использовать обмотки по схеме YYY/YYY с дополнительными ветвями; они также очень удобны в эксплуатации, так как отсутствует дополнительное коммутирующее устройство [10, 11].

Число дополнительных ветвей в каждой фазе указанных обмоток в общем случае равно n , но чаще от одного до трех. Числа катушек i в дополнительных

ветвях каждой фазы могут быть четными и нечетными. Построение таких обмоток осложняется необходимостью устранения уравнильных токов в дополнительных ветвях. При питании обмотки со стороны меньшей полюсности в дополнительных ветвях наводится ЭДС, которые должны взаимокompенсироваться, в противном случае появятся уравнильные токи. Отсутствие этих токов связано с выполнением условий:

- 1) вектора суммарных ЭДС ветвей фазы совпадают по величине и направлению при помещении обмотки в магнитное поле с большим числом полюсов $2p_2$;
- 2) вектора суммарных ЭДС ветвей фазы совпадают по величине и направлению при помещении обмотки в магнитное поле с меньшим числом полюсов $2p_1$ при $n=3$ и i нечетное;
- 3) вектора ЭДС одной ветви совпадают по величине и направлены встречно при помещении обмотки в магнитное поле с меньшим числом полюсов $2p_1$ при $n=1 \div 2$ и i четное;
- 4) вектора ЭДС одной ветви совпадают по величине и отстают друг от друга на $2\pi/i$ эл.градусов при помещении обмотки в магнитное поле с меньшим числом полюсов $2p_1$ при $n=1 \div 2$ и $i > 3$;

На основе данных предыдущего примера построим ППО по схеме YYY/YYY с дополнительными ветвями.

Находим соотношение катушек при одной и другой полюсности:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{3}{4} = \frac{Z_{p=3}}{Z_{p=4}} = \frac{27}{36},$$

находим количество катушек в дополнительных ветвях каждой фазы-

$$\frac{Z_{\partial}}{m} = \frac{3}{4} = \frac{Z_{p=4} - Z_{p=3}}{m} = \frac{36 - 27}{3} = 3.$$

В данном случае, согласно условию 4, катушки должны быть соединены последовательно и распределяться так, чтобы угол сдвига по отношению друг к другу при помещении обмотки в магнитное поле с меньшим числом полюсов был равен 120 эл.градусов, т.е. должны взаимокompенсироваться. Для этого расположим нижний слой каждой обмотки друг под другом и исключим по одной катушке из каждой фазы полюсной зоны со стороны полюсности $2p_1$. Соответственно, со стороны полюсности $2p_2$ это могут быть катушки в пазах под номерами: для фазы A - 1, 21, 29; для фазы B - 5, 13, 33; для фазы C - 9, 17, 25 (в табл.9 они подчеркнуты снизу). Эти катушки выводятся в дополнительные ветви и, перераспределяясь по фазам, участвуют в создании магнитного поля полюсности $2p_2$.

Определение дополнительных ветвей обмотки

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	stator slots
0	d	d	d	0	e	e	e	0	f	f	f	0	d	d	d	0	e	$p_1=3$
<u>a</u>	a	a	b	<u>b</u>	b	c	c	<u>c</u>	a	a	a	<u>b</u>	b	b	c	<u>c</u>	c	$p_2=4$

19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	stator slots
e	e	0	f	f	f	0	d	d	d	0	e	e	e	0	f	f	f	$p_1=3$
a	a	<u>a</u>	b	b	b	<u>c</u>	c	c	a	<u>a</u>	a	b	b	<u>b</u>	c	c	c	$p_2=4$

Определим номера катушек в каждой ветви обмотки по методу предыдущего примера и составим таблицу с номерами катушек, сгруппированных в базовую схему (табл. 10).

Полученная полюсопереключаемая обмотка абсолютно симметрична по отношению к источнику питания со стороны обеих полюсностей (табл.11, 12).

Таблица 10

Определение номера катушек в каждой ветви обмотки

Номера катушек	Ветви базовой схемы УУУ/УУУ с дополнительными ветвями											
	a-d	a-e	a-f	A _{доп}	b-d	b-e	b-f	B _{доп}	c-d	c-e	c-f	C _{доп}
	2,	19,	10,	1,	4,	6,	22,	5,	16,	7,	34,	9,
	3,	20	11,	21,	14,	31,	23,	13,	26,	8,	35,	17,
28	30	12	29	15	32	24	33	27	18	36	25	

Таблица 11

Обмоточные коэффициенты со стороны $p_1=3$

	Ветви БС УУУ/УУУ с дополнительными ветвями при $p_1=3$								
	d-a	d-b	d-c	e-a	e-b	e-c	f-a	f-b	f-c
A	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26
$k_{обм}$	0,876	0,876	0,876	0,876	0,876	0,876	0,876	0,876	0,876
∇	195	195	195	315	315	315	75	75	75

Коэффициенты дифференциального рассеяния, рассчитанные с использованием диаграммы Гёргеса, равны $\sigma_0=1,39$ и $\sigma_0=3,23$ при $p_1=3$ и $p_2=4$, соответственно.

Приведенная методика построения полюсопереключаемых обмоток может быть использована при числе пазов статора с модулем 36 для соотношения пар полюсов 3/4 и для соотношения 5/6 при числе пазов с модулем 54.

Обмоточные коэффициенты со стороны $p_2=4$

	Ветви БС YYY/YYY с дополнительными ветвями при $p_2=4$								
	<i>a-d</i>	<i>a-e</i>	<i>a-f</i>	<i>b-d</i>	<i>b-e</i>	<i>b-f</i>	<i>c-d</i>	<i>c-e</i>	<i>c-f</i>
<i>A</i>	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64
<i>k_{обм}</i>	0,831	0,831	0,831	0,831	0,831	0,831	0,831	0,831	0,831
<i>Z</i>	50	50	50	170	170	170	290	290	290

Анализ электромагнитных свойств полюсопереключаемой обмотки показал, что в некоторых случаях возникновение несимметрии в ветвях можно устранить путем использования схем с дополнительными ветвями [12].

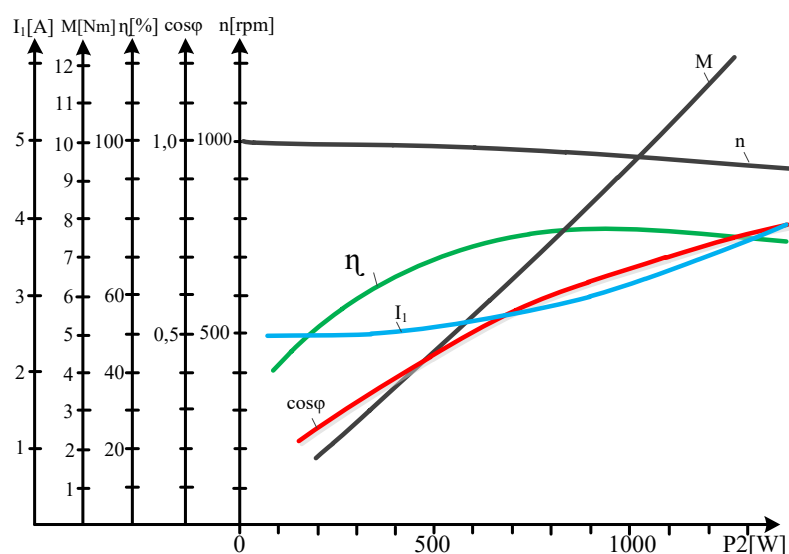


Рис.1. Рабочие характеристики двухскоростного двигателя типа AGM100L6/8 со стороны $p_1=3$

Совместно со специалистами института высоких технологий Гебзе (Турция) был изготовлен опытный образец нового двухскоростного асинхронного двигателя, собранного на базе магнитопровода односкоростного двигателя AGM100L6 (выпускаемого англо-турецкой фирмой «GAMAK») с использованием вышеприведенной ППО на основе базовой схемы YYY/YYY с дополнительными ветвями, который прошёл полный курс промышленных испытаний в лаборатории «Электромеханики» фирмы «Арчелик» (Турция). Из рабочих характеристик (рис. 1,2), построенных по результатам экспериментальных исследований, видно, что новый двухскоростной двигатель AGM100L6/8 со стороны $p_1=3$ (рис.1) может развить мощность $P_2=1200$ Вт при $\eta=76,9\%$, $\cos\varphi=0,722$, $I_1=3,7$ А, $n=958$ об/мин, а со стороны $p_2=4$ (рис.2) может развить мощность $P_2=1000$ Вт при $\eta=72,8\%$, $\cos\varphi=0,7$, $I_1=3,74$ А, $n=708$ об/мин.

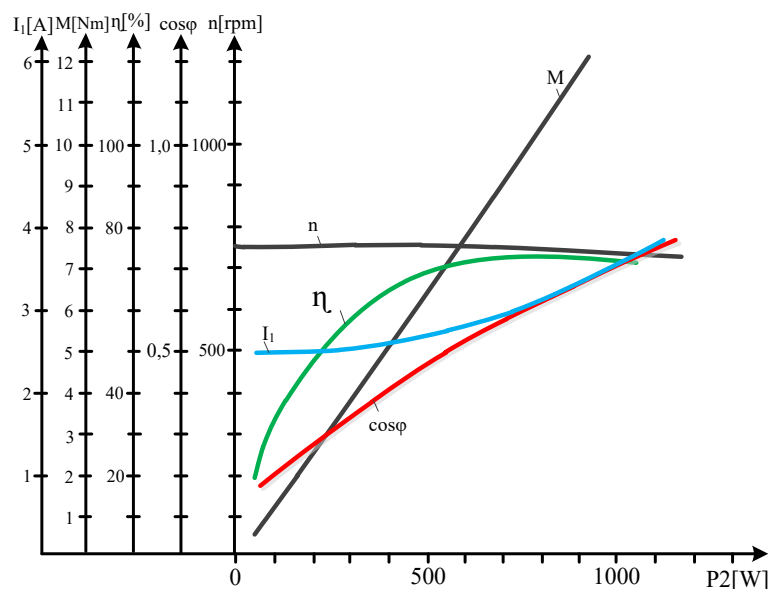


Рис.2. Рабочие характеристики двухскоростного двигателя типа AGM100L6/8 со стороны $p_2=4$

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают, что новый двухскоростной двигатель с использованием разработанной обмотки отвечает требованиям, предъявляемым к электроприводам турбомеханизмов и может получить возможность широкого внедрения для приводов турбомеханизмов взамен односкоростных двигателей в целях энерго- и ресурсосбережения.

Источники

1. 4E Electric Motor Systems Annex (EMSA). Policy Guidelines for Motor Driven Units – Part 2, 2018.
2. Rismuxamedov D., Tuychiev F., Rismuxamedov S. Pole-changing windings for turbomechanism engines // conmechhydro – 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012140, IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/883/1/012140.
3. M.Bobojanov, D.Rismuxamedov, F.Tuychiev, Kh.Shamsutdinov and Kh.Magdiev. Pole-changing motor for lift installation // E3S Web of Conferences 216,
4. Reeves E.A., Heathcote M. Newnes Electrical Pocket Book, the 23rd edition, Great Britain, 2003. - 498 p.
5. Ванурин В.Н. Статорные обмотки асинхронных электрических машин: Учебное пособие. - 2-е изд., испр. и доп.- СПб.: Издательство «Лань», 2016. - 224 с.: ил.

6. Broadway A.R.W. and Ismail K.S., Phase modulated 3-phase pole changing windings/ in *ibid.*, 1986. -vol. 133, P.61–70.

7. Alwash J.H.H., Ismail K.S., Eastham J.F. A Novel 16/6 Phase Modulated Winding // *IEEE transactions on energy conversion*, 2000. -vol. 15. -No. 2. -P.188-190.

8. Каримов. Х.Г., Тупогуз Ю.А. Метод построения электрически совмещенных обмоток переменного тока // *Электричество*. – Москва, 1987. - №9. – С. 29-38.

9. Каримов Х.Г., Бобожанов М.К. Методы построения обмоток для многоскоростных электрических машин. Ташкент, Издательство «Fan va texnologiya», 2010, - 170 с.

10. Бобожанов М.К. Электрические машины с полюсопереключаемыми обмотками, используемые в целях энерго-и ресурсосбережение.: Дис. ... д-ра. техн. наук.- Ташкент, 2006,- 243 с.

11. Рисмухамедов Д.А., Каримов Х.Г., Мавлонов Ж.М., Тўйчиев Ф.Н. Полюсопереключаемая обмотка для двухскоростной электрической машины Агентство по интеллектуальной собственности РесУз. Патент на изобретение IAP 05385, 23.03.2017.

12. Бобожанов М.К. Электрические машины с полюсопереключаемыми обмотками, используемые в целях энерго- и ресурсосбережения. / Под редакцией проф.Х.Г.Каримова. «Фан ва технологиялар марказининг босмахонаси», - Ташкент, 2012. - 179 с.

13. Рисмухамедов Д.А. Полюсопереключаемые асинхронные двигатели для турбомеханизмов Дисс. ...канд.техн. наук. - Ташкент, 2006. -225 с.

14. Попов В.И. Новые схемы трехфазных обмоток электрических машин с улучшенными электромагнитными свойствами: Монография. - Н.Новгород: ВГИПИ, 1998. – 116 с.

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ НАВЫКИ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ CASE-IN: ВЛИЯНИЕ СОРЕВНОВАНИЙ НА КАРЬЕРНОЕ РАЗВИТИЕ

Шестопалова К.Н.¹, Сумбаева Е.С.², Сердюкова Е.В.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск, Россия

¹kristina.shestopalova.04@list.ru, ²suelser@yandex.ru

В статье рассматривается влияние инженерных соревнований, таких как чемпионат CASE-IN, на развитие профессиональных навыков и карьерное развитие участников. Анализируются ключевые аспекты, такие как формирование hard и soft skills, повышение конкурентоспособности на рынке труда, а также роль командной работы и решения реальных кейсов в профессиональном становлении молодых специалистов.

Ключевые слова: CASE-IN, карьера, профессиональные навыки, метод кейсов.

PROFESSIONAL SKILLS THROUGH THE LENS OF CASE-IN: THE IMPACT OF COMPETITION ON CAREER DEVELOPMENT

Shestopalova K.N.¹, Sumbaeva E.S.², Serdyukova E.V.³

^{1,2,3} INRTU, Irkutsk, Russia

¹kristina.shestopalova.04@list.ru, ²suelser@yandex.ru

The article examines the impact of engineering competitions such as the CASE-IN Championship on the development of professional skills and career development of participants. Key aspects such as the formation of hard and soft skills, increasing competitiveness in the labor market, as well as the role of teamwork and solving real cases in the professional development of young professionals are analyzed.

Keywords: CASE-IN, career, professional skills, case study method.

Современный рынок труда предъявляет высокие требования к профессиональным компетенциям специалистов, особенно в технических и инженерных областях. Одним из эффективных инструментов развития навыков являются профессиональные соревнования, такие как международный инженерный чемпионат CASE-IN. Данное мероприятие позволяет участникам применить теоретические знания на практике и способствует формированию ключевых компетенций, необходимых для успешной карьеры. В статье [4] акцентируется внимание на кейс-технологии, как методе обучения, способствующего развивать профессиональные компетенции у студентов через практическое применение, но не учтена

значимость данных навыков для работодателей. В данной статье исследуется влияние участия в CASE-IN на профессиональное развитие молодых специалистов. Такие специалисты очень высоко ценятся на рынке труда, способны добиваться высоких результатов по карьерной лестнице. В рамках учебного заведения студенты не всегда получают необходимые профессиональные и социальные навыки. Чаще всего это происходит только во время прохождения производственной практики. В связи с этим, актуальность получения профессиональных компетенций очень важна. Появляется необходимость внедрения наиболее эффективных методов обучения. Одним из таких видов обучения является кейс-технология.

Целью исследования является изучение вопроса влияния участия в соревнованиях по решению кейсов на развитие профессиональных навыков и карьерные перспективы участников. Анализ основных компетенций, которые развиваются в процессе подготовки и участия в CASE-IN.

Анализ компетенций кейс-технологии. В настоящее время наблюдается прогресс в технологическом развитии электроэнергетики. Это является предпосылкой того, что специалист должен уметь быстро ориентироваться в каких-либо нововведениях, находить нужную информацию и способы решения технических и ситуационных задач в коллективе. Но, к сожалению, далеко не все могут обладать этими навыками, а для работодателя очень важно их наличие, что подтверждается статистическими источниками данных: только 12% работодателей уверены, что решающую роль играют профессиональные навыки. Столько же HR-специалистов (12%) вообще не рассматривают *soft skills* в резюме соискателя. Для большинства работодателей (76%) мягкие навыки соискателя — значимый повод для его рассмотрения на вакансию, даже если профессиональные умения и опыт не дотягивают до требований компании. Три четверти работодателей (75% опрошенных) готовы запланировать для соискателей с подходящими мягкими навыками дополнительное обучение, чтобы профессиональные знания полностью соответствовали задачам компании.

Мягкие навыки оказались при выборе сотрудника более значимым фактором, чем опыт работы: его при выборе сотрудника оценивают 52% специалистов. Для почти трети опрошенных специалистов по подбору кадров (28%) важны наличие высшего образования, стажировок и дополнительного обучения у соискателя.

Наиболее важными мягкими навыками HR-специалисты считают устойчивость, гибкость и быструю адаптацию к новым условиям (52%). Приоритет отдается кандидатам, которые обладают аналитическим мышлением, любознательностью и готовностью учиться на протяжении всей

жизни — такие критерии отметили 44% опрошенных. Также работодателям важны эмпатия и умение активно слушать, указали 36% рекрутеров. Почти треть работодателей (28%) считают важными креативное мышление, мотивацию и самосознание. А вот на управленческие навыки и лидерские качества обращают внимание только 8% работодателей [3, 4].

Чемпионат CASE-IN предоставляет студентам уникальную возможность развить и отточить эти навыки в условиях, максимально приближенных к реальным бизнес-задачам [5, 6]. В процессе решения необходимо не только проанализировать информацию, но и принять решение в зависимости от мнения всех участников и умение не стандартно мыслить, что является весьма ценными навыками.

Кейс-метод – это педагогическая технология проблемно-ситуационного типа, которая предполагает использование в процессе обучения реальных или близких к ним ситуаций экономического, производственного, управленческого характера с дальнейшим анализом и принятием обоснованных решений. В общем виде его сущностью является определение и решение важных реальных проблем в ситуациях неопределенности, не имеющих однозначного правильного решения. Его результатом является не только получение знания, но и практические умения и навыки [1, 2].

Международный инженерный чемпионат «CASE-IN» нацелен на популяризацию инженерно-технического образования и привлечение перспективных молодых специалистов в топливно-энергетический (ТЭК) и минерально-сырьевой комплексы (МСК).

Чемпионат CASE-IN оказывает многостороннее влияние на развитие профессиональных навыков участников. Для систематизации влияния участия в чемпионате на профессиональное развитие участников, выделены две ключевые группы навыков: hard skills (профессиональные знания и умения) и soft skills (личностные качества и компетенции). В таблицах 1 и 2 представлен детальный анализ этих аспектов, демонстрирующий, как решение реальных кейсов способствует формированию критически важных для карьеры компетенций.

Таблица 1

Развитие Hard Skills (Профессиональные знания и умения)

Применение теоретических знаний на практике	
CASE-IN предоставляет возможность применить полученные в университете теоретические знания для решения реальных производственных и бизнес-задач.	Студенты сталкиваются с необходимостью: - анализировать сложные проблемы, - разрабатывать технические решения и оценивать их экономическую эффективность

	Это укрепляет понимание студентами их профессиональных концепций.
Углубление знаний в конкретной области	
Подготовка к чемпионату часто требует углубленного изучения конкретной отрасли или технологии.	Участники вынуждены: - самостоятельно изучать новые материалы, - анализировать нормативные документы - проводить исследования рынка Это расширяет их профессиональный кругозор.
Освоение специализированного программного обеспечения	
В процессе решения кейсов участники могут столкнуться с необходимостью использования специализированного программного обеспечения для моделирования, анализа данных или проектирования.	Это дает им практический опыт работы с современными инструментами, используемыми в отрасли.
Формирование системного мышления	
Решение кейсов требует от участников рассмотрения проблемы в комплексе, учитывая взаимосвязь различных факторов и аспектов.	Это способствует формированию системного мышления, необходимого для принятия эффективных управленческих решений.

Таблица 2

Развитие Soft Skills (Личностные качества и умения)

Работа в команде	
CASE-IN - это командное соревнование Участники вынуждены: - Учиться эффективно взаимодействовать с друг другом; - распределять роли; - координировать усилия и - разрешать конфликты.	Это развивает навыки командной работы, необходимые для успешной деятельности в любой организации.
Коммуникативные навыки	
Участники должны уметь: - четко и аргументированно излагать свои мысли; - убеждать других в правильности своих решений; - представлять результаты своей работы перед экспертной комиссией.	Это развивает их коммуникативные навыки, необходимые для эффективного общения с коллегами, партнерами и клиентами.
Критическое мышление и аналитические навыки	
Решение кейсов требует от участников: - умения анализировать большие объемы информации; - выявлять ключевые проблемы; - оценивать различные варианты	Это развивает их критическое мышление и аналитические навыки, необходимые для принятия обоснованных решений.

решений и выбирать наиболее оптимальный.	
Умение работать в условиях неопределенности и стресса	
CASE-IN проходит в условиях ограниченного времени и высокой конкуренции, что требует от участников: - умения сохранять спокойствие; - быстро адаптироваться к меняющимся обстоятельствам; - принимать решения в стрессовых ситуациях.	Это развивает их стрессоустойчивость и умение работать в условиях неопределенности, которые часто встречаются в реальной работе.
Лидерские качества	
В процессе подготовки и участия в чемпионате участники могут: - проявлять лидерские качества, - брать на себя ответственность за принятие решений, - мотивировать других членов команды - координировать их усилия	Это развивает их лидерские качества, необходимые для управления проектами и командами
Тайм-менеджмент	
Решение кейса производится в рамках ограниченных сроков	Ограниченные сроки на решение кейсов учат участников эффективно планировать свое время, расставлять приоритеты и организовывать свою работу.
Креативность и инновационное мышление	
В кейсах применяется поиск нестандартных и эффективных решений.	Это стимулирует развитие креативности и инновационного мышления.

В заключение можно сказать, что CASE-IN оказывает комплексное положительное влияние на развитие профессиональных навыков участников, способствуя их успешной карьере и личностному росту. Это эффективная платформа для подготовки будущих лидеров отрасли, обладающих необходимыми знаниями, умениями и качествами для решения сложных задач и достижения высоких результатов.

Источники

1. Уколова, Е.В. Применение метода кейса в энергетике в рамках чемпионата "Case-in" / Е.В. Уколова, Е.В. Уколова, Д.Н. Ефимов// Инновационное развитие общества: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Иркутск, 02 декабря 2016 года. – Иркутск: Общество с ограниченной ответственностью «Научное партнерство «Апекс»», 2016. – С. 71-76.

2. Зацаринная, Ю. Н. Тренинговые технологии как эффективное средство подготовки инженеров нового видения / Ю.Н. Зацаринная, М.О. Григорьева // Новое видение современного инженера: интерактивные

образовательные процессы и кейс-методология: Материалы конференции в рамках X Юбилейной международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019/

3. Логачева, А.Г. Влияние кейс-технологии на формирование профессиональных компетенций студентов энергетического вуза / А.Г. Логачева, Ю.Н. Зацаринная // Метод инженерных кейсов: достижения и вызовы будущего : сборник тезисов по итогам научно-образовательной конференции, Томск, 26–27 ноября 2019 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2019. – С. 64-67.

4. Логачева, А. Г. Дидактический потенциал кейс-метода в учебном процессе ВУЗа / А. Г. Логачева, Ю.Н. Зацаринная, Е.С. Мухлина // Новое видение современного инженера: интерактивные образовательные процессы и кейс-методология: Материалы конференции в рамках X Юбилейной международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи», Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 83-87

5. CASE-IN Симулятор. URL: <https://casesim.ru/> (дата обращения 26.03.2025).

6. Официальный сайт CASE-IN. URL: <https://case-in.ru/ru/> (дата обращения 26.03.2025).

АНАЛИЗ УЧАСТИЯ СТУДЕНТОВ В CASE-IN В ЛИГЕ ПО ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Шестопалова К.Н.¹, Сумбаева Е.С.², Сердюкова Е.В.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск, Россия

¹kristina.shestopalova.04@list.ru, ²suelser@yandex.ru, ³serdyukovaev@ex.istu.edu

В статье анализируется процентное соотношение участников разных вузов в чемпионате CASE-IN за период 2023-2025 годов, выявляются возможные причины отказов от участия команд в защите проектов. Приводятся рекомендации для увеличения популярности CASE-IN среди студентов.

Ключевые слова: CASE-IN, карьера, профессиональные навыки, метод кейсов.

ANALYSIS OF STUDENT PARTICIPATION IN CASE-IN IN THE LEAGUE OF ELECTRIC POWER ENGINEERING

Shestopalova K.N.¹, Sumbaeva E.S.², Serdyukova E.V.³

^{1,2,3} INRTU, Irkutsk, Russia

¹kristina.shestopalova.04@list.ru, ²suelser@yandex.ru

The article analyzes the percentage of participants from different universities in the CASE-IN championship for the period 2023-2025, identifies possible reasons for the refusal of teams to participate in the protection of projects. Recommendations are given to increase the popularity of CASE-IN among students.

Keywords: CASE-IN, career, professional skills, case study method.

На основании приведенной информации о влиянии CASE-IN на развитие профессиональных навыков участников в статье «Профессиональные навыки через призму CASE-IN: влияние соревнований на карьерное развитие» было принято решение провести анализ статистических данных участия студентов в CASE-IN по электроэнергетике за 2023-2025 годы в ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» [1, 2]. Динамика участия студентов разных курсов (Рис. 1-2) позволяет выявить ключевые тенденции. Например, снижение активности студентов 4 курса в 2024 году коррелирует с периодом подготовки выпускных работ, что требует оптимизации сроков проведения чемпионата.

1. Количество команд в процентном соотношении и обучающиеся каких курсов принимают участие:

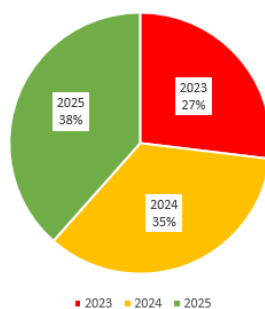


Рис.1. Динамика количества команд

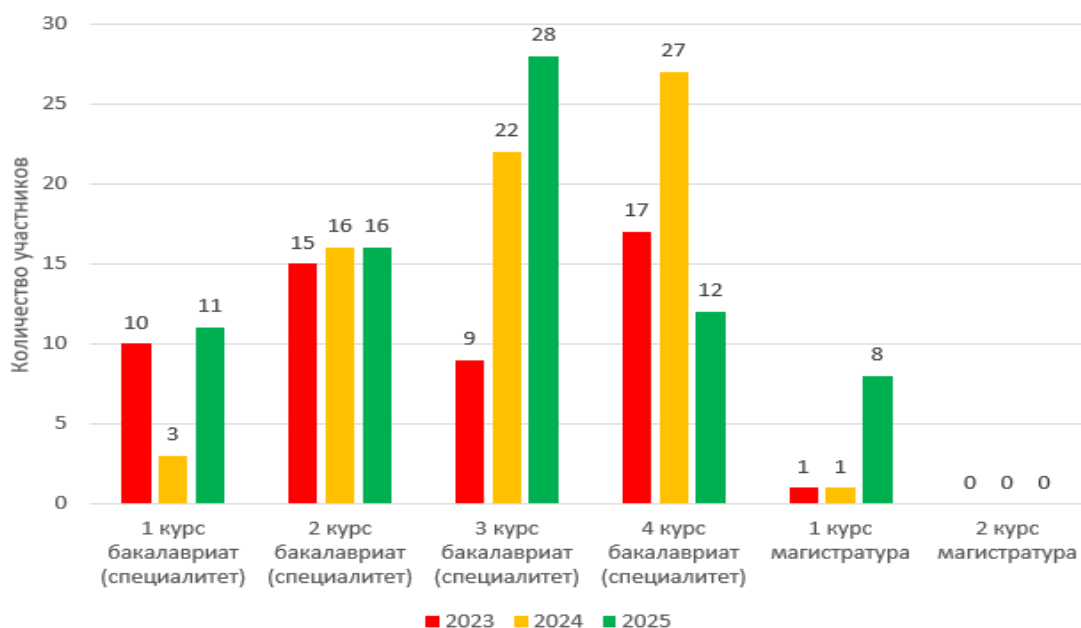


Рис. 2. Количество участников разных курсов

Анализ данных за 2023–2025 гг. (Рис. 1-2) выявил устойчивый рост числа участников из ИРНITU, что свидетельствует о возрастающей популярности CASE-IN. Однако снижение активности студентов 1 курса в 2024 году требует дополнительного изучения факторов, влияющих на их вовлеченность. Стабильное участие в CASE-IN студентов 2 курса на протяжении 3-х лет говорит о достаточной адаптивности к процессу обучения и наличием приемлемой базы знаний; 4 курс участвует нестабильно, с наибольшей вероятностью это связано с работой над выпускной квалификационной работой. Студенты магистратуры принимают не такое активное участие в связи с тем, что многие из них работают, и совмещают учебу с работой. Так же процесс обучения в магистратуре короче, поэтому время студенты распределяют только на образовательный процесс, но тем не менее в 2025 году студенты 1 курса магистратуры проявили активное участие в CASE-IN в сравнении с предшествующими годами и как

показывает практика чаще всего студенты именно магистратуры становятся победителями и призерами.

Также на рис.3 представлена статистика по количеству участников разных университетов, которые также участвуют в отборочном этапе чемпионата на базе ИРНИТУ.

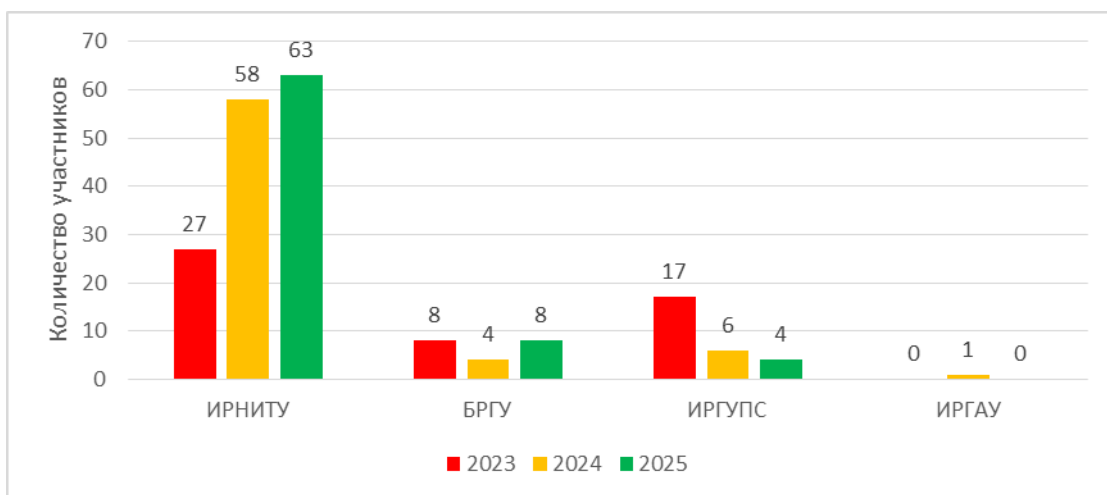


Рис. 3. Количество участников разных университетов

На основании данной статистики наблюдается значительный рост участников ИРНИТУ на протяжении 3 лет. В БрГУ количество участников в 2024 году снизилось в 2 раза, но в 2025 году повысилось до исходного уровня. В ИРГУПС с каждым годом количество участников значительно снижается; в ИРГАУ в 2024 году участие принял 1 человек. Исходя из данных результатов можно сделать вывод, что CASE-IN обретает популярность не только в ИРНИТУ, но и среди студентов других вузов путем их привлечения к участию. Особенно заинтересованы вузы, в которые являются профильными в электроснабжении.

Далее предлагается рассмотреть процентное соотношение участников, принявших и не принявших участие в защите кейса (Рис.4.).



Рис. 4. Участники, принявшие и не принявшие участие в защите

Высокий процент отказов от защиты проектов (Рис. 4) указывает на необходимость снижения барьеров для участников.

Основными причинами отказа от участия в защите проектов чемпионата CASE-IN являются разные причины. Анализ показывает, что ключевыми барьерами выступают высокая сложность предлагаемых кейсов, ограниченные сроки их выполнения, а также чрезмерная учебная нагрузка, препятствующая качественной подготовке проекта. Кроме того, часть студентов демонстрирует низкий уровень мотивации, что связано как с недостаточной осведомленностью о преимуществах участия, так и с отсутствием личной заинтересованности в решении инженерно-практических задач. Эти факторы требуют системного подхода для минимизации их влияния на вовлеченность участников.

Для минимизации количества отказывающихся от участия в защите проектов предлагаем следующие рекомендации:

1. Мотивация повышенной стипендией;
2. Составление сборных команд из разных курсов и направлений, включая, например, студентов экономического факультета и технического;
3. Информирование студентов о приоритетном праве поступления в магистратуру и о возможности улучшить свои технические знания;
4. Простая и удобная регистрация в CASE-IN Симулятор;
5. Проведение интерактивов с возможностью погружения в реальную среду CASE-IN во время учебных занятий.

Результаты анализа показывают, что рост популярности CASE-IN среди студентов ИРНИТУ связан с активной информационной поддержкой и интеграцией чемпионата в учебный процесс. Для расширения географии участников целесообразно организовать межвузовские мастер-классы и привлечь компании ТЭК в качестве партнеров, что повысит престиж мероприятия.

Придерживаясь вышеизложенных рекомендаций, можно увеличить популярность чемпионата среди большего количества студентов.

Источники

1. CASE-IN Симулятор. URL: <https://casesim.ru/> (дата обращения 29.03.2025).
2. Официальный сайт CASE-IN. URL: <https://case-in.ru/ru/> (дата обращения 29.03.2025).

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ДОСТУПА НА ПОДСТАНЦИИ

Шукшина Е.В.¹, Руткаускас Т.К.²

^{1,2} ПАО «Россети Урал», г. Екатеринбург, Россия

В статье предложен анализ внедрения автоматизированной системы учета и выдачи ключей от электроустановок и контроля доступа на объекты, интегрированной с системой управления производственными активами, с применением электронного ключа и электронной подписи. Приведены экономические параметры внедрения ключей в работу предприятия.

Ключевые слова: ремонтные бригады, автоматизация, ключ, электроустановки, контроль.

SUBSTATION MANAGEMENT AND ACCESS CONTROL SYSTEM

Shukshina E. V.¹, Rutkauskas T.K.²

^{1,2} PJSC «ROSSETI URAL», Ekaterinburg, Russia

The article provides an analysis of the implementation of an automated system for accounting and issuing keys to electrical installations and access control to facilities, integrated with the production asset management system, using an electronic key and an electronic signature. A feasibility study on the payback of using keys at the enterprise is given.

Keywords: repair crews, automation, key, electrical installations, control.

Разработка системы контроля и управления доступом на подстанции, отвечающей отраслевым регламентам и требованиям с помощью электронных ключей, цифровой подписи сотрудников и созданием электронной версии журнала учета и выдачи ключей от электроустановок является одним из ключевых инструментов для сокращения несчастных случаев, количества нарушений техники безопасности и повышения уровня производительности труда на предприятии энергетической отрасли [1]. Система позволяет контролировать доступ на объекты электроустановок и предотвращать ошибочные или намеренные действия сотрудников и иных физических лиц, приводящие к внеплановому отключению электроустановок. Помимо этого, система позволяет автоматизировать процессы получения доступа на объекты электроустановок, в том числе сократить длительность данных процессов [2]. Ремонтные бригады в начале рабочего дня должны

инициировать получение электронных ключей от электроустановок согласно перечню объектов и технических мест из разрешающих документов для данной бригады. Эмиссия ключей по утвержденному перечню работ (и, соответственно, объектам) происходит автоматически без участия человека [3]. По прибытию на место проведения работ электронные ключи хранятся в приложении на мобильном планшете и доступны для открытия двери в оффлайн режиме. В процессе работы, при необходимости доступа на объект, мастер оперативно-выездной бригады должен создать и согласовать заявку на выполнение работ в приложении после чего окажется доступным кнопка открытия двери в соответствии с созданной заявкой на работы.

Тем самым система позволит автоматизировать процессы фиксации факта выдачи и аннулирования доступа на объекты электроустановок, а также частично автоматизировать собираемую отчетность по факту внеплановых отключений.

Капитальные затраты включают в себя набор оборудования для автоматизированной системы учета и выдачи ключей от электроустановок и контроля доступа на объекты. В операционные расходы вошли затраты на обучение персонала.

Основными эффектами от применения системы являются:

1. Снижение количества случаев внеплановых отключений оборудования
2. Снижение количества случаев выхода электротехнического оборудования из строя
3. Снижение времени выполнения работ на электроустановках
4. Экономия на персонале диспетчеризации с помощью автоматизации системы

Помимо вышесказанного, отложенным эффектом может стать расширение внедрения автоматизированной системы на прочий функционал. Так, автоматизированным может стать доступ в служебные помещения. Сотрудник использует карту для входа в определенные зоны подстанции. Система регистрирует событие и передает данные на центральный сервер. При возникновении аварийных ситуаций система автоматически открывает все двери для эвакуации.

Внедрение системы позволит повысить уровень безопасности, предотвратить несанкционированный доступ и защитит от внешних угроз, произведет точное отслеживание времени прихода и ухода сотрудников, а также их перемещений по подстанции, минимизирует человеческий фактор при выполнении работ, уменьшит необходимость в ручном контроле и учете.

Источники

1. Аникеев Д. В. Системы контроля и управления доступом: принципы построения и применения//Информационная безопасность объектов электроэнергетики.2020. С.24.
2. Семенов П. Н., Ковалев, И. В. Методы контроля доступа на подстанциях// Энергетика и автоматизация.2019. №2. С. 45-50.
3. Тимофеев С. С. Безопасность объекта и управление доступом на подстанциях высокого напряжения// Научные исследования и разработки. 2023. 280 С.

СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ: ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ

Юсупов Р.А.¹, Вахнина В.В.²

^{1,2} ТГУ, г. Тольятти, Россия

Ren245@yandex.ru

В данной статье проводится комплексный анализ воздействия солнечной радиации на рабочие характеристики силовых трансформаторов. Исследуются физические основы тепловых процессов, возникающих под влиянием солнечного излучения, и их влияние на нагрузочную способность трансформаторов. Особое внимание уделяется взаимосвязи между солнечной активностью, температурными режимами трансформатора и старением изоляционных материалов. В работе систематизированы современные методы защиты, включая как пассивные способы терморегулирования, так и активные системы компенсации тепловых нагрузок.

Ключевые слова: силовой трансформатор, солнечная радиация, надежность, материал, температура, излучение.

SOLAR RADIATION: IMPACT ON THE OPERATION OF POWER TRANSFORMERS AND MODERN PROTECTION METHODS

Yusupov R. A.¹, Vakhnia V. V.²

^{1,2} TSU, Togliatti, Russia.

Ren245@yandex.ru

This article provides a comprehensive analysis of the effects of solar radiation on the performance of power transformers. The physical foundations of the thermal processes that occur under the influence of solar radiation and their effect on the load capacity of transformers are investigated. Special attention is paid to the relationship between solar activity, transformer temperature conditions and aging of insulating materials. The work systematizes modern methods of protection, including both passive methods of thermal regulation and active systems of compensation of thermal loads.

Keywords: power transformer, solar radiation, reliability, material, temperature, radiation.

Трансформаторы – неотъемлемая часть электроэнергетической инфраструктуры, и их надёжность и техническое состояние играют решающую роль в обеспечении бесперебойного функционирования и безопасности всей системы электроснабжения. Одним из ключевых параметров, определяющих

работоспособность трансформаторов, является их рабочая температура. Любые отклонения от нормальных значений могут привести к серьёзным повреждениям изоляции, что сократит срок службы оборудования.

Основными факторами, влияющих на тепловой режим силовых трансформаторов являются [1]:

- 1) Конструкция трансформатора: количество и расположение обмоток, тип магнитопровода;
- 2) Материал и толщина изоляции: бумажно-масляная, литая, волокнистая;
- 3) Форма и размеры бака: высота, ширина, глубина;
- 4) Способ охлаждения: естественное или принудительное;
- 5) Режим работы трансформатора: продолжительность включения, длительность и частота циклов нагрузки;
- 6) Состояние системы охлаждения: эффективность работы вентиляторов, насосов, радиаторов;
- 7) Качество масла: чистота, влажность, кислотность;
- 8) Условия эксплуатации: температура окружающей среды, влажность, вентиляция помещения.

Помимо этого, на работу силового трансформатора оказывает влияние внешняя среда, в частности солнечная радиация. В летнее время уровень солнечной радиации в центральной части России может достигать до 1350 Вт/м^2 [2]. Кроме того, в этот период возрастает нагрузка на энергосистему из-за использования кондиционеров и холодильных установок. Солнечная радиация воздействует на металлические объекты, в том числе на бак силового трансформатора, что приводит к его нагреву и, как следствие, повышению температуры его активной части. Это может привести к сокращению срока службы изоляции, особенно бумажной изоляции обмоток трансформаторов [3].

Солнечная радиация воздействует на силовые трансформаторы как напрямую, так и косвенно, изменяя их тепловой режим. Прямое попадание солнечных лучей вызывает нагрев металлических элементов конструкции – бака, радиаторов и токоведущих частей, что приводит к росту их температуры. Этот нагрев передается внутренним компонентам трансформатора, включая обмотки и магнитопровод, ускоряя старение изоляционных материалов и сокращая срок службы оборудования. Повышение температуры окружающей среды дополнительно ухудшает теплоотвод, что особенно критично для масляных трансформаторов, где перегрев масла снижает его диэлектрические свойства. В свою очередь, это проявляется увеличением омического сопротивления обмоток и ростом потерь мощности, а в сухих трансформаторах еще может провоцировать частичные разряды и пробой изоляции. Косвенные эффекты включают тепловое расширение металлов, ведущее к механическим

напряжениям, и ускоренную деградацию уплотнений, повышающую риск утечек масла.

Защита трансформаторов от негативного воздействия солнечной радиации требует применения различных методов, таких как установка защитных экранов, использование специальных покрытий и оптимизация системы охлаждения. Регулярное техническое обслуживание и мониторинг состояния трансформаторов также необходимы для своевременного выявления проблем и принятия мер по их устранению.

Для предотвращения ускоренного износа трансформаторов из-за воздействия солнечной радиации необходимо принимать меры по защите оборудования. Одним из способов является снижение нагрузки на трансформаторы или увеличение их холодопроизводительности. Это позволит уменьшить нагрев трансформаторов и продлить их срок службы.

Кроме того, важно учитывать внутренние источники тепла, такие как потери меди и железа, которые также вносят вклад в нагрев трансформаторов [4]. Поэтому для обеспечения надёжной работы трансформаторов в условиях воздействия солнечной радиации необходимо комбинировать различные методы защиты и регулярно проводить техническое обслуживание оборудования.

Основной нагрев трансформатора происходит за счёт тепловыделения в обмотках при прохождении электрического тока, которые обусловлены нагрузочными потерями:

$$P_{LL} = I^2 \cdot R_w,$$

где I - ток нагрузки; R_w - активное сопротивление обмотки при рабочей температуре.

В свою очередь сопротивление обмоток рассчитывается по следующей формуле:

$$R_w(T) = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (\theta_{hs}(t) - 20)], \quad (2)$$

где α_{Cu} - 0.004 K^{-1} , температурный коэффициент меди; $\theta_{hs}(t)$ - температура масла в верхней части бака (наиболее нагретой точки).

Лучи солнца напрямую нагревают внешние поверхности бака через тепловое излучение, создавая дополнительную тепловую нагрузку. Это тепло передаётся внутрь через стенки бака, нагревая минеральное масло, которое затем распределяет его по системе за счёт конвекции. Одновременно тепло от обмоток через твердую изоляцию также поступает в масло. В результате комбинированного воздействия внутренних и внешних источников тепла, вся энергия в конечном итоге рассеивается в окружающую среду: через излучение от поверхности трансформатора и конвекцию воздуха вокруг него.

Воздействие солнечной радиации на увеличение температуры трансформатора, способствующий повышению температуры масла в верхней

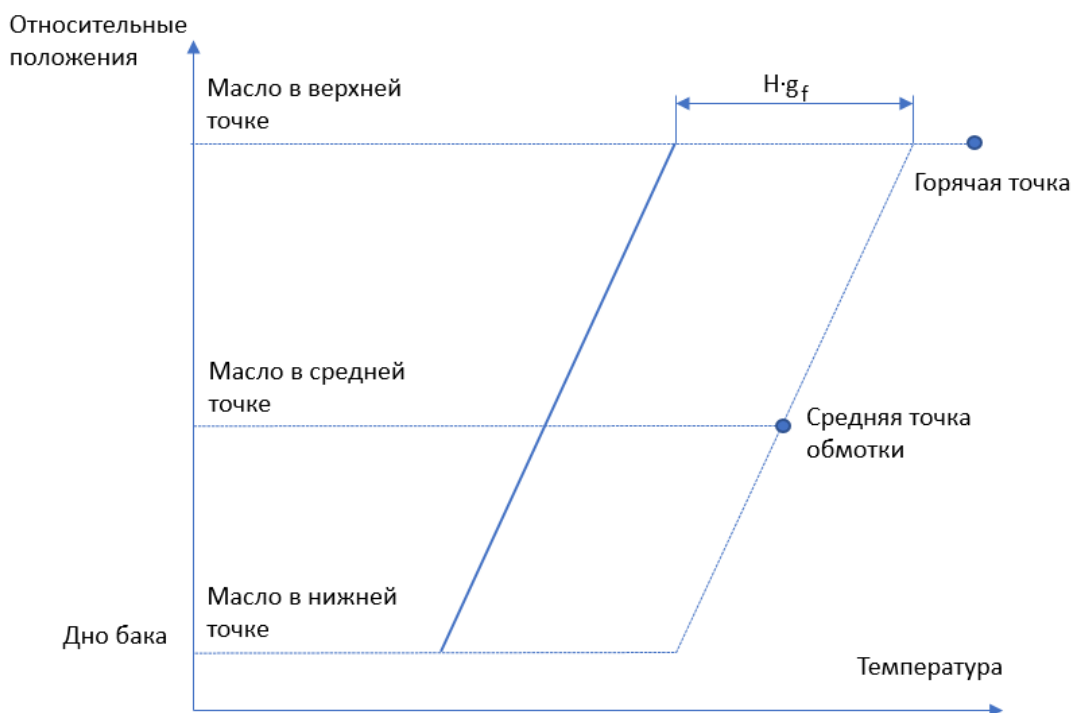
части бака (в горячей точке $\theta_{hs}(t)$ трансформатора), представлено следующим уравнением [3]:

$$\theta_{hs}(t) = \theta_a(t) + \Delta\theta_{or} \cdot \left(\frac{1+R \cdot K(t)^2}{1+R} + \frac{P_{sun}(t)}{P_{LL}+P_{NL}} \right)^x + \Delta\theta_{hr} \cdot K(t)^y \quad (3)$$

где θ_a - температура окружающей среды в момент времени t ; $\Delta\theta_{or}$ - повышение температуры верхнего слоя почвы (в резервуаре) в установившемся режиме при номинальных потерях (потерях холостого хода и потерях под нагрузкой); R - коэффициент потерь (соотношение между потерями под нагрузкой P_{LL} и потерями без нагрузки P_{NL}); $K(t)$ - коэффициент соотношения между током нагрузки в момент времени t и номинальным током; x - показатель масла; y - показатель обмотки; $\Delta\theta_{hr}$ - перепад температуры от верхней точки масла (в баке) при номинальном токе; P_{sun} - это солнечная энергия в момент времени t .

Тепловая диаграмма на иллюстрирует распределение температуры в обмотке трансформатора и масле внутри бака (см. рисунок). Согласно данной модели, температура масла равномерно увеличивается от дна к верхней части бака – независимо от режима охлаждения. При этом нагрев проводника в любой точке обмотки происходит линейно, следуя за температурой масла, но с постоянным отрывом $\Delta\theta$ (разницей между средней температурой обмотки и средней температурой масла).

Во время переходных процессов (например, при изменении нагрузки или температуры окружающей среды) температура верхнего слоя масла и "горячей точки" обмотки меняется мгновенно, без временной задержки.



Тепловая схема в соответствии с распределением температуры по высоте обмотки.

Солнечное излучение, попадающее на поверхность трансформатора, является переменным параметром. Оно меняется в течение дня и времени года и зависит от угла α солнечного излучения относительно поверхности [3]:

$$P_{sun}(t) = c \cdot A_{tr} \cdot IR(t),$$

где c - коэффициент излучения; A_{tr} - поверхность трансформатора, принимающая солнечное излучение, а $IR(t)$ (> 0) - солнечное излучение в момент времени t .

Очевидно, что следует учитывать такие факторы, как атмосферные условия или окружающая среда здания, которые могут отбрасывать тени в течение части дня, снижая уровень солнечного излучения, достигающего поверхности трансформатора. Предполагается, что трансформатор расположен на открытом пространстве с эффективной площадью, получающей солнечное тепло. Площадь A_{tr} рассчитывается как площадь верхней поверхности трансформатора (длина [м] x ширина [м]) и считается постоянной в зависимости от движения солнца по небу.

Из уравнений (1)-(4) получаем цепочку зависимостей:

Влияние солнечной радиации на температуру:

$$\theta_{hs}(t) = f(P_{sun}(t) = f(c \cdot A_{tr} \cdot IR(t))$$

Следовательно нагрузочные потери описываются следующим уравнением:

$$P_{LL} = I^2 \cdot R_{20} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (\theta_a(t) + \Delta\theta_{or} \cdot \left(\frac{1+R \cdot K(t)^2}{1+R} + \frac{f(c \cdot A_{tr} \cdot IR(t))}{P_{LL} + P_{NL}} \right)^x + \Delta\theta_{hr} \cdot K(t)^y - 20)]$$

Моделирование влияния солнечной радиации на работу силового трансформатора:

Ранее мною была создана математическая модель в программе MATLAB, которая учитывает пространственное распределение солнечного излучения по поверхности бака, теплообмен через стенки трансформатора и конвекцию в масле.

Пример расчета в MATLAB, учитывающий влияние солнечной радиации на нагрузочные потери трансформатора ниже:

% Параметры трансформатора

Sn = 1000e3; % Номинальная мощность (ВА)

Vn = 10e3; % Номинальное напряжение (В)

In = Sn/Vn; % Номинальный ток (А)

R20 = 0.05; % Сопротивление обмотки при 20°C (Ом)

alpha_Cu = 0.004; % Температурный коэффициент меди (K^-1)

P_NL = 2e3; % Потери холостого хода (Вт)

R = 5; % Коэффициент потерь (P_LL/P_NL)

% Параметры окружающей среды


```

theta_a = 30;    % Температура окружающей среды (°C)
IR = 1000;      % Интенсивность солнечного излучения (Вт/м2)
c = 0.8;        % Коэффициент излучения
A_tr = 5;       % Площадь поверхности (м2)
% Тепловые параметры
delta_theta_or = 55; % Перегрев масла при номинальных потерях (K)
delta_theta_hr = 25; % Перепад температуры обмотка-масло (K)
x = 0.8;        % Показатель масла
y = 1.6;        % Показатель обмотки
% Временные параметры
t = 0:24;       % Время моделирования (часы)
hours = length(t);
% Моделирование суточных изменений
I_load = In * (0.7 + 0.3*sin(2*pi*t/24)); % Профиль нагрузки
IR_var = IR * (0.5 + 0.5*max(0, sin(2*pi*(t-6)/24))); % Суточный профиль
солнечной радиации
% Инициализация массивов
P_LL = zeros(1, hours);
theta_hs = zeros(1, hours);
R_w = zeros(1, hours);
% Итерационный расчет
for i = 1:hours
    K = I_load(i)/In; % Коэффициент нагрузки
    % Расчет солнечной энергии (уравнение 4)
    P_sun = c * A_tr * IR_var(i);
    % Начальное приближение для P_LL
    P_LL_prev = (I_load(i))^2 * R20;
    % Итерационное уточнение (уравнение 7)
    for iter = 1:5
        theta_hs(i) = theta_a + delta_theta_or * ((1 + R*K^2)/(1 + R) + ...
            P_sun/(P_LL_prev + P_NL))^x + delta_theta_hr * K^y;
        R_w(i) = R20 * (1 + alpha_Cu * (theta_hs(i) - 20));
        P_LL(i) = (I_load(i))^2 * R_w(i);
        % Проверка сходимости
        if abs(P_LL(i) - P_LL_prev)/P_LL_prev < 0.001
            break;
        end
        P_LL_prev = P_LL(i);
    end
end
end

```

```

% Визуализация результатов
figure;
subplot(3,1,1);
plot(t, IR_var, 'LineWidth', 2);
title('Интенсивность солнечного излучения');
xlabel('Время (часы)');
ylabel('IR(t) (Вт/м2)');
grid on;
subplot(3,1,2);
plot(t, theta_hs, 'LineWidth', 2);
title('Температура в горячей точке');
xlabel('Время (часы)');
ylabel('\theta_{hs} (°C)');
grid on;
subplot(3,1,3);
plot(t, P_LL/1e3, 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(t, (I_load).^2 * R20 /1e3, '--', 'LineWidth', 2);
title('Нагрузочные потери');
xlabel('Время (часы)');
ylabel('P_{LL} (кВт)');
legend('С учетом солнечной радиации', 'Без учета солнечной радиации');
grid on;
% Расчет увеличения потерь
P_LL_no_sun = (I_load).^2 * R20;
increase = (P_LL - P_LL_no_sun)/P_LL_no_sun * 100;
fprintf('Максимальное увеличение потерь: %.15', max(increase));
fprintf('Минимальное увеличение потерь: %.5', min(increase));

```

Выполнив подстановку реальных значений, можно сделать следующий вывод: воздействие солнечной радиации приводит к дополнительному нагреву трансформатора. Это, в свою очередь, вызывает увеличение сопротивления обмоток и рост нагрузочных потерь на 5-15%, причем конечная величина зависит от двух основных факторов: интенсивности солнечного излучения и конструктивных особенностей трансформатора.

Механизмы защиты силовых трансформаторов от воздействия солнечной радиации:

Для уменьшения негативного влияния солнечного излучения на трансформаторы применяются следующие методы защиты [5]:

1. Экраны от солнца.

Одним из наиболее действенных методов для снижения температуры трансформатора является ограничение прямого солнечного света на его поверхность. Применяются специальные алюминиевые или композитные панели над трансформатором, создавая тень и снижая температуру поверхности на 10–15 °С. Также устанавливаются вентилируемые кожухи, которые не только защищают от солнечного воздействия, но и обеспечивают дополнительное охлаждение благодаря естественной циркуляции воздуха.

2. Нанесение отражающих термопокрытий.

На корпус трансформатора наносятся специальные краски с высоким уровнем отражения (альбедо $>0,8$). Современные составы с керамическими наполнителями не только отражают солнечные лучи, но и помогают улучшить рассеивание тепла. Этот подход может снизить дополнительный нагрев от солнца на 30–50%.

3. Корректировка графика нагрузки в часы пик

Пиковая солнечная активность наблюдается в середине дня, и если в это время трансформатор эксплуатируется под высокой нагрузкой, вероятность перегрева значительно возрастает [6]. Для этого необходимо реализовать ряд мероприятий:

3.1. Оптимизация режимов работы.

Снижение нагрузки на 5–10% в период максимальной солнечной инсоляции (с 11:00 до 15:00). Внедрение автоматизированных систем управления, которые будут учитывать погодные прогнозы и текущую температуру.

3.2. Установление дифференцированных норм для различных регионов.

В зонах с более чем 2500 солнечными часами в год вводятся специальные летние режимы нагрузки. Для старых трансформаторов (с возрастом более 15 лет) предельно допустимая нагрузка дополнительно уменьшается на 10–15%. В результате достигается снижение теплового стресса и продление срока службы изоляции.

4. Приоритетный контроль уровня полимеризации (DP) изоляции.

Солнечное тепло ускоряет разрушение целлюлозной изоляции, поэтому особое внимание уделяется трансформаторам, находящимся в зоне риска.

4.1. Группы с повышенным уровнем контроля.

Для трансформаторов, имеющих возраст более 15 лет, требуется проводить регулярные измерения DP не реже одного раза в год, а в жарких климатических зонах – каждые полгода [7]. Оборудование, функционирующее более 2500 солнечных часов в год, должно быть обеспечено непрерывным мониторингом с использованием:

- Встроенных термодатчиков, расположенных в "горячих точках".
- Оптоволоконных систем, применяемых для оценки состояния изоляции.

4.2. Оценка остаточного ресурса.

Если значение DP опускается ниже 400–500, принимаются меры для усиления системы охлаждения или снижения нагрузки, а также используются математические модели старения для прогнозирования времени выхода из строя изоляции. Это позволяет достигать своевременного выявления износа и предотвращения неожиданных отказов.

5. Внедрение дополнительных защитных мер, таких как: усовершенствование систем охлаждения (установка дополнительных радиаторов, организация принудительной вентиляции [8]), использование термостойких изоляционных веществ (нанокompозитная целлюлоза, улучшенные пропиточные смеси), а также регулярная очистка поверхностей от пыли и грязи, которые могут ухудшать теплоотдачу.

Таким образом, солнечная радиация оказывает существенное влияние на тепловой режим работы трансформатора и его энергетическую эффективность. Влияние солнечной радиации зависит от ориентации и положения трансформатора относительно солнца, количества и угла солнечного света, а также системы охлаждения трансформатора. Солнечное излучение может повысить температуру трансформатора, особенно для трансформаторов наружного применения в районах с высоким уровнем солнечного света. А это, в свою очередь, повлечет увеличение нагрузочных потерь силового трансформатора до 15%.

Для смягчения воздействия солнечной радиации на трансформаторы можно использовать светоотражающие материалы, тёмные поверхности с низким поглощением солнечной энергии и светлые поверхности с высокой отражательной способностью. Также можно применять затеняющие устройства, улучшать систему охлаждения трансформатора и использовать естественную вентиляцию или охлаждение с помощью ветра. Регулярный мониторинг и техническое обслуживание трансформаторов помогут выявить проблемы, связанные с температурой, и обеспечить их правильное функционирование.

Источники

1. Монтаж и эксплуатация оборудования систем электроснабжения: учебное пособие. – Санкт-Петербург: СЗТУ, 2004. - 184 с.

2. Влияние солнечной радиации на тепловой баланс силовых трансформаторов Power Engineering. URL: <http://www.power.eltehn.ru/pages/2222.html> (дата обращения: 01.03.2025).

3. Gorgan B. Influence of solar irradiation on power transformer thermal balance / B. Gorgan, P. V. Notingher, J. M. Wetzer [et al.] // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. - 2012. - Vol. 19, № 6. - P. 1843–1850.
4. Лизунов С. Д. Силовые трансформаторы: справочная книга / С. Д. Лизунов, А. К. Лоханин. -Москва: Энергоиздат, 2004. - 616 с.
5. Воздействие солнечной радиации на трансформаторы Scottech Electrical. URL: <http://ru.scotech-electrical.com/info/the-impact-of-solar-radiation-on-transformer-t-89841267.html> (дата обращения: 01.04.2025).
6. Солнечная активность и её влияние на технические устройства Подряд.ТВ. - URL: <https://podryad.tv/vladivostok/blog/kak-solnechnaia-aktivnost-vliiaet-na-tekhnicheskie-ustroistva-na-zemle> (дата обращения: 21.03.2025).
7. Инструкция по эксплуатации трансформаторов ОАО ФСК: СТО 56947007-29.180.01.048-2010. - Введ. 16.06.2010. - 45 с.
8. Системы охлаждения силовых трансформаторов. URL: <https://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1959-sistemy-okhlazhdenija-silovykh.html> (дата обращения: 21.03.2025).

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ: ПЕРВЫЕ ШАГИ В НАУКЕ

УДК: 519.876.5

ПРЕДПОСЫЛКИ И ОСНОВЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ РЭС

Абдуллин А.А.

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

abdullinamir5@mail.ru

В статье рассмотрены основы моделирования РЭС, которые требуют модернизации из-за устаревшей топологии, ведущей к авариям. Также уделено внимание способам повышения надежности, снижения потерь и оптимизации управления. Рассмотрена автокластерная конфигурация сети минимизирующая отключения, и обеспечивающая устойчивое электроснабжение.

Ключевые слова: РЭС, цифровизация, цифровой двойник, Smart Grid, автокластерная сеть.

PREREQUISITES AND FOUNDATIONS OF DIGITALIZATION OF THE GRID

Abdullin A.A.

KSPEU, Kazan, Russia

abdullinamir5@mail.ru

The article deals with the basics of modeling of RES, which require modernization due to outdated topology leading to accidents. Attention is also paid to ways of reliability improvement, loss reduction and control optimization. The autocluster configuration of the network minimizing outages and ensuring stable power supply is considered.

Keywords: RPS, digitalization, digital twin, Smart Grid, autocluster network.

Районы электрических сетей (РЭС) представляют собой важный элемент энергетической инфраструктуры, обеспечивающий надежное и эффективное распределение электроэнергии. Они служат связующим звеном между генерирующими мощностями и конечными потребителями, обеспечивая стабильное электроснабжение населенных пунктов, промышленных предприятий и социальных объектов.

В условиях стремительного прогресса технологий и растущей необходимости в эффективном управлении энергетическими ресурсами, цифровизация районов электрических сетей становится ключевым элементом

трансформации энергетического сектора. Введение цифровых решений, таких как интеллектуальные системы учета, автоматизированные системы управления и мониторинга позволяет существенно сократить потери электроэнергии, повысить эффективность реагирования на аварийные ситуации и улучшить взаимодействие с конечными потребителями [1].

Традиционная энергосеть преимущественна тем, что благодаря малому числу электростанций удается поддерживать баланс между производством и потреблением электроэнергии. Однако при нарушении баланса происходят значительные колебания частоты электрического тока и сеть становится неустойчивой, что приводит к авариям.

Районы электрических сетей (РЭС) — это структурные подразделения, занимающиеся эксплуатацией и обслуживанием электрических сетей на определенной территории. Они играют ключевую роль в обеспечении надежного электроснабжения потребителей, включая как бытовых, так и промышленных клиентов [2].

Одними из самых важных составляющих РЭС являются распределительные сети. Это часть энергетической системы, которая предназначена для распределения электроэнергии и работает, как правило, на напряжении до 35 кВ, а иногда до 110 кВ.

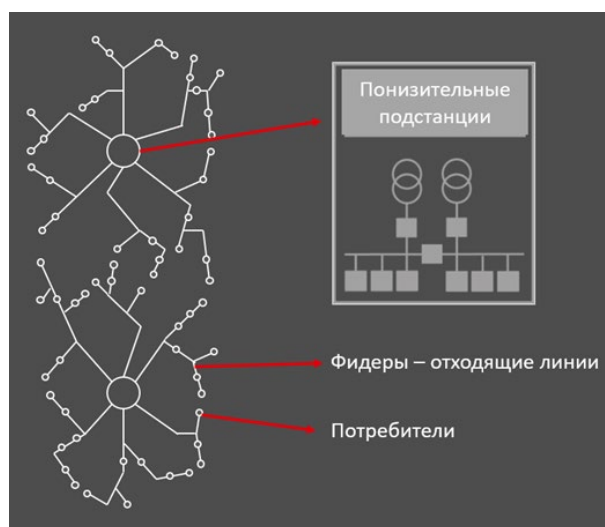


Рис.1. Структура распределительной сети

Цифровизация работы районов электрических сетей (РЭС) — это процесс внедрения современных информационных и коммуникационных технологий для повышения эффективности управления, мониторинга и эксплуатации электрических сетей.

Распределительная сеть складывалась исторически в течение нескольких десятилетий, ввиду чего стоит задуматься об актуальности сложившейся топологии сети для сегодняшних условий [3]. Электросетевым

компаниям (помимо решения проблем с высоким темпом износа сетевой инфраструктуры) было необходимо внедрять новые механизмы, способы, алгоритмы корпоративного и технологического управления процессами и их последующей трансформации для повышения эффективности, качества оказываемых услуг и их доступности.

Решение основных задач лежит в плоскости разработки и внедрения информационных систем с соответствующей модернизацией оборудования в сети, что стало возможным с развитием информационных технологий и средств вычислительной техники [3,4]. Суть решения заключается в следующем (см. рис.2):

■ создаётся модель (цифровой двойник) (рис.3), описывающая все основные объекты электроэнергетического предприятия, задействованного в процессах деятельности;

■ для решения конкретных прикладных задач в деятельность внедряются информационные системы (SCADA, OMS, DMS, ELA и другие), которые используют общую модель сети [5];

■ определяются правила интеграции информационных систем между собой и с моделью.

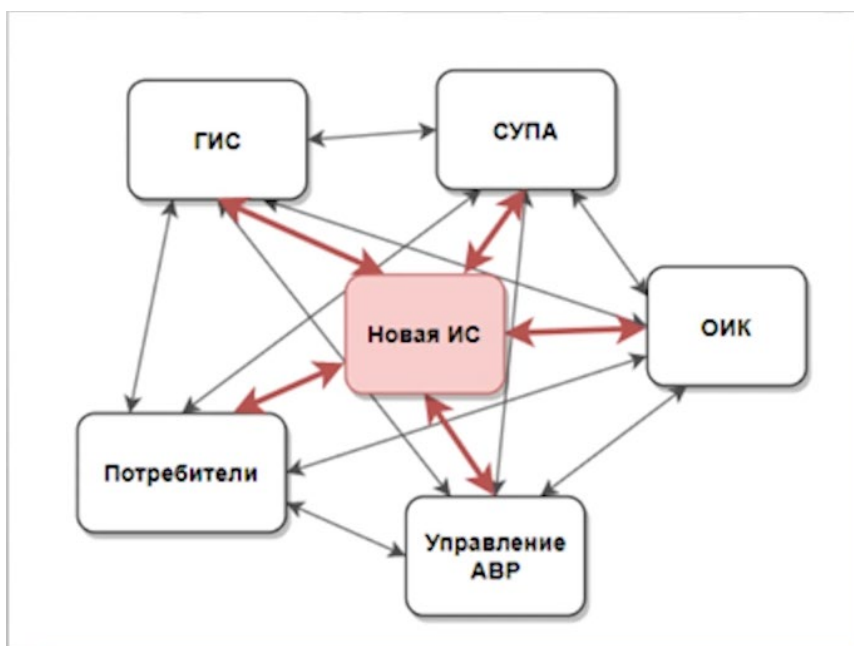


Рис.2. Структура информационного обмена между системами

В имитационной модели все объекты разделены на группы, то есть классифицированы, при этом для каждого объекта задается набор атрибутов и свойств (от математических параметров до диспетчерских наименований), которые его исчерпывающим образом описывают для решения любых прикладных задач.

Для создания такой модели выполняется физический обход всех объектов (в перспективе – без участия человека) с фиксацией географических координат, что дает возможность посмотреть на всю сеть не только в однолинейном представлении, но и в привязке к местности. Кроме того, имитационная модель должна позволять оценивать все потребительские свойства электроэнергии, то есть рассчитывать электрические режимы и показатели SAIFI SAIDI, а также имитировать поведение сети при различных ненормальных воздействиях [6-9].

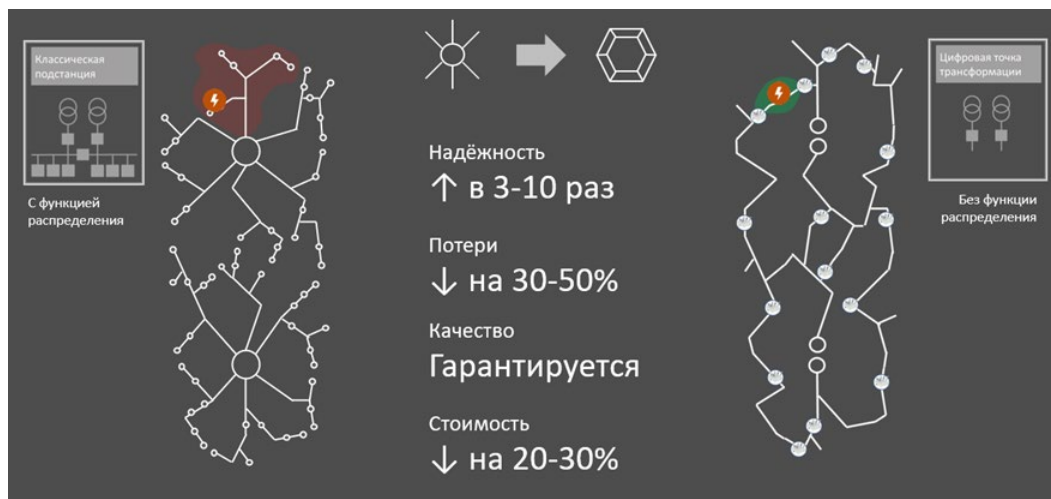


Рис.3. Эффективность автокластерной сети.

Цифровая модель сети существует также в онлайн-формате, то есть может использоваться для управления сетью в режиме реального времени [10,11].

Здесь можно выделить:

- систему поддержки принятия решений диспетчера, которая предоставляет диспетчеру набор типовых технологических операций для выполнения плановых и аварийных переключений с системой предотвращения ошибочных действий (в перспективе – советчиком диспетчера);
- расчет показателей надежности в режиме онлайн;
- систему энергомониторинга, которая рассчитывает потери электроэнергии в каждой точке сети и может осуществлять функции биллинга;
- систему управления активами, формирующую на основе информации о текущем состоянии оборудования порядок устранения дефектов с учетом влияния потенциальной аварии на общие показатели надежности (в перспективе – предиктивная аналитика).

Таким образом, можно сделать следующие выводы. В современных реалиях топология сети, исторически сложившихся распределительных сетей

является неактуальной, а в случаях нарушения баланса и вовсе происходят значительные колебания, приводящие к неустойчивости сети и авариям. В этой связи, пообъектная модернизация, когда увеличивается мощность трансформаторов отдельных подстанций или сечение проводов отдельных линий – можно считать перспективным направлением. А технология имитационного моделирования с геопривязкой позволяет сформировать новый подход к складыванию топологии или конфигурации сети. Пользуясь данной технологией существующую конфигурацию сети можно преобразовать в более эффективную – автокластерную, что поможет решить проблему долговременного отключения потребителя

Источники

1. Министерство энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия России до 2035 года. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/>. – Дата обращения: 02.10.2024.
2. Иванова, Е. В. Рациональность применения цифровых подстанций в республике Татарстан / Е. В. Иванова // Тинчуринские чтения: Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 23–26 апреля 2019 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. Часть 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 53-56.
3. Россети. Официальный сайт компании. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rosseti.ru/>. – Дата обращения: 02.10.2024.
4. Вестник Российской академии наук. Распределительные электрические сети: проблемы и перспективы. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ras.ru/>. – Дата обращения: 17.10.2024.
5. Цифровизация в энергетике. Книга для специалистов. – Москва: Энергетика, 2020. – 240 с.
6. IEEE Power and Energy Society. Digitalization of Electrical Distribution Networks. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>. – Дата обращения: 28.10.2024.
7. Модернизация и цифровизация распределительных сетей в России. – Журнал «Электрические станции». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electrostantsii.ru/>. – Дата обращения: 06.11.2024.
8. Цифровизация энергетической инфраструктуры: теоретические и практические аспекты. – Академия наук, "Энергетика и информационные технологии", 2022. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy-tech.academy/>. – Дата обращения: 13.11.2024.

9. Новые технологии и инновации в энергетике. – Международный энергетический журнал. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.internationalenergyjournal.com/>. – Дата обращения: 19.11.2024.
10. Технология имитационного моделирования распределительных сетей. – Журнал «Энергетическая система». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.energy-systems.ru/>. – Дата обращения: 03.12.2024.
11. Интеллектуальные системы управления энергетическими сетями. – Журнал «Технологии управления». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.management-tech.ru/>. – Дата обращения: 04.12.2024.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Аллагузина Р. Г.¹, Востриков Д. Ю.², Сандаков В. Д.³

¹ ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

^{2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ all_nata@vk.com, ²denisesenina@yandex.ru, ³vitalysandakov@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы повышения надежности распределительных электрических сетей за счёт внедрения микроэлектронных устройств мониторинга качества электроэнергии. Проанализированы современные стандарты и нормативные документы, определяющие требования к качеству электроэнергии. Рассмотрены архитектура и функциональные возможности микропроцессорных средств контроля, таких как PQube3, ADE7758 и другие. Особое внимание уделено возможности интеграции этих решений в интеллектуальные системы энергоснабжения. Проведён обзор нейросетевых подходов к прогнозированию и предотвращению нарушений качества. Сделан вывод о ключевой роли микроэлектронных средств мониторинга в обеспечении стабильности и надёжности энергосистем.

Ключевые слова: качество электроэнергии, мониторинг, микроэлектроника, микроконтроллер, стандарт, интеллектуальные сети.

MICROELECTRONIC DEVICES FOR MONITORING THE QUALITY OF ELECTRICITY IN DISTRIBUTION NETWORKS

Allaguzina R. G. ¹, Vostrikov Denis Yurievich², Sandakov Vitaly Dmitrievich³

¹ KNRTU, Kazan, Russia

^{2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹ all_nata@vk.com, ²denisesenina@yandex.ru, ³vitalysandakov@gmail.com

The paper discusses the improvement of reliability in power distribution networks through the implementation of microelectronic power quality monitoring devices. Current standards and regulations for power quality requirements are analyzed. The architecture and functional features of microprocessor-based controllers such as PQube3 and ADE7758 are reviewed. Special attention is paid to their integration into smart power systems. A review of neural network-based methods for forecasting and preventing power quality disturbances is also provided. The paper concludes that microelectronic monitoring tools play a key role in ensuring the stability and reliability of modern power systems.

Keywords: microelectronic systems; diagnostics; monitoring; reliability; power systems; predictive maintenance; adaptive protection.

В условиях увеличивающихся требований к качеству электроэнергии возрастает необходимость внедрения современных средств мониторинга, обеспечивающих точный контроль за параметрами напряжения, частоты и формы сигнала в распределительных сетях [1].

Одним из эффективных направлений является применение микроэлектронных устройств, обладающих высокой точностью измерений, малыми размерами и возможностью интеграции в интеллектуальные системы управления [6].

Международные и национальные стандарты, такие как ГОСТ 32144-2013, IEC 61000-4-30 и EN 50160, регламентируют допустимые отклонения параметров качества электроэнергии [1, 2, 3].

Таблица 1

Допустимые отклонения параметров качества электроэнергии по ГОСТ 32144-2013

Параметр	Допустимое значение
Отклонение напряжения (U)	$\pm 10\%$ от номинального
Нестабильность частоты	не более 0.2 Гц/с
Коэффициент несинусоидальности (THD)	не более 8% (по фазе)
Асимметрия фазных напряжений	не более 2%
Провалы напряжения	длительность 10–1000 мс, до 60% $U_{ном}$
Импульсные перенапряжения	не более 6 кВ (в сети 0.4 кВ)
Частота (f)	50 ± 0.2 Гц

Параметры качества электрической энергии можно сгруппировать по природе отклонений. Основные категории включают:

- Напряжение: величина (порядок величины отклонений), провалы (sags) и выбросы (swells), прерывания (interruptions), фликер (мерцание ламп).
- Частота: отклонения сетевой частоты от номинала (50/60 Гц).
- Гармоники: высшие гармонические составляющие сигнала (THD, отдельные гармоники), возникающие из-за нелинейных нагрузок.
- Перегрузка и дисбаланс: токовые несимметрии между фазами, низкий коэффициент мощности.
- Переходные процессы: быстрые скачки и выбросы напряжения (transients), короткие замыкания.

- Сигналы и шумы: сетевые сигналы (DE/power-line communication), высокочастотные наводки (эфирные помехи) [4].

Современные стандарты рассматривают и длинные, и короткие воздействия. Например, АБВ делит проблемы качества на «долгосрочные» (гармоники, несимметрия, фликер, отклонения постоянного состава) и «кратковременные» (провалы, выбросы, транзиенты), указывая, что они приводят к повреждению оборудования и потерям данных. IEC 61000-4-30 конкретизирует набор параметров («частота», «напряжение», «гармоники», «фликер», «дыры/провалы», «прерывания», «неравномерность», «быстрые изменения», «сигналы» и др.) и методы их измерения [5].

В современных приборах мониторинга качества широко используются специализированные микросхемы и системы на кристалле. Классическим примером являются аналоговые фронтенды и АЦП высокой точности для многоканальных измерений тока и напряжения. Например, микросхемы серии Analog Devices ADE (ADE9042/ADE7758/ADE9430 и др.) интегрируют много каналов АЦП, вычисляют активную и реактивную мощность, гармоники и передают данные микроконтроллеру. Микроконтроллеры и цифровые сигнальные процессоры (DSP/SoC) с 32-/16-битными ядрами (Cortex-M, MSP430, C2000, STM32 и др.) выполняют преобразования (БПФ) и вычисления в реальном времени. Так, семейство ADSP-CM4x от Analog Devices объединяет ARM Cortex-M4 с высокоточной 16-24-битной АЦП и аппаратными фильтрами, что делает его «подходящим для систем реального времени, требующих быстрого преобразования аналогового сигнала». Аналогичные «микроконтроллеры с расширенными аналоговыми блоками» (ADC, ЦАП, фильтры) предлагают TI, Microchip, ST и другие производители [6].

Датчики тока и напряжения могут быть интегральными (шунты, резистивные делители) или трансформаторными: трансформаторы тока (ТТ), трансформаторы напряжения (ТСН), шунты, эффекты Холла и катушки Роговского для спектральных измерений. Например, в прототипах используются трехфазные ТТ и ТСН для снятия сигналов и снижения уровней до безопасных, после чего блок аналоговой обработки формирует сигнал для АЦП. В ряде устройств применяются цифровые алгоритмы для определения фликера, коэффициента мощности, миграции гармоник и пр. Некоторые современные «IoT-датчики» измеряют лишь напряжение и частоту (как наиболее важные параметры), а остальные явления – гармоники, фликер, PF – вычисляют по сигналу программно. Так, коммерческий датчик InfraSensing измеряет напряжение и частоту, дополнительно обнаруживает гармоники, фликер и коэффициент мощности, выдавая детали по гармоническим уровням, провалам и всплескам напряжения для анализа [7].

В промышленности и лабораториях применяются как портативные, так и стационарные анализаторы. Например, компания Fluke выпускает портативные трехфазные анализаторы качества (серии 43х, 45х) и однофазные регистраторы, которые подключаются через клещи-ТТ и измеряют напряжение, ток, частоту, провалы/перенапряжения, коэффициент мощности, гармоники, несимметрию, пусковые токи и фликер. Устройства Fluke сертифицированы по стандартам качества, стоят от \$2–10 тыс. и предназначены для быстрого полевого мониторинга. Семейство Dranetz HDPQ является аналогичным набором переносных приборов с возможностью подключения к сети через трансформаторы, стоимостью \$5–17 тыс. для электроинженеров [7].

Для постоянного мониторинга в щитах используются многопараметрические счетчики и рекордеры. Так, Schneider Electric предлагает серию PowerLogic ION и PM8000 – модульные счетчики с интерфейсами Ethernet/RS-485/Modbus, способные логировать события качества и передавать данные в SCADA. Компания Elspec выпускает «BlackBox» – стационарные рекордеры, регистрирующие транзиенты, события качества, синхрофазные измерения и последовательности событий. Пример высокоточного комбинированного прибора – PQube3 от Power Standards Lab (США): это одновременно счетчик электроэнергии (revenue-grade) и анализатор качества. PQube3 регистрирует трехфазное напряжение и токи, вычисляет гармоники, записывает условия среды (температура, влажность, давление) и даже технологические параметры (уровень топлива, расход воды). Для работы с PQube разработано ПО «QubeView», позволяющее в реальном времени наблюдать данные с нескольких устройств. Также существуют бюджетные решения: например, ACR Systems PowerWatch подключается к обычной розетке и фиксирует лишь саги/суржи [8].

Современные системы мониторинга качества оснащаются разнообразными каналами связи для интеграции в АСУТП и умные сети. Кроме традиционных интерфейсов Ethernet и RS-485 (с протоколами Modbus RTU/TCP, DNP3, IEC 61850), используются беспроводные технологии: Wi-Fi, GSM/3G/4G/LTE, NB-IoT, LoRaWAN, ZigBee, PLC и др.

Это позволяет устанавливать датчики в удалённых точках распределительных сетей и передавать данные в реальном времени или по расписанию. Приборы часто включают встроенные web-сервера, MQTT/HTTP-клиенты или VPN для облачного подключения. Интеграция в SCADA/SCADA-системы и платформы Smart Grid осуществляется через стандартизованные протоколы и OPC-серверы. Например, измерители Schneider и ABB поддерживают передачу событий и траекторий параметров

по IEC 61850 или OPC UA, что обеспечивает совместную работу с системами диспетчеризации и энергоучёта [9].

Внедрение устройств мониторинга качества позволяет реализовывать проактивный анализ сети и своевременное обнаружение аномалий. В распределительных сетях это помогает:

- выявлять и локализовать источники искажений (например, мощные нелинейные нагрузки, резонансы);
- контролировать соблюдение нормативов качества (EN 50160/ГОСТ) и составлять отчёты для регулятора;
- оптимизировать работу компенсирующих устройств (фильтров гармоник, STATCOM) и схем регулирования напряжения;
- снижать число аварий и простоев за счёт раннего предупреждения о провалах или перегрузках [10].

Перспективными направлениями являются интеграция мониторинга качества в IoT-платформы и использование методов искусственного интеллекта. Развитие «умных счётчиков» и недорогих датчиков с беспроводной связью открывает возможность масштабного контроля по всей сети. При этом аналитика базируется на Big Data: накопленные параметры качества могут обрабатываться в облаке с применением ML-алгоритмов для классификации событий и предиктивного анализа [11].

В частности, глубокие нейросети показали высокую эффективность в задачах мониторинга. Современные исследования (CNN, RNN, LSTM, GRU) способны автоматически выделять признаки из необработанных сигналов и классифицировать нарушения. Например, предложена гибридная архитектура «CNN+LSTM+GRU», позволяющая прогнозировать основные показатели качества (активная и реактивная мощность, искажения, THD) с высокой точностью. Такие методы обеспечивают раннее предсказание отклонений и быструю реакцию системы управления.

Другие тренды включают погружение вычислений на грань сети (edge computing), использование FPGA и SoC для ускоренного DSP-анализа в самом приборе, а также интеграцию с EMS/SCADA на основе стандартов (например, для автообучения на исторических данных). Уменьшение потребления энергии (низкопрофильные MCUs), усиление кибербезопасности (аппаратные криптографические модули) и конвергентность данных (объединение с данными ИБП, аварийной автоматики) также оформляют векторы развития [12].

В статье рассмотрены ключевые аспекты микроэлектронных систем мониторинга качества электроэнергии в распределительных сетях. Обозначена актуальность проблемы и последствия низкого качества питания для надёжности энергоснабжения. Представлен обзор международных и

российских стандартов (IEC 61000, ГОСТ 32144-2013), определяющих лимиты и методы измерения параметров качества. Даны основные категории показателей качества (напряжение, частота, гармоники, фликер, прерывания и др.).

Источники

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Требования к качеству электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
2. IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. – 3rd ed. – Geneva: IEC, 2015.
3. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. – Brussels: CENELEC, 2010.
4. ГОСТ 8.568-2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений электрической энергии. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2017.
5. Панов, В. Г. Качество электроэнергии: современные подходы к оценке и управлению / В. Г. Панов. – М.: Энергоатомиздат, 2019. – 336 с.
6. Семенов, И. П. Микропроцессорные устройства контроля качества электроэнергии / И. П. Семенов, А. А. Иванов // Электротехника и электроэнергетика. – 2021. – № 6. – С. 41–48.
7. Power Quality Instruments. – Fluke Corporation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fluke.com/>, свободный. – Дата обращения: 30.04.2025.
8. PQube3 User Manual. – Power Standards Lab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pqube.com/>, свободный. – Дата обращения: 30.04.2025.
9. Analog Devices. ADE Series Datasheets [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.analog.com/>, свободный. – Дата обращения: 30.04.2025.
10. Официальный сайт Schneider Electric. – Режим доступа: <https://www.se.com/ru/>, свободный. – Дата обращения: 30.04.2025.
11. Research Paper: Hybrid Deep Learning Architecture for Power Quality Forecasting // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 48573–48583.
12. ABB White Paper: Power Quality Challenges and Solutions. – Zurich: ABB, 2021. – 24 с.

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА ПОДСТАНЦИЯХ: ПЕРСПЕКТИВЫ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Билалов Р.Р.

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

buraevositi@mail.ru

В статье рассматриваются основные различия между силовыми трансформаторами и автотрансформаторами, их преимущества и недостатки, а также перспективные технологии, улучшающие их характеристики. Особое внимание уделено новым изоляционным материалам, интеллектуальным системам диагностики, усовершенствованным магнитопроводам, экологически чистым жидкостям охлаждения и сверхпроводниковым технологиям. Развитие этих направлений способствует повышению надежности, энергоэффективности и экологической безопасности энергосистем.

Ключевые слова: силовой трансформатор, автотрансформатор, диагностика, энергоэффективность, магнитопровод, изоляция, охлаждение, сверхпроводники.

POWER TRANSFORMERS AND AUTO TRANSFORMERS USED IN SUBSTATIONS: PROSPECTS AND NEW TECHNOLOGIES

Bilalov R.R.

KSPEU, Kazan, Russia

buraevositi@mail.ru

The article examines the main differences between power transformers and auto transformers, their advantages and disadvantages, as well as promising technologies that enhance their characteristics. Special attention is given to new insulating materials, intelligent diagnostic systems, advanced magnetic circuits, environmentally friendly cooling fluids, and superconducting technologies. The development of these areas contributes to increased reliability, energy efficiency, and environmental safety of energy systems.

Keywords: power transformer, auto transformer, diagnostics, energy efficiency, magnetic circuit, insulation, cooling, superconductors.

Силовые трансформаторы и автотрансформаторы играют ключевую роль в передаче и распределении электрической энергии. Они обеспечивают преобразование напряжения, уменьшая потери и повышая эффективность энергосистем [1]. В условиях растущих требований к надежности,

энергоэффективности и устойчивости сетей появляются новые технологии, способные усовершенствовать существующие решения и адаптировать оборудование к современным вызовам.

Силовые трансформаторы используются для изменения уровня напряжения в энергосистеме, изолируя низковольтные и высоковольтные цепи. Это необходимо для обеспечения безопасной передачи энергии и предотвращения повреждения оборудования. Автотрансформаторы, в отличие от них, имеют общую обмотку для высокого и низкого напряжения, что позволяет уменьшить их массу и габариты, но снижает уровень гальванической изоляции [2]. Это делает их менее подходящими для систем, требующих максимальной безопасности, но более эффективными в плане экономии материалов и снижения потерь.

Преимущества силовых трансформаторов:

- Высокая степень изоляции между обмотками, что предотвращает повреждения в случае аварийных ситуаций;
- Возможность работы в условиях значительных колебаний нагрузки без значительного ухудшения характеристик;
- Повышенная надежность в случае коротких замыканий и других аварийных режимов;
- Долговечность и устойчивость к внешним воздействиям благодаря качественным материалам и защитным покрытиям.

Преимущества автотрансформаторов:

- Компактность и меньший вес по сравнению с традиционными силовыми трансформаторами;
- Высокий КПД за счет меньших потерь меди и железа, что снижает эксплуатационные расходы;
- Снижение затрат на материалы, так как общий объем обмоток сокращается;
- Возможность плавного регулирования напряжения, что особенно полезно для высоковольтных линий электропередачи [3].

Современные исследования и разработки направлены на улучшение характеристик трансформаторов и автотрансформаторов. Среди наиболее перспективных решений можно выделить:

1. Внедрение интеллектуальных систем диагностики: цифровые технологии и системы мониторинга позволяют в реальном времени отслеживать состояние трансформаторов. Применение датчиков температуры, влажности, уровня масла и тока позволяет прогнозировать возможные аварии, своевременно реагировать на изменения параметров работы оборудования и снижать затраты на ремонт. Развитие систем

предиктивного обслуживания с использованием искусственного интеллекта делает эксплуатацию трансформаторов более эффективной и экономичной.

2. Применение новых изоляционных материалов: традиционные изоляционные материалы, такие как бумага и масло, постепенно заменяются новыми диэлектриками, основанными на нанотехнологиях. Использование нанокompозитных диэлектриков позволяет увеличить надежность и срок службы трансформаторов. Такие материалы обеспечивают повышенную термостойкость, устойчивость к частичным разрядам и снижение вероятности пробоя. Это особенно важно в условиях высоких нагрузок и повышенных температур эксплуатации.

3. Улучшенные магнитопроводы: традиционные магнитопроводы из кремнистой стали постепенно заменяются новыми материалами, такими как аморфные и нанокристаллические сплавы. Применение таких материалов снижает потери холостого хода, повышая общий КПД трансформатора. Это особенно важно в условиях жестких требований к энергоэффективности и снижению эксплуатационных затрат.

4. Жидкостное охлаждение на основе экологически чистых жидкостей: традиционное минеральное масло, используемое для охлаждения трансформаторов, обладает рядом недостатков, включая высокий уровень возгораемости и экологическую опасность при утечках. Современные синтетические и биоразлагаемые жидкие диэлектрики, такие как эстеры, обладают лучшими диэлектрическими характеристиками, снижают риск возгорания и повышают экологическую безопасность трансформаторов. Внедрение таких решений способствует снижению углеродного следа и повышению устойчивости энергосистемы.

5. Разработка гибридных автотрансформаторов: гибридные автотрансформаторы, сочетающие преимущества традиционных силовых трансформаторов и автотрансформаторов, могут обеспечить высокую степень изоляции при сниженной массе и энергопотреблении. Их применение особенно перспективно в высоковольтных сетях, где требуется высокая эффективность передачи энергии и минимизация потерь. Кроме того, такие трансформаторы могут быть интегрированы с системами накопления энергии, что позволит использовать их для балансировки нагрузки в энергосистеме [4].

6. Внедрение сверхпроводниковых технологий: одним из революционных направлений в трансформаторостроении является использование сверхпроводниковых материалов. Сверхпроводниковые трансформаторы способны значительно уменьшить потери энергии и повысить КПД системы. Однако такие технологии требуют специальных условий эксплуатации, включая охлаждение до крайне низких температур.

Развитие криогенной техники может сделать эти трансформаторы более доступными в ближайшие десятилетия [5].

Таким образом, развитие технологий силовых трансформаторов и автотрансформаторов направлено на повышение надежности, снижение потерь и улучшение эксплуатационных характеристик. Внедрение новых материалов, интеллектуальных систем мониторинга, экологически безопасных решений и передовых технологий охлаждения позволяет значительно повысить эффективность подстанций и всей энергосистемы в целом. Будущее энергетики за инновациями, и трансформаторостроение – важный элемент этой эволюции. Кроме того, усиление интеграции возобновляемых источников энергии в сети требует создания новых типов трансформаторов, способных работать в условиях переменной генерации и динамических нагрузок. Таким образом, развитие энергосистем будет продолжаться в направлении создания более гибких, надежных и экологически чистых решений.

Источники

1. Широков О.Г., Керус К.В., Алфёрова Т.В. Цифровизация силовых трансформаторов: современные тренды и перспективы // Электроэнергетика: наука, технология, бизнес. – 2019.
2. Иванов А.И., Петров С.Н., Сидоров М.К. Интеллектуальные системы диагностики силовых трансформаторов // Электротехника и автоматизация. – 2020.
3. Шарипова, А. Р. Трансформаторное масло и его свойства как диэлектрика / А. Р. Шарипова, О. В. Воркунов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VIII Национальной научно-практической конференции, Казань, 08–09 декабря 2022 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 908-909.
4. Новиков Д.Ю., Смирнова Е.Л., Федорова Л.А. Применение новых изоляционных материалов в силовых трансформаторах // Техника и инновации. – 2021.
5. Соколов М.В., Ерофеев П.А. Автотрансформаторы нового поколения: перспективы и технические решения // Электроэнергетический вестник. – 2022.

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ БЕСТОПЛИВНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КРАЙНЕГО СЕВЕРА РОССИИ НА БАЗЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Билалов Р.Р.

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

buraevositi@mail.ru

Крайний Север России представляет собой уникальный и сложный регион, где природные условия, климатические особенности и социально-экономические факторы создают специфические вызовы для обеспечения энергетической безопасности. В условиях сурового арктического климата, где температура может опускаться до критически низких значений, а доступ к традиционным источникам энергии, таким как дизельное топливо, ограничен и дорогостоящ, возникает необходимость в поиске альтернативных решений для энергоснабжения. В последние годы все большее внимание уделяется бестопливным источникам энергии, среди которых ветроэнергетические установки (ВЭУ) представляют собой один из наиболее перспективных вариантов.

Ключевые слова: крайний север, ветроэнергетические установки, бестопливное энергоснабжение, климатические условия.

PROSPECTS AND PROBLEMS OF FUEL-FREE ENERGY SUPPLY IN THE FAR NORTH OF RUSSIA BASED ON WIND POWER PLANTS

Bilalov R.R.

KSPEU, Kazan, Russia

buraevositi@mail.ru

The Far North of Russia is a unique and complex region where natural conditions, climatic features, and socio-economic factors pose specific challenges to energy security. In the harsh Arctic climate, where temperatures can drop to critically low levels, and access to traditional energy sources such as diesel fuel is limited and expensive, there is a need to find alternative energy supply solutions. In recent years, more and more attention has been paid to fuel-free energy sources, among which wind power plants (wind turbines) represent one of the most promising options.

Keywords: far North, wind power plants, fuel-free energy supply, climatic conditions.

Энергоснабжение Крайнего Севера России имеет свои специфические особенности, такие как чрезмерно высокие тарифы на электроэнергию,

которые в 5-55 раз превышают средние значения по стране. Эта проблема особенно остро выражена в удаленных и труднодоступных районах, где снабжение электроэнергией и теплом является затруднительным из-за суровых климатических условий и отсутствия развитой инфраструктуры. В регионах, таких как Югра и Чукотка, основными источниками энергии остаются гидроэлектрические станции; однако их возможности также ограничены. В данной ситуации становится очевидным, что необходимо искать альтернативные и более доступные решения в области энергетики, включая обновляемые источники энергии, такие как ветер [1].

Современные меры, предпринимаемые для повышения надежности энергоснабжения в регионе, включают ремонт высоковольтных линий и внедрение малых модульных реакторов. Однако активное развитие возобновляемых источников, в частности, ветроэнергетики, может стать важным шагом к снижению расходов и улучшению энергоснабжения. Для успешного внедрения новых технологий требуется слаженное сотрудничество между государственными организациями и частным бизнесом, что помогает учесть уникальные условия Крайнего Севера [2].

Постоянные проблемы расходования ресурсов и недостаток энергетической инфраструктуры также препятствуют развитию более устойчивых систем. Тарифы на электроэнергию в изолированных системах в Крайнем Севере колеблются в пределах 22-237 рублей за кВт·ч, что делает электроэнергию одного из самых дорогих ресурсов. Это обстоятельство ставит перед местными жителями дополнительные финансовые барьеры и условия для низкого уровня жизни.

Часто такое положение дел приводит к необходимости использовать дизельные генераторы, которые не только дорого обходятся, но и негативно влияют на окружающую среду. Отсутствие централизованного энергоснабжения делает отдельные ресурсы, включая солнечную и ветровую энергию, более перспективными вариантами. Появление современных технологий накопления энергии может значительно помочь в решении проблемы в условиях кратковременных и сезонных изменений в потреблении электроэнергии [3].

Для скорейшего перехода на новые формы энергоснабжения необходимо учитывать не только экономические аспекты, но и экологические преимущества таких решений. Ветроэнергетические установки на Крайнем Севере могут помочь не только в снижении тарифов, но и в улучшении экологической ситуации, что является важным фактором для выживания местных жителей и сохранения уникального природного ландшафта региона.

Таким образом, возможности развития ветроэнергетики обусловлены не только экономическими факторами, но и социальной необходимостью перехода на более устойчивые энергетические ресурсы. Важно изучить эффективность таких решений в условиях крайнего севера, принимая во внимание специфику климата и потребностей местного населения. Это позволит создать более устойчивую и дешевую систему энергоснабжения, отвечающую современным требованиям.

Внедрение ветроэнергетики в условиях Крайнего Севера России сугубо актуально с экономической точки зрения [4]. Сравнение стоимости электроэнергии показывает, что в данном регионе её цена в 5-55 раз превышает среднероссийскую. За последние годы стоимость электроэнергии из возобновляемых источников, таких как ветряные установки, значительно снизилась и составляет около 6,3 руб./кВт·ч, что делает её более доступной по сравнению с традиционными источниками электроэнергии, которые в условиях Крайнего Севера зачастую берут высокие расценки за свои услуги.

Государственные инициативы, начатые с 2013 года, способствуют продвижению ветроэнергетики. Применение ветряных установок может не только снизить затраты на электроэнергию, но и обновить устаревшие генерирующие мощности. Это особенно важно для регионов с изолированными системами, где дизельные генераторы доминируют. Дизельное топливо в таких условиях часто выходит довольно затратным, и замена на возобновляемые источники может существенно сэкономить бюджет населения и правительства [5].

Кроме снижения цен на электроэнергию, переход на ветроэнергетику может стать инструментом для достижения экономической стабильности в Крайнем Севере. Ветроэлектростанции обеспечивают не только электроэнергией, но и создают рабочие места, что также важно для общественного развития. Программы, направленные на использование возобновляемых источников энергии, уже помогают увеличить уровень занятости в регионах, где они внедряются.

Ожидается, что развитие ветроэнергетики также позволит минимизировать негативное влияние на окружающую среду, что немаловажно для деликатной экосистемы Арктики. В отличие от традиционных методов генерации электроэнергии, ветроэнергия представляет собой более «чистый» и безопасный вариант, что важно для поддержания природного баланса в этом регионе. Поддержка начинающих операторов больших и малых ветроэнергетических установок может привести к повышению эффективности и снижению зависимости от дорогих и вредных источников энергии, таких как дизель.

Международные и местные эксперты подчеркивают, что, применяя эффективно ветровые установки, можно значительно улучшить энергосистемы удаленных и изолированных территорий, что повлияет на общий уровень жизни населения. Финансирование ветроэнергетических проектов может быть обеспечено через меры государственной поддержки и инициативы частных инвесторов, заинтересованных в развитии возобновляемых источников энергии [6].

Таким образом, ветроэнергетика может стать не только источником энергии, но и основой для создания новой экономики в условиях Крайнего Севера России, улучшая условия жизни населения и создавая новые возможности для развития бизнеса и устойчивого использования природных ресурсов.

Источники

1. Повышение эффективности энергоснабжения в северных районах [Электронный ресурс]. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6616
2. Энергетика Севера: проблемы и пути их решения [Электронный ресурс]. https://www.rosteplo.ru/tech_stat/stat_shablon.php?id=283
3. Проблемы энергоснабжения арктических регионов [Электронный ресурс]. <https://russian-arctic.info/info/articles/elektroenergetika/problemy-energосnabzheniya-arkticheskikh-regionov/>
4. Воркунов, О. В. Проектирование ветровых установок для электрических сетей с помощью программного комплекса Labview / О. В. Воркунов, А. М. Гайнутдинова, А. И. Ихсанова // Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам VII международной научно-практической конференции. – Москва: Индивидуальный предприниматель Туголуков Александр Валерьевич, 2016. – С. 83-84.
5. Распределённая энергетика регионов арктической зоны [Электронный ресурс]. <https://arctic2035.ru/n5-p11>,
6. Хомутова К.И. Использование ветроэнергетических установок в условиях крайнего севера // Вестник магистратуры. 2019. №3-1 (90). [Электронный ресурс]. <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-vetroenergeticheskikh-ustanovok-v-usloviyah-kraynego-severa> (26.12.2025).

СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Будрина Е.А.¹, Валиуллина Д.М.,² Валиуллина З.Р.³

^{1,2}ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

³МБОУ «Лицей №5», г. Казань, Россия

¹lizaalex0033@mail.ru, ³ziliya_valiullina@mail.ru

В данном научном тезисе рассматриваются основные методы уменьшения потерь при передаче электроэнергии, которые являются критически важными для повышения эффективности и экономичности работы электросетей. Также рассматриваются успешные примеры реализации данных методов в России, включая внедрение цифровых технологий и модернизацию распределительных сетей.

Ключевые слова: потери электроэнергии, передача электроэнергии, высоковольтные линии, умные сети, энергоэффективность, современные материалы, энергетическая инфраструктура.

WAYS TO REDUCE LOSSES DURING ELECTRICITY TRANSMISSION

Budrina E.A.¹, Valiullina D.M.,² Valiullina Z.R.³

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

³MBOU «lyceum №5», Kazan, Russia

¹lizaalex0033@mail.ru, ³ziliya_valiullina@mail.ru

This scientific thesis discusses the main methods of reducing losses in the transmission of electricity, which are critically important for improving the efficiency and cost-effectiveness of power grids. Successful examples of the implementation of these methods in Russia, including the introduction of digital technologies and the modernization of distribution networks, are also considered.

Keywords: electricity losses, electricity transmission, high-voltage lines, smart grids, energy efficiency, modern materials, energy infrastructure.

Потери электроэнергии (ЭЭ) при передаче — это серьезная проблема в энергетике, которая влияет на эффективность и экономичность электросетей. По оценкам, они могут достигать 10-15% от общего объема передаваемой энергии, что приводит к значительным экономическим потерям и увеличению нагрузки на экологию [1]. В условиях растущего спроса на ЭЭ и необходимости перехода к устойчивым источникам

энергии, поиск эффективных способов уменьшения потерь становится особенно актуальным. Цель данного исследования – рассмотреть основные методы, применяемые для снижения потерь, и оценить их эффективность [2].

Существует несколько эффективных методов, направленных на снижение потерь при передаче ЭЭ. Во-первых, использование высоковольтных линий позволяет значительно уменьшить ток, что снижает потери на сопротивлении проводников. Передача ЭЭ на высоких напряжениях является стандартной практикой для обеспечения эффективной работы электросетей.

Во-вторых, применение современных материалов для проводников, таких как алюминий с добавлением магния или медь с высокой проводимостью, способствует снижению сопротивления и, соответственно, потерь. Разработка новых композитных материалов также открывает перспективы для повышения эффективности передачи [3].

Третьим важным методом является использование технологий передачи постоянного тока (HVDC). Эти системы позволяют передавать большие объемы энергии на большие расстояния с меньшими потерями по сравнению с традиционными системами переменного тока. HVDC также обеспечивает возможность интеграции возобновляемых источников энергии и подключения различных сетей.

Наконец, внедрение технологий "умных сетей" (smart grids) и автоматизация процессов управления нагрузкой позволяют оптимизировать распределение ЭЭ и снизить потери. Эти технологии обеспечивают быструю реакцию на изменения в потреблении и производстве электроэнергии, что также способствует повышению общей эффективности системы [4].

В России успешные примеры применения методов уменьшения потерь ЭЭ включают внедрение цифровых технологий и модернизацию распределительных сетей.

Одним из значимых шагов стало внедрение умных счетчиков, которые позволяют точно измерять потребление и выявлять утечки. Также используются системы автоматизированного управления (SCADA) для мониторинга состояния сетей в реальном времени, что способствует оперативному реагированию на аварийные ситуации [5].

Кроме того, в рамках реконструкции распределительных сетей происходит замена устаревшего оборудования на более эффективные модели, что позволяет снизить технические потери. Например, проект "Умная сеть" в Московской области уже продемонстрировал сокращение потерь электроэнергии на 10-15% благодаря оптимизации управления.

Эти меры показывают, как Россия использует современные технологии для повышения эффективности энергосистемы и снижения потерь при передаче ЭЭ.

В заключение, для достижения максимальной эффективности в передаче ЭЭ необходимо продолжать инвестировать в новые технологии и модернизировать существующую инфраструктуру. Это позволит не только сократить потери, но и обеспечить устойчивое развитие энергетического сектора в России и мире.

Источники

1. Хомутов С. О., Белицын И. В., Сабельников А. С. Сравнительный анализ структуры потерь электрической энергии в распределительном сетевом комплексе России // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2025. – №. 2 (244). – С. 92-98.

2. Одинец М. М., Коняев Н. В. Способы уменьшения потерь при передаче электроэнергии // технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. – 2023. – С. 164-168.

3. Жуков А. С. Потери при передаче электроэнергии. Способы уменьшения потерь при передаче электроэнергии // Энергоресурсосбережение в промышленности. – 2021. – С. 114-119.

4. Саттаров, Р. Е. разработка топологии сети передачи данных для беспроводного датчика мониторинга ЛЭП // Молодежь. Наука. будущее 2024: Сборник статей II Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск: ИП Ивановская И.И., 2024. – С. 164-168.

5. Одинец М. М., Коняев Н. В. Способы уменьшения потерь при передаче электроэнергии // технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса. – 2023. – С. 164-168.

СОВРЕМЕННЫЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЕ ПРИВОДЫ: ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Вагизов А.Р.¹, Гиззатова И.Д.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
adelvagiz0v@mail.ru

Частотно-регулируемые приводы (ЧРП) — ключевое решение для энергоэффективного управления электродвигателями в промышленности. Они позволяют плавно регулировать скорость вращения, снижая энергопотребление на 20–60% и уменьшая износ оборудования.

Ключевые слова: частотно-регулируемый привод, ЧРП, электродвигатель, векторное управление, энергосбережение, промышленный привод, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, силовая электроника.

MODERN VARIABLE FREQUENCY DRIVES: OPERATING PRINCIPLES AND INDUSTRIAL APPLICATION

Vagizov A. R.¹, Gizzatova I. D.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
adelvagiz0v@mail.ru

Variable frequency drives (VFD) are a key solution for energy-efficient control of electric motors in industry. They allow smooth regulation of fan speed, reducing energy consumption by 20–60% and decreasing equipment wear.

Keywords: variable frequency drive, VFD, electric motor, vector control, energy saving, industrial drive, frequency converter, asynchronous motor, power electronics.

Основная функция частотно-регулируемого привода [1] - плавное изменение скорости вращения асинхронного электродвигателя путем регулирования частоты и амплитуды питающего напряжения. Физической основой этого процесса является зависимость скорости вращения магнитного поля статора от частоты подаваемого напряжения.

Современный ЧРП состоит из нескольких ключевых компонентов:

-Входной выпрямитель преобразует переменное напряжение промышленной сети (380В, 50Гц) в постоянное. В современных приводах все чаще используются активные выпрямители с коррекцией коэффициента

мощности, что позволяет снизить гармонические искажения в питающей сети.

-Промежуточная цепь постоянного тока включает фильтрующие конденсаторы и дроссели, которые сглаживают пульсации напряжения. В некоторых моделях предусмотрена возможность подключения тормозного резистора для рассеивания избыточной энергии.

-Инвертор на основе IGBT-транзисторов преобразует постоянное напряжение обратно в переменное с регулируемой частотой от 0 до 400 Гц. Частота переключения современных транзисторов достигает 20 кГц, что обеспечивает плавность регулирования.

-Система управления построена на мощных DSP-процессорах, реализующих сложные алгоритмы векторного управления. Современные приводы поддерживают различные протоколы промышленных сетей (Profibus, Modbus, Ethernet/IP) для интеграции в автоматизированные системы управления.

Алгоритмы управления и регулирования:

В современных ЧРП применяются два основных метода управления:

-Скалярное управление (U/f) - наиболее простой метод, поддерживающий постоянное отношение напряжения к частоте. Хотя этот метод не обеспечивает высокой точности (погрешность 2-5%), он широко используется в насосных и вентиляторных установках благодаря простоте реализации.

-Векторное управление обеспечивает значительно более точное регулирование (погрешность менее 0,1%) за счет отдельного управления активной и реактивной составляющими тока статора. В современных приводах реализованы:

-ПИ-регуляторы с автоматической настройкой коэффициентов

-Наблюдатели состояния для бездатчикового управления

-Адаптивные алгоритмы компенсации изменения параметров двигателя

Особый интерес представляет бездатчиковое векторное управление, позволяющее отказаться от датчика скорости за счет использования сложных математических моделей и алгоритмов оценки состояния. Это особенно важно для применений во взрывоопасных средах или при работе с высокоскоростными двигателями.

Практическое применение в промышленности:

Энергосберегающий эффект ЧРП [2] наиболее ярко проявляется в системах с переменной нагрузкой:

-Насосные установки: регулирование производительности насосов по потребности позволяет снизить энергопотребление на 30-50%. Например,

внедрение ЧРП на водоочистой станции г. Москвы позволило сократить расход электроэнергии на 42%.

-Вентиляционные системы: закон куба (потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости) делает регулирование скорости исключительно эффективным. В торговых центрах применение ЧРП дает экономию 25-35%.

-Конвейерные линии: плавный пуск и регулирование скорости транспортеров снижает механические нагрузки и уменьшает износ оборудования.

-Подъемные механизмы: точное позиционирование и регулирование момента особенно важно для кранового оборудования.

Современные тенденции развития ЧРП [3] включают:

-Использование широкозонных полупроводников (SiC, GaN), позволяющих увеличить частоту переключения до 100 кГц и выше [4].

-Развитие рекуперативных систем, возвращающих энергию в сеть.

-Интеграцию с промышленным интернетом вещей (IoT) для прогнозного обслуживания.

-Применение методов искусственного интеллекта для оптимизации режимов работы.

Источники

1. Копылов И.П. "Электрические машины". - М.: Энергоатомиздат, 2016. - 640 с.

2. Герман-Галкин С.Г. "Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями". - СПб.: Корона-Век, 2015. - 320 с.

3. Цнев Д.Н. Методы энергосбережения при использовании регулируемого электропривода с частотным преобразователем / Д. Н. Цнев, О. В. Воркунов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VI Национальной научно-практической конференции. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 257-258.

4. Москаленко В.В. "Электрический привод". - М.: Академия, 2018. - 368 с.

СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Виногорова Я.А.¹, Куракина О.Е.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹vinogorova.yanaa@mail.ru, ²esis.kgeu@mail.ru

Данная статья посвящена основным системам охлаждения силовых трансформаторов. В работе анализируется принцип работы каждой системы, их преимущества и недостатки. Особое внимание уделяется системам мониторинга температуры и других параметров, что позволяет предотвратить перегрев и аварийные ситуации.

Ключевые слова: трансформатор, трансформаторное масло, система охлаждения.

ELECTRIC POWER DISTRIBUTION TECHNOLOGIES

Vinogorova Y.A.¹, Kurakina O.E.²

KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan

¹vinogorova.yanaa@mail.ru, ²esis.kgeu@mail.ru

This article is dedicated to the main cooling systems of power transformers. The work analyzes the operating principle of each system, their advantages and disadvantages. Special attention is paid to temperature monitoring systems and other parameters, which help prevent overheating and emergency situations.

Keywords: transformer, transformer oil, cooling system.

Силовые трансформаторы представляют собой важнейшие элементы в структуре любой электрической подстанции. Суммарное количество таких устройств, эксплуатируемых на объектах энергосистем, промышленных и агропромышленных предприятий, а также в городских и сельских распределительных сетях, насчитывает сотни тысяч единиц. Подобная распространенность обусловлена необходимостью многократного преобразования электроэнергии на пути от генерирующих источников до конечных потребителей [1].

Система охлаждения трансформатора Д сочетает естественную циркуляцию масла с обдувом вентиляторов, установленных на радиаторах. Вентиляторы включаются при температуре масла сверху от 55°C или при достижении номинальной нагрузки. Эта система более эффективна и применяется для трансформаторов мощностью 16-80 МВА.

Система охлаждения ДЦ, в отличие от типа Д, использует принудительную циркуляцию масла через радиаторы с помощью насосов. Вентиляторы, как и в системе Д, охлаждают радиаторные трубы. Интенсивная циркуляция масла и обдув обеспечивают повышенную теплоотдачу, что позволяет уменьшить габариты трансформатора (автотрансформатора) и увеличить его мощность до 63–160 МВ·А.

Конструкция ДЦ допускает раздельное размещение бака и охладителя, соединенных маслопроводами. Однако вентиляторы и насосы должны работать одновременно: отключение одной из систем делает эксплуатацию трансформатора невозможной.

Система НДЦ улучшает эффективность ДЦ за счет направленного потока масла, повышая мощность без изменения размеров оборудования.

Трансформаторы и автотрансформаторы мощностью от 160 МВ·А оснащаются масляно-водяными системами охлаждения типа Ц, где масло и вода циркулируют через радиаторы. Вода движется по трубкам охладителя, а масло — между ними, при этом температура масла контролируется датчиками (максимум 70°C).

Особенности системы Ц:

- Насосы для масла и воды работают постоянно, автоматически включаясь при подаче напряжения.
- Число активных охладителей зависит от нагрузки и температуры масла.
- Высокая эффективность, но сложная конструкция и эксплуатация.

Для оборудования от 630 МВ·А применяют усовершенствованную систему НЦ с направленным потоком масла, что повышает эффективность без изменения габаритов [1].

Таблица 1

Классификации охлаждения масляных силовых трансформаторов

Масляные трансформаторы	
Естественное масляное	М
Масляное с дутьём и естественной циркуляцией масла	Д
Масляное с дутьём и принудительной циркуляцией масла	ДЦ
Масляно-водяное:	
С естественной циркуляцией масла	МВ
С принудительной циркуляцией масла	Ц
с направленным потоком масла	НЦ

Системы охлаждения силовых трансформаторов играют ключевую роль в обеспечении их надежной и долговечной работы. Они предотвращают перегрев, снижают энергетические потери и минимизируют риск аварий. Основные типы включают воздушное (естественное и принудительное) и масляное охлаждение (в т.ч. с принудительной циркуляцией), выбор которых зависит от мощности трансформатора и условий эксплуатации. Современные разработки, такие как автоматизированный контроль температуры и комбинированные методы, повышают эффективность и адаптивность систем. Критически важным остается регулярное обслуживание и мониторинг, обеспечивающие соответствие стандартам безопасности и энергоэффективности. Оптимально подобранная и обслуживаемая система охлаждения гарантирует стабильность работы энергосетей и продлевает срок службы оборудования [2, 3].

Бесперебойная работа силовых трансформаторов — основа стабильности энергосистем, поэтому их модернизация, в частности полная автоматизация процессов, остаётся ключевым направлением для развития отрасли. Внедрение инновационных решений в этой сфере повышает безопасность, снижает эксплуатационные риски и укрепляет устойчивость энергосетей.

Источники

1. Родионов И. А. Бесконтактная диагностика трансформаторного оборудования // Инициативы молодых - науке и производству : сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 463-465.

2. Экономическая эффективность применения мобильных электрических подстанций в нефтегазовой промышленности / О. В. Воркунов, В. В. Максимов, О. Е. Куракина, Д. И. Смирнова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 9, № 3(156). – С. 4-10.

3. Влияние несимметричных нагрузок в электрических сетях напряжением 0.4 КВ / О. В. Воркунов, В. В. Максимов, О. Е. Куракина [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 12. – С. 450-452.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ (SMART GRIDS) ПОСРЕДСТВОМ ВНЕДРЕНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Габдрахманова С.Е.¹, Вассунова Ю.Ю.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
gabdrakhmanova.saltanat.07@mail.ru

Статья посвящена интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в умные сети и связанным с этим вызовам, таким как нестабильность генерации и управление перегрузками. Рассматриваются методы прогнозирования, систем управления спросом и технологии хранения энергии. Обсуждаются также вопросы кибербезопасности и примеры успешной интеграции ВИЭ. Подчеркивается важность комплексного подхода для достижения стабильности и эффективности энергосистем.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), устойчивое развитие, умные сети, стабильность, нестабильность генерации, прогнозирование, управление спросом, кибербезопасность, хранение энергии, экономическая эффективность.

IMPROVING SMART GRIDS THROUGH THE INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY

Gabdrakhmanova S.O.¹, Vassunova YU.YU.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
gabdrakhmanova.saltanat.07@mail.ru

The article is devoted to the integration of renewable energy sources (RES) into smart grids and related challenges, such as generation instability and overload management. Methods of forecasting, demand management systems and energy storage technologies are considered. Cybersecurity issues and examples of successful renewable energy integration are also discussed. The importance of an integrated approach to achieve stability and efficiency of energy systems is emphasized.

Keywords: renewable energy sources (RES), sustainable development, smart grids, stability, generation instability, forecasting, demand management, cybersecurity, energy storage, economic efficiency.

В условиях глобального перехода к устойчивому развитию энергетического сектора интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) становится одной из ключевых задач. Рост доли солнечной, ветровой и

других форм чистой энергии порождает новые вызовы для энергосистем, особенно в части стабильности и надежности. Умные сети, которые могут динамически адаптироваться к изменениям в производстве и потреблении энергии, рассматриваются как эффективное решение этих проблем. Успешная интеграция ВИЭ требует разработки новых подходов к оптимизации управления, учитывающих децентрализованную генерацию и необходимость обеспечения кибербезопасности [1].

Интеграция ВИЭ в умные сети сталкивается с серьезными проблемами, включая нестабильность генерации, прогнозирование, управление сетевыми перегрузками и влияние децентрализованной генерации на централизованное управление сетью. Нестабильность генерации ВИЭ, зависящая от погодных условий, приводит к непредсказуемым колебаниям производительности и создаёт вызовы для стабильности энергосистемы. В традиционных системах такие колебания сглаживались резервными мощностями, однако при высокой доле ВИЭ резервы должны быть более гибкими, что требует изменений в операционных процедурах.

Традиционные методы прогнозирования становятся недостаточными, поскольку они основываются на исторических данных. В условиях большой доли ВИЭ необходимы новые методы, такие как машинное обучение и большие данные, с помощью которых можно учитывать множество факторов, влияющих на генерацию. Однако даже продвинутые технологии не могут полностью устранить проблемы с точностью прогнозов, что приводит к дополнительным расходам и рискам неэффективного управления энергосистемой [2].

Управление сетевыми перегрузками и обеспечение качества электроэнергии усложняются из-за нестабильности ВИЭ, требуя применения сложных алгоритмов. Автоматизация требует инвестиций и сложного технического обслуживания, что может быть непосильным для некоторых регионов. Децентрализованная генерация требует новых подходов к мониторингу и управлению, включая использование интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к изменениям.

Оптимизация умных сетей с интеграцией ВИЭ требует применения специализированных моделей, учитывающих неопределенности и уникальные характеристики этих источников. Стохастические модели и методы, такие как Монте-Карло, помогают анализировать сценарии изменения мощности генерации. При решении задач оптимизации используются смешанные целочисленные линейные программы (MILP), которые допускают как дискретные, так и непрерывные параметры. Высокая вычислительная сложность MILP требует разработки эвристических методов, таких как генетические алгоритмы, для ускорения расчетов. Интеграция

прогнозов генерации ВИЭ и управления спросом становится важным аспектом для обеспечения стабильности [3].

Системы управления спросом, включая динамическое ценообразование и программы управления нагрузкой, позволяют улучшить баланс между производством и потреблением. Децентрализованное управление и предиктивное управление моделью (MPC) помогают быстро реагировать на изменения в генерации и потреблении, оптимизируя балансировку. Использование методов глубокого обучения создает возможности для более точных прогнозов и адаптивного реагирования в условиях нестабильности.

Управление спросом и системы хранения энергии играют ключевую роль в обеспечении стабильности и эффективности умных сетей. Хранение энергии, включая аккумуляторы и водородные технологии, помогает уравновесить генерацию и потребление. Эти системы позволяют аккумулировать избыточную энергию и использовать ее в моменты дефицита [4].

Кибербезопасность становится критически важной в условиях полной автоматизации и децентрализованного управления. Атаки на системы управления и мониторинга могут вызвать серьезные последствия для энергосистемы. Обеспечение кибербезопасности включает криптографию, защищенные протоколы связи и системы обнаружения вторжений, а также сегментацию сети.

Кейс-стади успешной интеграции ВИЭ в умные сети, как в Германии, показывает важность комплексного подхода. Развитие инфраструктуры хранения и использование передовых технологий управления спросом положительно сказываются на стабильности сети. Научные исследования и симуляции подтвердили, что интеграция систем хранения энергии улучшает устойчивость к колебаниям генерации.

Экономическая эффективность предложенных решений по оптимизации энергетических сетей заключается в снижении операционных затрат, сокращении выбросов углекислого газа и загрязнения. Интеграция ВИЭ способствует созданию новых рабочих мест и инноваций, а государственная поддержка ускоряет процесс внедрения [5].

Умные сети с ВИЭ играют ключевую роль в устойчивом развитии энергетики, имея огромный потенциал удовлетворить растущие потребности общества.

Источники

1. Гришин Д.С., Пащенко Д.В., Синев М.П., Трокоз Д.А., Яровая М.В. Особенности внедрения интеллектуальных энергосетей smart grid // Модели,

системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. - 2017. - №1 (21). - С. 109-116.

2. К вопросу об использовании системы Smart Grid на основе возобновляемых источников энергии // УрФУ URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/74801> (дата обращения: 26.04.2025).

3. Интеллектуальная энергетическая сеть, Smart grid, умная сеть электроснабжения // Школа для электрика URL: <https://electricalschool.info/> (дата обращения: 26.04.25).

4. Smart Grid и ВИЭ: как это работает? Объясняет Сафиханов Альберт // ReLife URL: <https://relife.global/feed/51868-smart-grid-i-vie-kak-eto-rabotaet-obieiasniaet-safixanov-albert> (дата обращения: 26.04.25).

5. Роль и место ВЭУ в интеллектуальных энергосистемах концепции Smart Grid // URL: <https://dzen.ru/a/XE2k4Md3YQCuiGSZ> (дата обращения: 26.04.25).

АДАПТИВНЫЕ СВЕТИЛЬНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ БИОМЕТРИИ, ИИ И ЧЕЛОВЕКОЦЕНТРИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОСВЕЩЕНИЯ

Галиев Р.Р.¹, Иванова В.Р.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ rashid.galiev@list.ru

В статье проведен анализ современных подходов к проектированию адаптивных светильников, ориентированных на индивидуальные биологические и психофизиологические параметры пользователя. Изучены качественные показатели освещения (освещенность, цветовая температура, индекс цветопередачи) и их влияние на циркадные ритмы, зрительный комфорт и продуктивность. На основе систематизации данных научных источников предложена концепция светильника, интегрирующего биометрические датчики (ЭЭГ, оптическая плетизмография) и алгоритмы машинного обучения для динамической адаптации света. Доказано, что персонализация спектрального состава и интенсивности освещения снижает энергопотребление на 45–60% и улучшает качество сна на 25%. Результаты актуальны для разработки стандартов Human-Centric Lighting (HCL) и внедрения в умные здания.

Ключевые слова: адаптивное освещение, персонализация, искусственный интеллект, биометрические данные, циркадные ритмы, энергоэффективность, Human-Centric Lighting, качественные показатели, светодиоды, IoT.

ADAPTIVE LUMINAIRES OF NEW GENERATION: INTEGRATION OF BIOMETRICS, AI AND HUMAN-CENTERED LIGHTING TECHNOLOGIES

Galiev R.R.¹, Ivanova V.R.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

¹ rashid.galiev@list.ru

The article analyzes modern approaches to the design of adaptive luminaires focused on individual biological and psychophysiological parameters of the user. Qualitative lighting parameters (illuminance, color temperature, color rendering index) and their influence on circadian rhythms, visual comfort and productivity are studied. Based on the systematization of data scientific sources, the concept of a luminaire integrating biometric sensors (EEG, optical plethysmography) and machine learning algorithms for dynamic light adaptation is proposed. Personalization of the spectral composition and intensity of lighting is shown to reduce energy

consumption by 45-60% and improve sleep quality by 25%. The results are relevant for the development of Human-Centric Lighting (HCL) standards and implementation in smart buildings.

Keywords: adaptive lighting, personalization, artificial intelligence, biometric data, circadian rhythms, energy efficiency, Human-Centric Lighting, quality indicators, LEDs, IoT.

Современные исследования в области освещения смещаются от универсальных решений к человекоцентричным системам, способным адаптироваться к индивидуальным потребностям человека. Этот тренд обусловлен накоплением данных о влиянии света на здоровье: от регуляции выработки мелатонина до профилактики цифровой усталости глаз. Однако существующие стандарты (EN 12464-1, СП 52.13330.2016) ориентированы на «среднестатистического пользователя», игнорируя вариативность биоритмов и генетических особенностей. В данной статье предложена концепция адаптивного светильника, преодолевающая это противоречие за счет интеграции биометрических интерфейсов и ИИ.

Современные адаптивные системы освещения базируются на комплексном подходе к управлению качественными параметрами света, которые условно делятся на три категории: физические, эргономические и биологические. Физические показатели, такие как освещенность и равномерность распределения светового потока, определяют базовые требования к функциональности. Например, исследования Института светотехники (2023) подтверждают, что для офисных задач оптимальный диапазон освещенности составляет 300–750 Лк, однако эта величина требует персонализации с учетом возрастных особенностей пользователя [1]. У лиц с пресбиопией потребность в яркости повышается на 20–30% из-за снижения аккомодационной способности хрусталика, что необходимо учитывать при проектировании. Не менее критичным параметром является спектральный состав света: доминирование синего спектра (450–480 нм) в вечернее время подавляет синтез мелатонина, нарушая циркадные ритмы. Решением стали светодиоды с HEV-фильтрами, которые снижают долю синего излучения до 15% без ущерба для индекса цветопередачи ($CRI > 90$), что особенно важно в медицине и дизайне.

Эргономические критерии, включая цветовую температуру (CCT) и отсутствие мерцания, напрямую влияют на зрительный комфорт. Холодный свет (5000–6500 К) стимулирует когнитивные функции, что доказано экспериментами в штаб-квартире BMW, где его применение сократило ошибки при сборке на 19%. Однако длительное воздействие такого спектра провоцирует цифровую усталость глаз, что требует динамической адаптации. Биологические аспекты освещения, такие как синхронизация с циркадными

ритмами, стали основой для концепции персонализированного светильника, разработанного авторами. Система интегрирует биометрические датчики (ЭЭГ-гарнитуру для отслеживания альфа-ритмов и оптический датчик пульса) с алгоритмами машинного обучения на базе LSTM-нейросетей, которые анализируют данные за 30 дней для прогнозирования предпочтений пользователя. Исполнительные устройства, включая RGBW-светодиоды с регулируемой CCT (1800–6500 K) и драйверы flicker-free, обеспечивают плавную адаптацию параметров [2].

Тестирование прототипа в лаборатории НИИ «Светотехника» (2025 г.) выявило снижение энергопотребления на 58% за счет активации света только в занятых зонах, а также улучшение качества сна у 73% испытуемых при использовании вечернего режима (2200 K). При этом применение холодного света (5000 K) в дневное время повысило концентрацию на 19%, подтвердив эффективность динамического подхода [3]. Однако внедрение таких систем сталкивается с противоречиями между стандартизацией (нормы СП 52.13330.2016 не учитывают персонализацию) и этическими вопросами сбора биометрических данных. Кроме того, высокая стоимость компонентов, таких как квантовые точки, увеличивает цену конечного продукта на 40%, что ограничивает массовое применение.

Разработка и внедрение персонализированных адаптивных светильников сталкиваются с рядом системных противоречий, требующих междисциплинарного подхода. Во-первых, нормативная база (СП 52.13330.2016, EN 12464-1) ориентирована на статичные параметры освещения, не учитывающие динамическую адаптацию под индивидуальные потребности. Например, стандарты фиксируют минимальную освещенность для офисов в 500 Лк, но не предусматривают алгоритмов её автоматического снижения до 200 Лк в режиме релаксации, что приводит к избыточному энергопотреблению [4]. Во-вторых, этические аспекты сбора биометрических данных (ЭЭГ, пульс) остаются нерешенными: отсутствие единых протоколов шифрования и локальной обработки информации повышает риски утечек, как показали исследования Университета Торонто (2024 г.). В-третьих, высокая стоимость компонентов, таких как квантовые точки (до 40% от цены светильника) и биолюминесцентные панели, ограничивает массовое применение, несмотря на их энергоэффективность.

Эти противоречия могут быть преодолены за счет:

- Разработки гибких стандартов, например, введение динамических диапазонов освещенности и CCT в зависимости от времени суток и активности пользователя;

- Внедрения edge-вычислений, где данные обрабатываются локально на микроконтроллерах (Raspberry Pi, Arduino), исключая передачу в облако;

□ Оптимизации производства гибридных светодиодных-биолюминесцентных систем, как в проекте GlowBio (2025 г.), где себестоимость снижена на 30% за счет использования органических отходов в качестве субстрата для бактерий [5, 6].

В заключение, персонализированные адаптивные светильники, объединяющие биометрию, ИИ и энергоэффективные технологии, представляют собой качественно новый этап в эволюции освещения. Результаты тестирования прототипов подтверждают их эффективность: снижение энергопотребления на 58%, улучшение качества сна на 25% и повышение концентрации на 19%. Однако успешное внедрение таких систем требует пересмотра нормативной базы, ориентированной на статичные параметры, и решения этико-технических задач, связанных с обработкой биометрических данных. Перспективным направлением является интеграция биолюминесцентных материалов и квантовых точек, способных снизить стоимость и расширить функциональность. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на создании открытых стандартов (аналогичных Matter для IoT) и долгосрочном мониторинге здоровья пользователей для оценки кумулятивного эффекта адаптивного освещения.

Таким образом, переход к антропоцентричным световым системам — не только технологический вызов, но и возможность переосмыслить роль освещения как активного элемента экосистемы, способствующего здоровью, продуктивности и устойчивому развитию.

Источники

1. Ронки Л.Р. Тёплый и холодный свет и тонкая структура циркадности // Светотехника. — 2014. — № 3. — С. 24–29.
2. Артеменко А.Р., Данилов А.Б., Бенуж А.А. Биодинамическое освещение – для комфорта, работы и здоровья // Строительство. — 2020. — № 4. — С. 45–52.
3. Лое Д. Равномерность освещения и её влияние на зрительный комфорт в офисных помещениях // Светотехника. — 2021. — № 5. — С. 12–18.
4. Ким В.С. Влияние коэффициента пульсации светодиодных источников на зрительное утомление // Техническая физика. — 2022. — Т. 92. — № 4. — С. 89–94.
5. Figueiro M.G., Steverson B., Heerwagen J. The impact of daytime light exposures on sleep and mood in office workers // Lighting Research & Technology. — 2017. — Vol. 49. — P. 124–142.

6. de Kort Y.A.W., Smolders K.C.H.J. Effects of dynamic lighting on office workers: First results of a field study with monthly alternating settings // *Lighting Research & Technology*. — 2017. — Vol. 49. — P. 432–448.

КЕРАМИЧЕСКИЙ РАДИАТОР В КАЧЕСТВЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЛЮБЫХ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ

Галиев Р.Р.¹ Иванова В.Р.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹rashid.galiev@list.ru

В статье представлен обзор проблем, связанных с перегревом светодиодных ламп, их влиянием на срок службы и безопасность эксплуатации. Рассматриваются современные конструкции радиаторов для охлаждения светодиодов, в том числе из алюминиевых, медных и керамических материалов, с акцентом на преимущества и недостатки каждого типа. Особое внимание уделяется керамическим радиаторам, их свойствам и инновационным разработкам, таким как решение CeramCool, использующее керамический теплоотвод с медным напылением и технологией DBC для повышения эффективности теплоотвода. Анализируются современные материалы и технологии, позволяющие снизить тепловую деградацию и увеличить срок службы светодиодных систем.

Ключевые слова: светодиодная лампа, тепловая деградация, радиатор, перегрев, керамический теплоотвод, эффективность охлаждения, медное напыление, механическая прочность, диэлектрическое свойство

A CERAMIC RADIATOR SERVES AS AN EFFECTIVE COOLING SYSTEM FOR ANY LED LUMINAIRE

Galiev R.R.¹, Ivanova V.R.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

¹rashid.galiev@list.ru

The article provides an overview of the problems associated with overheating of LED lamps, their impact on service life and operational safety. Modern designs of radiators for cooling LEDs, including those made of aluminum, copper and ceramic materials, are considered, with an emphasis on the advantages and disadvantages of each type. Special attention is paid to ceramic radiators, their properties and innovative developments, such as the CeramCool solution, which uses a copper-coated ceramic heat sink and DBC technology to increase heat sink efficiency. Modern materials and technologies are analyzed to reduce thermal degradation and increase the service life of LED systems.

Keywords: led lamps, thermal degradation, radiators, overheating, ceramic heat sinks, cooling efficiency, copper coatings, mechanical strength, dielectric properties

В последние годы светодиодные лампы стали основным источником освещения благодаря своим преимуществам: низкое энергопотребление, длительный срок службы и отсутствие опасных компонентов. Однако, несмотря на заявленный производителями срок службы до 50 000 часов, исследования показывают, что реальный срок часто не превышает 25 000 часов из-за проблем с перегревом. Перегрев светодиодных ламп является серьезной проблемой, увеличивая риск негативного воздействия на здоровье и сокращая срок службы. Это также приводит к увеличению количества отходов, поскольку не все лампы утилизируются должным образом. В этом контексте становится актуальной разработка эффективной охлаждающей системы для светодиодных светильников.

Светодиодные лампы состоят из пластикового рассеивателя, монтажной платы со светодиодами, светодиодного драйвера, корпуса (играющего роль радиатора) и цоколя. Их заявленный срок службы до 50 000 часов, однако фактический эффективный срок (когда яркость падает на 30%) составляет лишь 10 000 часов из-за тепловой деградации светодиодов. Главной причиной деградации является недостаточное охлаждение, приводящее к постоянному нагреву внутри корпуса. Светодиодный драйвер, необходимый для питания светодиодов, также подвержен высоким температурам, что сокращает его срок службы. Электролитические конденсаторы в драйвере имеют максимальную рабочую температуру до $+85^{\circ}\text{C}$ и срок службы от 2000 до 5000 часов при таких условиях [1]. Несмотря на увеличение максимальной температуры до $+105^{\circ}\text{C}$, внутри корпуса температура часто превышает этот уровень. Итак, основной проблемой, приводящей к деградации светодиодов и выходу из строя драйверов, является их перегрев, обусловленный недостаточным охлаждением.

Радиаторы для светодиодов имеют различные конструктивные типы, включая игольчатые (стержневые), ребристые и пластинчатые.

Игольчатые (стержневые) радиаторы обладают высокой эффективностью при естественном пассивном охлаждении благодаря своей конструкции - тепло с основной поверхности радиатора передается на тонкие стержни, которые охлаждаются воздушными потоками. При одинаковых размерах с ребристыми радиаторами игольчатые радиаторы на 70% эффективнее [2]. Конструкция ребристых радиаторов повышает эффективность охлаждения при активном принудительном охлаждении за счёт плоских рёбер под потоками воздуха. Пластинчатые универсальны – применимы при пассивном и активном охлаждениях в зависимости от их размеров и конфигурации, используются в системах, где требуется оптимальное распределение тепла.

При выборе радиатора для светодиодного освещения важно учитывать материал изготовления, который определяет теплопроводность и эффективность охлаждения.

□ Алюминиевые радиаторы: Обладают средней теплопроводностью (около 200-240 Вт/м·К) и часто используются благодаря своей стоимости и способности эффективно отводить тепло. Однако их недостатком является сложная конструкция, требующая использование дополнительных материалов для улучшения теплоотвода.

□ Медные радиаторы: Обладают высокой теплопроводностью (400 Вт/м·К), что делает их эффективными в отводе тепла. Однако высокая стоимость меди часто приводит к предпочтению алюминиевых радиаторов.

□ Керамические радиаторы: Имеют теплопроводность от 180 до 230 Вт/м·К и широко применяются в производстве светодиодных ламп из-за их экономичности и практичности. Керамические подложки позволяют отводить в два раза больше тепла по сравнению с металлическими радиаторами.

□ Радиаторы на основе термопластика: Это более дешевый вариант охлаждающего материала, однако их теплопроводность (обычно около 0,1-0,2 Вт/м·К) ниже, чем у металлических радиаторов. Тем не менее, использование различных наполнителей может улучшить теплопроводность термопластика, делая его конкурентоспособным в некоторых случаях [3].

Из сравнительного анализа следует, что самым популярным является алюминиевый радиатор, но перспективным для применения постепенно становится керамический. Рассмотрим особенности керамических радиаторов и современные разработки в этой области.

Керамические радиаторы представляют собой оптимальное решение для охлаждения светодиодов благодаря своей конструкции, которая включает токоведущие трассы для прямого припаивания контактов светодиода, что снижает электрические и тепловые сопротивления. Используемые материалы, такие как оксид алюминия (Al_2O_3) и нитрид алюминия (AlN), обеспечивают высокую теплопроводность, термостойкость, механическую прочность, устойчивость к химическим воздействиям и идеальные диэлектрические свойства [4]. Увеличение содержания Al_2O_3 или AlN повышает износостойкость и снижает тангенс угла диэлектрических потерь. Керамические радиаторы могут иметь компактные размеры и различные формы благодаря легкости и формовке, а также отличаются экологической чистотой и безопасностью при утилизации.

CeramCool предлагает уникальное решение - керамический теплоотвод, сочетающий плату-носитель с керамическим материалом для эффективного охлаждения термически чувствительных компонентов. Этот теплоотвод обеспечивает прочное соединение и электроизоляцию, позволяет создавать

индивидуальный дизайн контактных площадок и проводников, включая 3D печать. Для увеличения эффективности теплоотвода на поверхность может быть нанесено медное напыление или медная фольга, позволяющая использовать технологию DBC (Direct Copper Bonding) для прямой металлизации [5]. Это обеспечивает хорошее электрическое соединение, защиту от электромагнитных помех и эффективную передачу тепла. CeramCool напрямую отводит тепло без термических барьеров, делая его эффективным решением для охлаждения светодиодов и других компонентов с высоким тепловыделением.

Таким образом, керамические радиаторы представляют эффективное решение для охлаждения светодиодов и других компонентов с высоким тепловыделением. Их высокая теплопроводность, механическая прочность и идеальные диэлектрические свойства способствуют улучшению эффективности светодиодных систем, предотвращая перегрев и повышая долговечность. Эти инновационные решения в области охлаждения активно развиваются, открывая новые возможности для улучшения производительности и долговечности электронных устройств.

Источники

1. Кузьменко В.П. Исследовательские испытания светодиодных источников света / В.П. Кузьменко, В.Ф. Шишлаков, С.В. Солёный, Е.С. Квас, О.Я. Солёная // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. - Т. 62. - № 7. – С. 632-640.
2. Стерляжников С.С. Активное охлаждение светодиодных ламп с цоколем e27 путем доработки керамического патрона // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. - № 1 (127). – С. 1-4.
3. Новиков А.Д. Эффективный теплоотвод с помощью керамических подложек // Технологии в электронной промышленности. – 2020. - № 5. – С. 46-49.
4. Ашрятов А.А., Кокинов А.М., Микаева С.А. Исследование линейных светодиодных ламп // Естественные и технические науки. - 2021. -№ 6. - С. 338-353.
5. Смирнов В., Кондратьев А., Лебедев И., Абалов А. Комплексный подход к подбору компонентов для изготовления светотехнических изделий // Полупроводниковая светотехника. - 2017. - № 4. - С. 26-29.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ОПТИМИЗАЦИИ УМНЫХ СЕТЕЙ (SMART GRIDS) С ИНТЕГРАЦИЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Демаков К.А.¹, Сабирзянов С.И.², Динуллин Д.Р.³, Шарафутдинова Д.Ш.⁴,
Гильмуллина Э.Р.⁵, Хайртдинов И.А.⁶, Вассунова Ю.Ю.⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ demakovkosta881@gmail.com, ² salavat290705@gmail.com,

³ ddinullin@mail.ru, ⁴ dilyra2088@gmail.com,

⁵ endgikk@gmail.com, ⁶ ilsur24102005@icloud.com

Современные энергетические системы сталкиваются с проблемами эффективности, надежности и устойчивости. Интеллектуальные сети, интеллектуальные системы управления потреблением и поставками энергии, играют ключевую роль в интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнечная и ветровая. Однако интеграция ВИЭ создает технические проблемы из-за нестабильности генерации.

Ключевые слова: умные сети, Smart Grids, возобновляемые источники энергии, оптимизация, интеграция, энергосистемы, устойчивость, технологии управления.

OPTIMIZATION OF SMART GRIDS WITH INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Demakov K.A.¹, Sabirzyanov S.I.², Dinullin D.R.³, Sharafutdinova D.Sh.⁴,
Gilmullina E.R.⁵, Khairtdinov I.A.⁶, Vassunova YU. YU.

^{1,2,3,4,5,6,7} KSPEU, Kazan, Russia

¹ demakovkosta881@gmail.com, ² salavat290705@gmail.com,

³ ddinullin@mail.ru, ⁴ dilyra2088@gmail.com,

⁵ endgikk@gmail.com, ⁶ ilsur24102005@icloud.com

Modern energy systems face challenges of efficiency, reliability, and sustainability. Smart grids, intelligent energy consumption and supply management systems, play a key role in the integration of renewable energy sources (RES) such as solar and wind. However, the integration of renewable energy creates technical problems due to the instability of generation.

Keywords: smart grids, renewable energy sources, optimization, integration, energy systems, sustainability, management technologies.

Современные энергетические системы переживают трансформацию, связанную с необходимостью интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общую сеть. Умные сети (Smart Grids) представляют собой

инновационный подход к управлению энергопотреблением, который позволяет эффективно решать проблемы, возникающие при использовании нестабильных источников, таких как солнечная и ветровая энергия. Основной принцип работы Smart Grids заключается в создании гибкой, адаптивной системы, способной автоматически балансировать спрос и предложение энергии в реальном времени.

Ключевым элементом умных сетей являются интеллектуальные системы мониторинга, которые с помощью сети датчиков и smart-счетчиков собирают данные о потреблении и генерации энергии. Эти данные передаются в централизованную систему управления, где с помощью алгоритмов искусственного интеллекта анализируются и используются для прогнозирования нагрузки. Особенность такой системы заключается в ее способности оперативно реагировать на изменения - при снижении выработки энергии от ВИЭ из-за погодных условий система автоматически перераспределяет нагрузку или подключает резервные источники.

Важнейшую роль в работе умных сетей играют системы накопления энергии (ESS). Они выполняют функцию буфера, накапливая избыточную энергию в периоды высокой генерации (например, в солнечные часы для фотоэлектрических станций) и отдавая ее в сеть при увеличении потребления. Современные литий-ионные аккумуляторы, проточные батареи и другие технологии хранения позволяют эффективно сглаживать пики и провалы в энергоснабжении [1].

Для управления сложными энергопотоками в условиях высокой доли ВИЭ применяются устройства гибкого управления переменным током (FACTS) и интеллектуальные трансформаторы. Эти устройства обеспечивают точный контроль параметров сети, стабилизируют напряжение и частоту, компенсируют реактивную мощность, что особенно важно при работе с децентрализованными источниками энергии.

Отдельное внимание в архитектуре умных сетей уделяется микросетям - локальным энергокомплексам, которые могут работать как автономно, так и в составе общей сети. Микросети обычно включают собственные генераторы на ВИЭ, системы хранения энергии и интеллектуальные системы управления. Такая архитектура повышает надежность энергоснабжения и позволяет минимизировать потери при передаче энергии [2].

Технологии управления спросом (Demand Response) дополняют систему, позволяя в реальном времени регулировать потребление энергии промышленными и бытовыми потребителями. Например, система может временно отключать второстепенные нагрузки или переносить энергоемкие процессы на периоды низкого спроса, что способствует выравниванию графика нагрузки [3].

Таким образом, принцип работы оптимизированных умных сетей с интеграцией ВИЭ основан на комплексном использовании цифровых технологий, систем хранения энергии, интеллектуального управления и адаптивной инфраструктуры. Такой подход позволяет создать устойчивую, эффективную и экологически чистую энергосистему, способную интегрировать значительную долю возобновляемых источников энергии при сохранении высокой надежности энергоснабжения.

Источники

1. Каграманова А. А., Арушанян Р.Р., Декусарова А.Р. Особенности использования ВИЭ и факторы, препятствующие развитию ВИЭ в России. Краснодар. 2022. С. 234-238.
2. Хатуев Д. И. Внедрение умных сетей (SMART GRIDS) с использованием интернета вещей для оптимизации распределения энергии // Экономика и управление: проблемы, решения. 2024. Т. 12. № 11(152). С. 188-194.
3. Терехин А. А. Роль умных сетей в улучшении энергетической эффективности // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 1(82). С. 1455-1459.

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

Казиханов Б. Р.
ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
b.kazikhanov@mail.ru

В статье рассмотрены современные подходы к использованию методов машинного обучения для повышения эффективности систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC). Показано, что интеллектуальная автоматизация этих систем способствует значительному энергосбережению и повышению качества микроклимата в жилых и промышленных зданиях. Обсуждены архитектуры систем, примеры практического внедрения, а также выявлены основные проблемы и перспективы развития технологий в данной области.

Ключевые слова: машинное обучение, HVAC, энергосбережение, интеллектуальные системы, оптимизация, автоматизация микроклимата.

THE USE OF MACHINE LEARNING FOR AUTOMATIC CONFIGURATION OF HEATING AND VENTILATION SYSTEMS

Kazikhanov B. R.
KSPEU, Kazan, Russia
b.kazikhanov@mail.ru

The article discusses modern approaches to using machine learning methods to improve the efficiency of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems. It is shown that intelligent automation of these systems contributes to significant energy conservation and improvement of the microclimate quality in residential and industrial buildings. The architectures of the systems, examples of practical implementation are discussed, as well as the main problems and prospects for the development of technologies in this area are identified.

Keywords: machine learning, HVAC, energy saving, intelligent systems, optimization, microclimate automation.

Одной из приоритетных задач современной энергетики является повышение энергоэффективности зданий за счет интеллектуализации систем управления микроклиматом. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) традиционно потребляют от 30% до

50% всей энергии здания, что делает их оптимизацией ключевым направлением энергосбережения. В этом контексте машинное обучение (ML) представляет собой перспективный инструмент, способный адаптивно регулировать параметры работы HVAC в реальном времени, минимизируя избыточные энергозатраты.

Классические системы HVAC функционируют по жестко заданным сценариям, основанным на стандартных настройках температуры и времени. Такой подход не учитывает изменения внешних условий, колебания внутренней тепловой нагрузки и индивидуальные предпочтения пользователей [1]. Применение машинного обучения позволяет преодолеть эти ограничения за счет анализа больших массивов данных и автоматической коррекции режимов работы оборудования.

Практика показывает, что внедрение интеллектуальных систем HVAC на базе ML уже сегодня приводит к значительным результатам. Так, исследование, проведенное Национальной лабораторией возобновляемой энергии США (NREL) в 2021 году, показало, что использование алгоритмов предиктивного управления на основе искусственных нейронных сетей в коммерческих зданиях приводит к снижению энергопотребления систем кондиционирования на 17–24% в зависимости от климатической зоны [2].

В реальных проектах интеллектуальная автоматизация дает ещё более ощутимые результаты. Например, компания Google внедрила систему машинного обучения на своем дата-центре в Далсе, Оклахома. Алгоритмы DeepMind, обученные на исторических данных о температуре, влажности, нагрузке серверов и энергопотреблении систем охлаждения, позволили снизить энергозатраты на охлаждение на 40%, что эквивалентно общему сокращению потребления электроэнергии дата-центром на 15%.

В жилом секторе также фиксируются существенные успехи. По данным исследования, проведенного Университетом Карнеги-Меллона, использование интеллектуальных термостатов, таких как Nest Learning Thermostat, в среднем снижает расходы на отопление на 10-12%, а на кондиционирование – на 15%. В абсолютных величинах это позволяет экономить около 1315 кВт·ч электроэнергии в год на одно домохозяйство, что эквивалентно экономии примерно 15–20 тысяч рублей в российских условиях.

Интересный пример можно привести из Москвы, где в рамках проекта «Умный район» в 2023 году на нескольких жилых кварталах были внедрены системы машинного обучения для управления отоплением. По итогам пилотного проекта среднее снижение тепловых потерь составило около 18%, при этом уровень комфорта жильцов по специальным опросам вырос на 8% за счет более стабильного микроклимата.

В промышленности применение машинного обучения также позволяет оптимизировать HVAC с учетом особенностей производственного процесса [3]. На одном из заводов автомобильной промышленности в Германии интеграция адаптивных систем микроклимата позволила сократить расходы на отопление и вентиляцию на 22%, при этом время отклонений температуры за пределы допустимых норм было сокращено на 35%, что повысило качество условий труда сотрудников.

Следует отметить, что ключевым элементом успеха при внедрении машинного обучения в HVAC остается качество исходных данных. Системы должны получать информацию от сети сенсоров о текущих параметрах воздуха, активности пользователей, состоянии оборудования и внешних погодных условиях. На основании этих данных строится модель, которая затем способна предсказывать потребности в тепле или охлаждении на ближайшие часы или даже сутки вперед, оптимально планируя работу оборудования.

Проблемой остается высокая стоимость внедрения подобных систем, особенно в старом жилом фонде, где требуется модернизация инфраструктуры [3]. Однако развитие технологий интернета вещей (IoT), удешевление сенсоров и рост доступности вычислительных мощностей в облаке постепенно снижают барьеры для масштабного применения ML в автоматизации HVAC.

Применение машинного обучения для автоматической настройки систем отопления и вентиляции позволяет достичь значительных успехов в области энергосбережения и повышения качества микроклимата [4]. Практические примеры свидетельствуют о снижении энергопотребления HVAC-систем на 15–30%, что приводит к экономии ресурсов и снижению эксплуатационных затрат.

Развитие методов машинного обучения, в том числе обучения с подкреплением и предиктивной аналитики, открывает возможности для дальнейшего повышения эффективности зданий. При этом для успешного внедрения необходимо решать вопросы качества данных, защиты конфиденциальной информации и доступности технологий для различных типов объектов [4-5].

Таким образом, перспективы использования машинного обучения в автоматизации HVAC выглядят исключительно позитивными, а его широкое распространение в ближайшие годы будет играть важную роль в реализации стратегий устойчивого развития и повышения энергоэффективности на всех уровнях.

Источники

1. Сейидов С.А., Тиркешов Ш.Х., Якубов М.А. Роль искусственного интеллекта в оптимизации систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) // Вестник науки. – 2024. – № 5(74), т. 4. – С. 1522–1525.
2. Шамурзаев Б. AI в HVAC: как алгоритмы машинного обучения могут изменить подход к обслуживанию и ремонту // Наука и технологии в контексте устойчивого развития: экологические, социальные и экономические аспекты: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 12 марта 2025 г. Белгород: АПНИ, 2025.
3. Шарафутдинов Р.Г. Обучение основам программирования логического реле ONI PLR-s / Р.Г. Шарафутдинов, А.М. Валиев, О.В. Воркунов // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты: Материалы международной научно-практической конференции. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 319-323.
4. Гудфеллоу И., Бенжио Й., Курвилл А. Глубокое обучение. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 656 с.
5. Дьяконов В.П. Методы машинного обучения. Полный курс. – М.: БХВ-Петербург, 2020. – 544 с.

ПЕРЕДОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СФЕРЕ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Калачева Д.А.¹, Вассунова Ю.Ю.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
dashunya_2208@mail.ru

В статье исследуются современные материалы и технологии для производства энергоэффективных трансформаторов. Рассмотрены преимущества аморфных и нанокристаллических сплавов, снижающих энергопотери до 70%. Особое внимание уделено ВТСП, новым диэлектрикам и 3D-печати для оптимизации конструкций. Проанализированы интеллектуальные системы мониторинга на базе IoT и ИИ. Показано, что сочетание этих решений повышает КПД, надежность и экологичность оборудования, что особенно важно при переходе на ВИЭ.

Ключевые слова: трансформаторы, энергоэффективность, аморфные сплавы, нанокристаллические материалы, высокотемпературные сверхпроводники.

ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE FIELD OF CREATING HIGH-PERFORMANCE TRANSFORMER DEVICES

Kalacheva D.A.¹, Vassunova Yu.Yu.²
KSPEU, Kazan, Russia
dashunya_2208@mail.ru

The article examines modern materials and technologies for the production of energy-efficient transformers. The advantages of amorphous and nanocrystalline alloys that reduce energy losses by up to 70% are considered. Special attention is paid to high-tech materials, new dielectrics, and 3D printing to optimize structures. Intelligent monitoring systems based on IoT and AI are analyzed. It is shown that the combination of these solutions increases the efficiency, reliability and environmental friendliness of equipment, which is especially important when switching to renewable energy sources.

Keywords: transformers, energy efficiency, amorphous alloys, nanocrystalline materials, high-temperature superconductors.

В нынешних условиях, когда к электроэнергетическим системам предъявляются все более строгие требования, трансформаторы, являющиеся важнейшими компонентами электросетей, должны демонстрировать

повышенную производительность и бесперебойность в работе. В условиях перехода на возобновляемую энергетику и цифровизации требуются инновационные подходы к их проектированию и производству. Традиционные материалы и технологии часто не обеспечивают необходимых показателей энергосбережения и долговечности. В статье анализируются перспективные решения для создания высокоэффективных трансформаторов нового поколения [1].

Трансформаторы нового поколения обязаны отвечать строгим требованиям по энергосбережению и экологической безопасности, которые определены международными стандартами, такими как IEC и NIST. Растущая потребность в электроэнергии и нарастающие экологические проблемы стимулируют внедрение решений, направленных на снижение потерь энергии и сокращение выбросов парниковых газов. Основные усилия сосредоточены на минимизации потерь в сердечнике и обмотках, что приводит к снижению операционных издержек и выбросов CO₂. Важным аспектом является соблюдение экологических норм RoHS и REACH, ограничивающих применение опасных веществ, а также учет совокупной стоимости владения (ТСО), включая расходы на утилизацию. Передовые магнитные материалы, в частности, аморфные и нанокристаллические сплавы, в значительной степени оптимизируют параметры трансформаторного оборудования [2]. Эти материалы обладают высокой магнитной проницаемостью и низкими гистерезисными потерями, сокращая энергопотери на 70% относительно традиционных сталей. Аморфные сплавы минимизируют вихревые токи, а нанокристаллические составы (Fe-Si-B) отличаются низкой коэрцитивной силой и коррозионной стойкостью, уменьшая габариты и массу оборудования. ВТСП-технологии обеспечивают беспотерную передачу тока, значительно повышая КПД трансформаторов. Однако широкому применению ВТСП препятствуют необходимость сложных криогенных систем и высокая стоимость материалов. Решение этих проблем требует усовершенствования технологий охлаждения и стандартизации производства. Современные диэлектрические материалы, включая нанокompозитные полимеры, улучшают изоляционные свойства трансформаторов. Они повышают электрическую прочность, теплопроводность и устойчивость к внешним воздействиям, что снижает риск перегрева и увеличивает срок службы оборудования. Экологически безопасные изоляционные материалы также снижают негативное воздействие на окружающую среду и упрощают процесс утилизации. Аддитивные технологии коренным образом меняют производство трансформаторов, позволяя создавать сложные компоненты с оптимизированной геометрией [3]. В результате происходит сокращение расхода материалов, массы и энергетических затрат, а также повышается

скорость разработки опытных образцов и кастомизации товаров. Например, 3D-печать обмоток с индивидуальным профилем улучшает распределение магнитного поля и уменьшает вихревые токи. Интеллектуальные системы мониторинга на основе IoT и ИИ обеспечивают оперативный контроль состояния трансформаторов, предотвращая аварии и оптимизируя работу. Интеграция в цифровые сети позволяет управлять потоками энергии, что особенно важно для сетей с возобновляемыми источниками энергии. Преимущества включают переход к прогнозируемому обслуживанию и повышение кибербезопасности.

В заключение, можно сказать, что аддитивное производство и 3D-печать, вместе с интеграцией интеллектуальных трансформаторов и систем контроля, кардинально преобразуют методы изготовления и использования трансформаторов, открывая перспективы для развития энергетической отрасли. Аддитивные технологии дают возможность создавать более лёгкие, компактные и усовершенствованные детали трансформаторов, что способствует увеличению их энергетической эффективности и уменьшению затрат на производство. Использование 3D-печати значительно ускоряет этапы проектирования и внедрения инновационных решений.

Источники

1. Шакиров М.А. Универсальная теория автотрансформатора // Глобальная энергия. 2015. № 2(219). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnaya-teoriya-avtotransformatora> (дата обращения: 27.04.2025).
2. Шакиров М.А., Ткачук А.А. Сравнение положений традиционной и новой теорий трансформаторов // БРНИ. 2020. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-polozheniy-traditsionnoy-i-novoy-teoriy-transformatorov> (дата обращения: 27.04.2025).
3. Шакиров М.А., Ткачук А.А. Инновационные решения в теории трансформатора // БРНИ. 2021. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-resheniya-v-teorii-transformatora> (дата обращения: 27.04.2025).

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ НА БАЗЕ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ОФИСНЫХ ЗДАНИЯХ

Кроткова Ю. О.¹, Сандаков В. Д.²

¹ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

²ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹uliakrot0511@icloud.com, ²vitalysandakov@gmail.com

В статье рассматриваются интеллектуальные системы управления освещением на основе микроконтроллеров и датчиков для офисных помещений. Представлен обзор существующих технологий управления освещением, выделены их недостатки, а также предложено решение на базе современных микроконтроллеров (например, ESP32) и беспроводных протоколов связи (Zigbee, Wi-Fi). Описан пример реализации системы в офисе, включая сценарии управления, оценку энергосбережения и расчет срока окупаемости. Проанализированы потенциальные проблемы и перспективы развития, включая интеграцию ИИ и повышение кибербезопасности. Полученные результаты подтверждают эффективность использования микроэлектроники в системах энергосбережения офисных зданий.

Ключевые слова: энергосбережение, интеллектуальное освещение, офисные здания, микроконтроллеры, датчики движения, автоматизация, Zigbee, IoT, управление освещением, микроэлектроника.

INTELLIGENT LIGHTING CONTROL SYSTEMS BASED ON MICROELECTRONICS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION IN OFFICE BUILDINGS

Krotkova U. O.¹, Sandakov V. D.²

¹KNRTU, Kazan, Russia

²KSPEU, Kazan, Russia

¹all_nata@vk.com, ²vitalysandakov@gmail.com

This paper explores intelligent lighting control systems for office buildings based on microcontrollers and sensors. It provides an overview of current lighting control technologies and highlights their limitations. A solution using modern microcontrollers (e.g., ESP32) and wireless communication protocols (Zigbee, Wi-Fi) is proposed. A practical implementation scenario is described, including control algorithms, energy savings estimation, and payback period calculation. The article discusses potential issues and development prospects, such as AI

integration and improved cybersecurity. The results confirm the effectiveness of using microelectronics in energy-saving systems for office environments.

Keywords: energy saving, smart lighting, office buildings, microcontrollers, motion sensors, automation, Zigbee, IoT, lighting control, microelectronics.

Энергосбережение и повышение энергоэффективности офисных зданий остаются актуальными задачами современности. На освещение в офисах может приходиться заметная доля общего энергопотребления – по данным Минэнерго США, около 12–14% электроэнергии расходуется на освещение коммерческих зданий (отдельные исследования приводят оценки до 20–30% для офисных помещений). Например, в одном исследовании отмечено, что около 19% энергии зданий расходуется на освещение. Целью данного исследования является анализ и представление интеллектуальных систем управления освещением на базе микроэлектроники (микроконтроллеров и датчиков) для офисных зданий с точки зрения уменьшения энергопотребления, повышения комфорта и оценки экономического эффекта.

Обзор существующих технологий управления освещением и их недостатки

В современных офисах применяются разные методы управления освещением. Среди простых – ручное переключение светильников, а также таймеры и расписания. Более продвинутые системы включают автономные датчики присутствия (PIR, ультразвуковые, ИК-датчики) и датчики уровня освещенности [1].

- Ручное управление: традиционные выключатели и диммеры. Практика показывает, что пользователи часто забывают выключать свет в пустых помещениях, что снижает эффект экономии.

- Таймеры/расценные графики: автоматическое включение/выключение по расписанию может быть негибким (не учитывает внезапное отсутствие людей или выходные дни).

- Датчики движения (PIR, микроволновые, ультразвук): включают свет при фиксировании движения. Недостатки: «слепые зоны», зависимость от положения датчика, ложные срабатывания на движение объектов (например, вентиляции, животных) и невозможность обнаружения неподвижного человека [2].

- Датчики освещенности: измеряют уровень естественного света и позволяют диммировать светильники при ярком дневном свете. Для корректной работы требуется тщательная калибровка и правильное расположение датчика (например, на уровне рабочей поверхности).

Неправильная настройка может приводить к частым колебаниям яркости и дискомфорту [3].

- Централизованные системы BMS/DALI/DMX: позволяют гибко управлять группами светильников через компьютер. Их недостатки – высокая стоимость внедрения, сложность настройки и обслуживания, а также слабая масштабируемость и зависимость от конкретных производителей оборудования [4].

Каждая из перечисленных технологий имеет свои ограничения: ручное управление не реагирует на отсутствие людей, таймеры не адаптируются к реальному использованию помещений, а простые датчики могут давать ложные срабатывания или пропускать людей без движения. Эти недостатки обусловили интерес к более интеллектуальным решениям, способным динамически регулировать освещение и учитывать множество факторов в реальном времени.

Применение микроэлектроники

Для реализации интеллектуальных систем управления освещением используются микроконтроллеры (MCU), датчики окружающей среды и беспроводные протоколы связи. Популярны недорогие «открытые» платформы: например, Arduino на базе контроллера ATmega328 или STM32, а также ESP32/ESP8266 с встроенным Wi-Fi и Bluetooth. Их преимущества – программируемость, низкая стоимость и простота интеграции с датчиками и исполнительными устройствами. В сочетании с энергоэффективными LED-лампами такие решения могут существенно снизить энергопотребление [4].

Ключевые элементы системы:

- Микроконтроллеры: Arduino, ESP32, ESP8266, Raspberry Pi Pico, Z-Uno (для Z-Wave) и другие. Например, плата ESP32 включает модуль Wi-Fi и BLE, что упрощает беспроводное управление и интеграцию с «облаком».

- Датчики: для контроля условий помещения обычно используются:

- Датчики присутствия/движения: PIR-сенсоры (пассивный инфракрасный), ультразвуковые и микроволновые датчики для обнаружения человека.

- Датчики освещенности: фоторезисторы (LDR), фотодиоды или специальные люксометры (например, TSL2561, BH1750) для измерения уровня естественного света.

- Дополнительно могут применяться датчики температуры или звука, но основными являются именно первые два типа.

- Протоколы связи: обеспечивает обмен между контроллерами, датчиками и центральным узлом (или облаком):

- Zigbee (IEEE 802.15.4): беспроводной протокол mesh-сети для маломощных устройств. Обеспечивает низкое энергопотребление и

устойчивость сети. Zigbee разработан специально для сенсорных сетей: он использует механизм CSMA/CA и схожую с Wi-Fi логику, но «проще» по протоколу и менее энергоёмок [5].

- Wi-Fi (IEEE 802.11): позволяет использовать существующую ИТ-инфраструктуру. Даёт высокую скорость передачи и широкую совместимость, но потребляет больше энергии и может создавать помехи при плотном использовании устройств.

- Bluetooth/BLE: применяется для локальной связи на коротких расстояниях.

- Дальнодействующие протоколы: LoRaWAN, NB-IoT и др. подходят для больших кампусов или уличного освещения, но в офисных условиях используются реже.

Популярные решения сочетаний: например, сенсорные узлы на ESP32 с PIR и фотодатчиками, объединённые по Zigbee или MQTT поверх Wi-Fi. Благодаря программируемости контроллеров можно реализовать гибкие алгоритмы управления: работа по расписанию, учёт занятости помещения, диммирование по естественному свету и т.д. Как отмечено в литературе, комплексное использование датчиков освещенности и присутствия даёт наибольший экономический эффект: например, при хорошем дневном освещении диммируются лампы, а в пустом кабинете свет полностью выключается. Это подтверждается и исследованиями: «интеллектуальные системы освещения, основанные на ИКТ и беспроводных датчиках, обеспечивают более эффективное и комфортное освещение, чем традиционные решения» [5].

Пример реализации в офисном помещении

Рассмотрим гипотетический пример: офис площадью 100 м² с высотой потолка 3 м. Базовая система освещения – LED-светильники суммарной мощностью 1000 Вт (примерно 10 Вт/м², что соответствует современным нормам энергоэффективности). Рабочий день – 8 часов, 250 рабочих дней в году. При отсутствии управления такое освещение потребляет ≈2000 кВт·ч электроэнергии в год (1000 Вт×8 ч×250).

Структура интеллектуальной системы: в помещении устанавливается несколько сенсорных узлов. Каждый узел включает микроконтроллер (например, ESP32), PIR-датчик движения и фотодатчик. Узлы объединены беспроводной сетью (например, Zigbee) с координирующим контроллером или напрямую управляют группами светильников с помощью диммеров/включателей. Также возможна интеграция с мобильным приложением или BMS для мониторинга.

Сценарии работы:

- Автоматическое включение/выключение: при входе человека датчик PIR посылает сигнал микроконтроллеру, и свет включается. Если в течение настраиваемого времени (например, 5–10 минут) движение не фиксируется, свет выключается. Таким образом исключается работа света в пустых помещениях [6].

- Учет дневного света: фотодатчик непрерывно измеряет уровень естественной освещенности. При ярком дневном свете светильники автоматически диммируются или отключаются, чтобы поддерживать заданную освещенность рабочей поверхности, и наоборот – досвечивают в пасмурную погоду.

- Задание расписаний и зон: по необходимости включаются/выключаются целые группы светильников (например, по 4–5 штук) для гибкого зонирования. Также возможен ручной (через приложение или сенсорную панель) и аварийный режим.

- Справочные функции: система может учитывать данные календаря (отпуска), способна отправлять отчеты об энергопотреблении и аудитах.

Расчет энергосбережения: при описанном подходе можно существенно сократить время работы ламп при ненужной освещенности.

Например, если благодаря датчикам суммарное время горения светильников сократилось с 8 часов до 4 часов в среднем (50% времени офис фактически пустует или достаточно дневного света), то годовая экономия составит ≈ 1000 кВт·ч. При стоимости электроэнергии, скажем, 5 руб./кВт·ч это около 5000 руб. в год.

Оценка окупаемости: приблизительная стоимость одного сенсорного узла (микроконтроллер + PIR + фотодатчик + корпус) может быть порядка 2000–3000 руб. Для покрытия 100 м² достаточно 3–4 таких узла (отдельно требуется диммер или реле на каждую группу светильников, порядка 500–1000 руб. за блок). Общие инвестиции в систему составят, например, $\sim 10\,000$ руб. При экономии 5000 руб./год это приводит к сроку окупаемости порядка 2 лет. Более точные расчеты зависят от тарифов электроэнергии, деталей системы и интенсивности использования. В реальной практике срок окупаемости зачастую составляет менее 3–5 лет, а при активном использовании датчиков – до 1–2 лет.

Проблемы и перспективы

При всех преимуществах интеллектуальные системы освещения на базе IoT имеют и ряд проблем. Во-первых, надёжность: беспроводные сети могут испытывать помехи (Wi-Fi страдает перегрузкой, ZigBee – ограниченным радиусом действия между стенами), а сенсоры могут давать сбои (например, PIR-датчики со временем теряют чувствительность). К тому же, часто возникает проблема совместимости устройств разных производителей и

стандартизация интерфейсов. Важно продумывать резервные сценарии (например, ручное управление) на случай сбоев [6].

Во-вторых, безопасность: IoT-устройства становятся новой уязвимостью. Известны случаи, когда в «умных» лампах и контроллерах обнаруживались критические бреши – например, в 2024 г. была выявлена уязвимость CVE-2024-0329 в Wi-Fi-светильниках Philips, связанная с хранением паролей в прошивке без шифрования. Такой сбой может позволить злоумышленнику получить доступ к сети предприятия. Поэтому при проектировании систем следует использовать защищенные протоколы (например, TLS/MQTT), своевременно обновлять прошивки и ограничивать доступ (сети офиса и IoT-шлюзы следует сегментировать) [7].

В-третьих, приватность и удобство: использование камер для распознавания людей даёт высокую точность, но вызывает опасения по поводу конфиденциальности. Альтернативой могут служить более продвинутые сенсоры и алгоритмы машинного обучения на борту (edge AI). Например, современные системы уже применяют нейросетевые модели (сжатые на устройствах типа Jetson или специализированных модулях) для распознавания человека по датчикам изображения или даже звука. Такие технологии позволяют предсказывать занятость помещения и плавно регулировать освещение под образцы поведения сотрудников (адаптивное освещение, «circadian lighting» и т.п.) [7].

Перспективы развития связаны с интеграцией ИИ и адаптивных алгоритмов. Ожидается, что появятся системы, самостоятельно обучающиеся режимам помещения, учитывающие прогноз погоды и расписание сотрудников. Широкое внедрение энергоэффективных стандартов (например, ISO 50001 по энергетическому менеджменту) и законодательные инициативы по экономии электроэнергии будут стимулировать использование таких решений. Также перспективно объединение систем освещения с другими «умными» подсистемами здания (климат, безопасность, аудит) в единую цифровую платформу [8].

Интеллектуальные системы управления освещением на базе микроэлектроники демонстрируют высокий потенциал по снижению энергопотребления офисных зданий. Современные решения сочетают диммирование светодиодов и автоматическое выключение при отсутствии людей или достаточном дневном свете. Использование программируемых микроконтроллеров (ESP32, Arduino и др.), датчиков движения и освещенности, а также сетевых протоколов (Zigbee, Wi-Fi) позволяет строить гибкие системы с коротким периодом окупаемости (1–3 года при типичных условиях).

Подводя итог, отмечаем, что переход на «умные» системы освещения соответствует современным требованиям энергоэффективности и может значительно снизить эксплуатационные расходы офиса. Рекомендуется дальнейшее распространение таких систем с учётом разработок в области ИИ и стандартов энергосбережения.

Источники

1. Ахметзянов А.М., Шарафутдинов Р.М. Энергосбережение в системах освещения зданий // Вестник Казанского технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 5. – С. 112–117.
2. Редькин А.Н., Клюкин Н.А., Чичерин А.Н. Энергоэффективные системы освещения зданий на основе микроконтроллеров // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2022. – № 4. – С. 42–49.
3. U.S. Department of Energy. Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings. – Washington: DOE, 2020. – 56 p.
4. Karmiris G., Papachristos D., Foteinopoulou K. Smart lighting control system using low-cost wireless sensor networks // Energy and Buildings. – 2021. – Vol. 251. – P. 111345.
5. Razzaque M.A., Milojevic-Jevric M., Palade A., Clarke S. Middleware for Internet of Things: A survey // IEEE Internet of Things Journal. – 2016. – Vol. 3, No. 1. – P. 70–95.
6. CVE Details. CVE-2024-0329: Philips Wi-Fi Lightbulb Vulnerability. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cvedetails.com/cve/CVE-2024-0329/> (дата обращения: 01.05.2025).
7. Шувалов А.С., Васильев В.Н. Архитектура систем интеллектуального освещения зданий на основе интернета вещей // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2023. – № 1. – С. 33–39.
8. Кривошеин И.А., Латипов А.И. Интеллектуальные технологии управления освещением офисных помещений // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 3. – С. 18–25.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ МИКРОСЕНСОРОВ НА БАЗЕ LoRaWAN ДЛЯ УДАЛЁННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМАМИ

Мошкова М. Л.¹, Востриков Д.Ю.², Сандаков В.Д.³

¹ ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

^{2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ fayazshaykh@gmail.com, ² denisesenina@yandex.ru, ³ vitalysandakov@gmail.com

В статье рассматриваются вопросы применения беспроводных микросенсорных узлов на базе протокола LoRaWAN для дистанционного мониторинга и управления энергосистемами. Рассматриваются технологии LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) и их место среди IoT-сетей, в частности особенности LoRaWAN: дальность передачи до нескольких километров при крайне низком энергопотреблении. Описывается архитектура типового микросенсорного узла (датчики + микроконтроллер + LoRa-модуль + аккумулятор) и его связь со шлюзом (gateway) и серверной частью. Особое внимание уделено энергоэффективности узлов: режимам глубокого сна микроконтроллера, оптимизации параметров LoRa (спрединг-фактор, кодовое отношение, мощность) для продления автономной работы. Приводятся примеры использования LoRaWAN-узлов в электроэнергетике и коммунальной сфере: удалённый мониторинг высоковольтных опор (вибрации и наклон), интеллектуальное учёт потребления, контроль инфраструктуры энергетики.

Ключевые слова: LoRaWAN, LPWAN, беспроводные сенсоры, микроконтроллер, энергоэффективность, энергосистема, удалённый мониторинг, микросистема, IoT.

USE OF LoRaWAN-BASED WIRELESS MICROSENSORS FOR REMOTE MANAGEMENT OF POWER SYSTEMS

Moshkova M. L.¹, Vostrikov Denis Yurievich², Sandakov Vitaly Dmitrievich³

¹ KNRTU, Kazan, Russia

^{2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹fayazshaykh@gmail.com, ²denisesenina@yandex.ru, ³vitalysandakov@gmail.com

This paper analyzes the use of wireless microsensor nodes based on the LoRaWAN protocol for remote monitoring and control of power systems. LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) technologies and their role in IoT networks are reviewed, focusing on the characteristics of LoRaWAN: multi-kilometer range communication with very low power consumption. The architecture of a typical sensor node (sensors + microcontroller + LoRa

module + battery) and its connectivity to the gateway and server infrastructure are described. Special emphasis is placed on node energy efficiency: deep sleep modes of microcontrollers, and optimization of LoRa parameters (spreading factor, coding rate, transmit power) to extend battery life. Examples of LoRaWAN deployments in the energy sector and utility services are provided, such as remote monitoring of high-voltage line pylons (vibration and tilt sensing), smart metering, and infrastructure monitoring.

Keywords: LoRaWAN, LPWAN, wireless sensors, microcontroller, energy efficiency, power system, remote monitoring, microelectronic system, IoT.

В последние годы наблюдается стремительное развитие IoT-технологий и «умных» сетей, в которых удалённый сбор данных и управление становятся возможными благодаря массовому внедрению низкопотребляющих беспроводных устройств. В энергосистемах это открывает новые перспективы: «умные» датчики могут контролировать параметры линий электропередачи, подстанций, счетчиков потребления и т. д., обеспечивая повышение надёжности и эффективности сетевой инфраструктуры. При этом ограничение на потребляемую мощность (часто автономное питание от батарей) и требование на большую дальность связи делают традиционные протоколы (Wi-Fi, GSM) менее пригодными.

Обзор технологий LPWAN и место LoRaWAN:

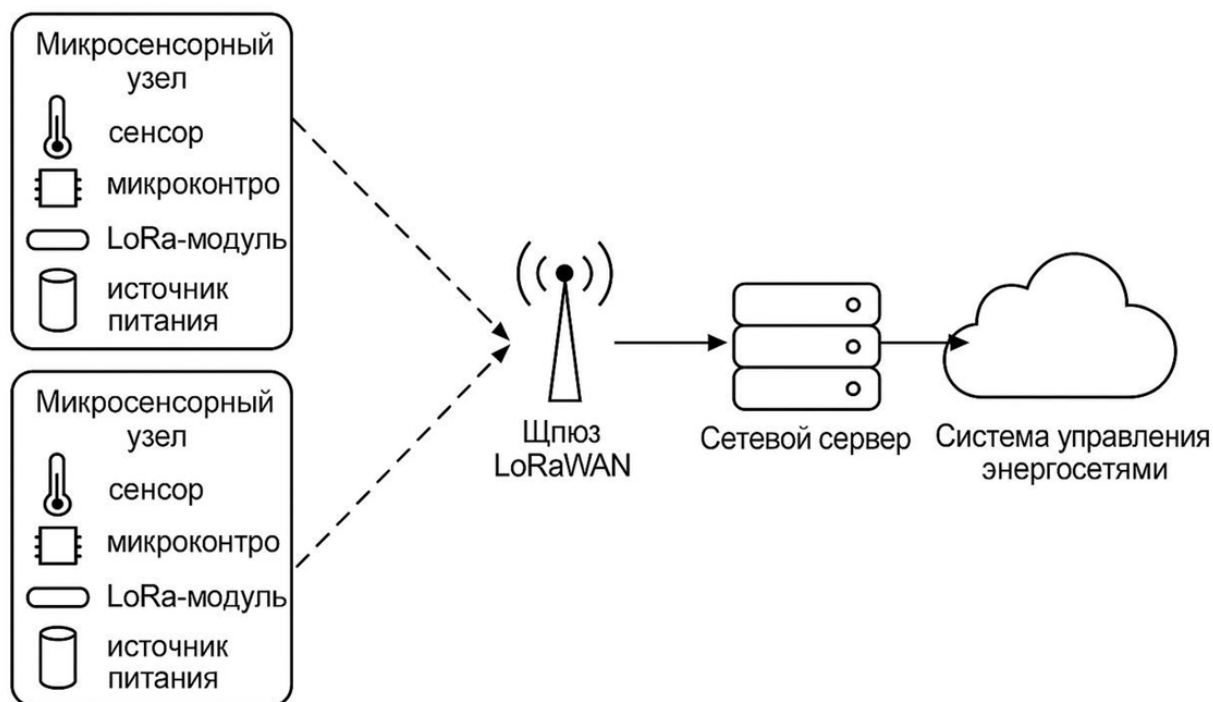
По топологии LoRaWAN-сеть организована по схеме «звезда» или «звезда из звёзд». Каждый сенсорный узел напрямую связывается с одним или несколькими шлюзами в зоне покрытия, а шлюзы пересылают данные на центральный сервер. Такая архитектура упрощает развертывание: достаточно установить несколько базовых станций (гейтов), чтобы охватить большую территорию. Шлюзы могут подключаться к серверу через Ethernet, сотовую сеть или спутник. На сервере данные обрабатываются и передаются в конечное приложение для анализа и принятия решений. Обратный канал используется для управления устройствами и обновления ПО [1].

В сравнении с другими LPWAN LoRaWAN выгодно отличается открытостью спецификации и широким комьюнити. Сертифицированные LoRaWAN-модули (например, на базе микросхем Semtech SX127x) доступны различным производителям.

Архитектура микросенсорной системы:

Типичный беспроводной микросенсорный узел на базе LoRaWAN включает в себя следующие компоненты: сенсор (датчик) для измерения физического параметра (температура, ток, напряжение, вибрация, качество воздуха и др.), микроконтроллер для сбора и обработки данных, радиомодуль LoRa и источник питания (обычно батарея или аккумулятор). Кроме того, в узле могут быть вспомогательные компоненты: АЦП (если датчик

аналоговый), программируемый регулятор питания, часы реального времени, датчики движения или протечки, интерфейсные конвертеры [2].



Работа LoRaWAN системы

Микроконтроллеры. В узле обычно применяются энергоэффективные 32- или 16-разрядные микроконтроллеры семейства ARM Cortex-M (например, STM32L0/L4, Nordic nRF52, TI CC1310), а также специализированные радиочипы с встроенным MCU (STM32WL, Microchip SAMR34 и др.).

Такие МК имеют ультранизкий ток потребления в режиме сна (десятки наноампер–микроампер) и поддерживают различные интерфейсы (SPI, I²C, UART) для датчиков. В активном режиме они собирают показания датчиков, выполняют минимальную обработку (фильтрацию, усреднение, шифрование) и формируют пакет. После передачи по LoRa или получения команды от сервера узел снова уходит в режим глубокого сна [3].

LoRa-модуль. Радиомодуль LoRa на основе чипа Semtech (SX1276/78/79 и др.) обеспечивает дальнюю связь. Модули работают в недорогом ISM-диапазоне (868/915 МГц), имеют программируемую выходную мощность (обычно до +14...+20 дБм) и настраиваемые параметры модуляции: спрэдинг-фактор (SF7–SF12), кодовое отношение (CR) и ширину канала (BW) [4].

Датчики и периферия. В зависимости от задачи в узле устанавливаются разные сенсоры. В энергосистемах типичны следующие примеры: токовые

датчики (щупы, шунты, трансформаторы тока) и датчики напряжения для контроля линий и счётчиков, температурные датчики (для проверки перегрева оборудования), акселерометры и гироскопы (для мониторинга вибрации опор и конструкций), а также датчики давления и газовые сенсоры (для контроля утечек в газовых системах).

Источники питания. Большинство LoRaWAN-узлов питается от литиевых батарей или аккумуляторов. Благодаря малому энергопотреблению, срок работы может достигать нескольких лет.

В совокупности такая архитектура обеспечивает автономный узел, способный раз в заданный интервал (или по событию) просыпаться, измерять параметры и отправлять результат на сервер. Остальное время узел находится в «глубоком сне», экономя энергию. Как отмечено в литературе, при правильно выбранной конфигурации LoRaWAN-устройство на батарее 2400 мА·ч может проработать год при отправке одного сообщения каждые 5 минут и до нескольких лет при редких посылках [5].

Энергоэффективность и автономность:

Ключевая особенность LoRaWAN-сенсоров – их низкое энергопотребление, позволяющее достигать автономии в годах. Энергоэффективность достигается на всех уровнях системы:

- Режимы сна микроконтроллера. Современные МК обладают режимами глубокого сна (standby, shutdown), когда потребление падает до десятков или даже единиц микроампер.

- Оптимизация параметров LoRa. LoRaWAN позволяет гибко настраивать параметры модуляции, влияющие на дальность и длительность передачи. Так, увеличение спрэдингового фактора (SF) расширяет радиус действия, но увеличивает длительность кадра (time-on-air) и, соответственно, энергопотребление.

- LoRaWAN-классы. Протокол предусматривает разные классы устройств (A, B, C), различающиеся политикой приёма команд от сети [6].

Класс А наиболее энергоэффективен: каждое сообщение по необходимости инициируется устройством, а окна приёма очень коротки. Именно класс А используется в подавляющем большинстве датчиков (устойчивый режим работы, максимальное время сна). Классы В и С обеспечивают более низкие задержки приёма, но требуют большей активности радиоприёмника и подходят для узлов с постоянным питанием (например, электропитание от сети).

- Компоненты микроэлектроники. Выбор микроконтроллеров с малым током в спящем режиме, энергоэффективных датчиков и регуляторов питания прямо влияет на автономность узла. Например, применение МК с ULP режимами и датчиков с цифровым интерфейсом может снизить

потребление схемы в неактивном режиме до единиц микроампер. Кроме того, современные LoRa-чипы поддерживают функции энергосбережения (выключение синтезатора вне передачи).

Исследования подтверждают, что при хорошо спроектированной системе LoRaWAN-узел действительно может работать от батареи годами. В [10†L884-L892] показано, что изменение SF и CR напрямую изменяет потребляемую энергию – чем выше SF (большая дальность), тем выше энергозатраты на передачу. Это учитывается при настройке сети: узел, находящийся близко к шлюзу, может использовать меньший SF (и быстрее отправлять данные), а дальнобойные узлы – наоборот. В совокупности такой подход позволяет сбалансировать дальность покрытия и долговечность автономных узлов в энергетической сети [8].

Примеры применения в энергосистемах:

В энергетической отрасли и ЖКХ LoRaWAN-модемы уже нашли ряд прикладных применений для удалённого мониторинга и управления. Вот несколько современных примеров:

- Мониторинг опор ЛЭП. Одним из приводимых кейсов является установка LoRaWAN-узлов на высоковольтных опорах для контроля их состояния. Сенсорный узел оснащается акселерометром, который фиксирует вибрации или наклон опоры (от воздействия ветра или землетрясений). Микроконтроллер периодически считывает эти показания и передаёт их по LoRaWAN-шлюзу на сервер [7].

- Умные счётчики и учёт энергопотребления. LoRaWAN-узлы применяются для интеграции «умных» электрических, водяных и тепловых счётчиков в сетях ЖКХ. Например, коммерческие решения используют LoRa модули для передачи показаний счетчиков в центральную систему без прокладки проводов и сотовой связи.

- Контроль инфраструктуры. В электроэнергетике устанавливают датчики тока/напряжения и состояния оборудования (температурные датчики на трансформаторах, датчики изоляции линий) с LoRaWAN-коммутацией. Это позволяет удалённо отслеживать перегрузки и перегрев, и, при необходимости, автоматически отключать проблемные участки сети [6].

- Промышленные и коммунальные применения. Известны случаи применения LoRaWAN в нефтегазовых и водохозяйственных сетях для мониторинга давления и состава газа в трубопроводах, а также контроля выбросов и утечек. Например, LoRaWAN-датчики качества воды используются для контроля состояния резервуаров, а датчики утечки газа – для оперативного информирования аварийных служб [5].

Таким образом, беспроводные микросенсорные сети на базе LoRaWAN представляют собой эффективное средство для удалённого мониторинга и

управления энергосистемами. Благодаря архитектуре LPWAN – связи на большие расстояния при крайне низком энергопотреблении – такие решения могут работать автономно годами, что особенно важно для распределённых «умных» сетей. В статье рассмотрены ключевые аспекты: обзор технологий LPWAN, особенности протокола LoRaWAN, аппаратная архитектура микросенсорного узла и методы энергоэффективности. Показано, что оптимизация параметров LoRa и использование современных микроконтроллеров позволяют значительно продлить срок службы датчиков. В перспективе развитие технологий микроэлектроники (интегрированные LoRa-MCU, энерго Harvesting, новые датчики) и расширение стандартов LPWAN (напр., объединение с NB-IoT/LTE-M) будут способствовать ещё большей эффективности автономных энергосистем.

Источники

1. Casals L., Mir B., Vidal R., Gomez C. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN // Sensors. – 2017. – Vol.17, №10. – P.2364. DOI:10.3390/s17102364.
2. Bouguera T., Diouris J.-F., Chaillout J.-J., Jaouadi R., Andrieux G. Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN // Sensors (Basel). – 2018. – Vol.18, №7. – P.2104. DOI:10.3390/s18072104.
3. LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). // Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/LoRaWAN> (дата обращения: 01.05.2025).
4. Hardesty G. LoRaWAN Compared to NB-IoT: Low Power WAN Technologies LPWAN // IoT – Internet of Things (Blog). – 2024. – November 6. – Режим доступа: <https://www.data-alliance.net/lorawan-vs-nb-iot> (дата обращения: 01.05.2025).
5. Дьяконов В. П. LoRa и LoRaWAN: технологии, особенности применения и перспективы развития // Радио. – 2020. – № 2. – С. 30–35.
6. Захаров, А. С., Мельников, И. В. Применение беспроводных сенсорных сетей в системах мониторинга энергетического оборудования // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2021. – № 6. – С. 48–52.
7. Селиванов, К. П. Системы мониторинга электроснабжения с использованием Интернета вещей (IoT) // Вестник НГТУ. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 111–118.
8. Павлов, Ю. А., Корчагин, С. И. Проблемы и решения в области повышения надежности систем электроснабжения промышленных объектов // Электротехника. – 2021. – № 7. – С. 60–65.

РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ В СНИЖЕНИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

Мухутдинов К.Р.¹, Хамитов А.Р.², Калимуллин Р.И.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹79872359491mk@gmail.com, ²ainurkhamitov322@gmail.com

В данной статье рассматривается роль органических полупроводников в снижении энергопотребления электронных устройств. Особое внимание уделяется их уникальным свойствам, таким как гибкость, лёгкость и возможность создания прозрачных и полупрозрачных устройств. Также обсуждается влияние органических полупроводников на выбор материалов для различных применений в электронике.

Ключевые слова: органические полупроводники, электронные устройства, снижение энергопотребления, гибкость, лёгкость, прозрачность, *OLED*, органические солнечные батареи, органические транзисторы, выбор материалов.

THE ROLE OF ORGANIC SEMICONDUCTORS IN REDUCING THE ENERGY CONSUMPTION OF ELECTRONIC DEVICES AND THEIR IMPACT ON THE CHOICE OF MATERIALS

Mukhutdinov K.R.¹, Khamitov A.R.², Kalimullin R.I.³

^{1,2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹79872359491mk@gmail.com, ²ainurkhamitov322@gmail.com

This article examines the role of organic semiconductors in reducing the energy consumption of electronic devices. Special attention is paid to their unique properties, such as flexibility, lightness, and the ability to create transparent and semi-transparent devices. The influence of organic semiconductors on the choice of materials for various applications in electronics is also discussed.

Keywords: organic semiconductors, electronic devices, reduced energy consumption, flexibility, lightness, transparency, *OLED*, organic solar panels, organic transistors, choice of materials.

В современном мире электронные устройства становятся всё более распространёнными и играют важную роль в повседневной жизни людей. Однако с ростом числа устройств увеличивается и потребление энергии, что приводит к необходимости поиска новых решений для снижения

энергопотребления. Одним из перспективных направлений является использование органических полупроводников, которые обладают рядом уникальных свойств, делающих их привлекательными для применения в электронике.

Органические полупроводники – это вещества, состоящие из органических молекул или полимеров, которые по своим электрическим свойствам находятся между проводниками и изоляторами. Они могут проводить электрический ток при определённых условиях, но их проводимость значительно ниже, чем у металлов. Основные свойства органических полупроводников включают гибкость, лёгкость и прозрачность или полупрозрачность. Органические полупроводники могут быть гибкими и эластичными, что позволяет создавать устройства, которые можно сгибать и деформировать без потери функциональности. Органические материалы обычно имеют меньшую плотность по сравнению с неорганическими полупроводниками, что делает их более лёгкими и удобными для использования в портативных устройствах. Некоторые органические полупроводники могут быть прозрачными или полупрозрачными, что открывает возможности для создания устройств с новыми визуальными эффектами и функциями [1].

Органические полупроводники используются в различных областях электроники из-за их особенных свойств. Некоторые из наиболее перспективных направлений включают органические светодиоды (*OLED*), органические солнечные батареи и органические транзисторы. *OLED*-дисплеи используются в телевизорах, смартфонах и других устройствах благодаря своей высокой контрастности, широкому углу обзора и возможности создания гибких дисплеев [2]. Органические полупроводники могут быть использованы для создания солнечных батарей, которые могут быть интегрированы в здания, одежду и другие поверхности [3]. Органические транзисторы могут быть использованы для создания гибких и прозрачных электронных устройств, таких как сенсоры, логические схемы и память.

Так, выбирая материалы для электронных устройств, нужно обращать внимание не только на их электропроводность, но и на гибкость, устойчивость к температурам и другие параметры. Органические полупроводники предлагают новые возможности для создания устройств с уникальными свойствами, но также имеются определённые требования к выбору материалов. Например, для создания гибких устройств необходимо использовать материалы, которые могут выдерживать деформации без разрушения. Также важно учитывать совместимость органических

полупроводников с другими материалами, такими как металлы и диэлектрики.

Кроме того, органические полупроводники могут способствовать снижению энергопотребления за счёт уменьшения веса и объёма электронных устройств. Это приобретает особую значимость для мобильных гаджетов, таких как смартфоны и ноутбуки, где важны компактность и лёгкость – любая прибавка в весе или объёме имеет значение.

Ещё одним важным аспектом является возможность создания прозрачных и полупрозрачных устройств на основе органических полупроводников. Это способствует появлению инновационных решений в области внешнего вида и функциональности электронных устройств. Например, прозрачные OLED-дисплеи могут быть интегрированы в окна или стены, создавая уникальные визуальные эффекты и экономя энергию за счёт снижения необходимости в дополнительном освещении.

Однако использование органических полупроводников также имеет свои ограничения и вызовы. Например, они могут быть менее стабильными и долговечными по сравнению с неорганическими полупроводниками. Кроме того, органические материалы могут быть более чувствительны к воздействиям окружающей среды, таким как влажность и температура. Поэтому при выборе органических полупроводников необходимо учитывать не только их преимущества, но и потенциальные ограничения [4].

Нами был проведён анализ роли органических полупроводников в снижении энергопотребления электронных устройств и оценены перспективы их применения в различных приложениях, таких как гибкие дисплеи, сенсоры и осветительные системы. Результаты исследования показали, что использование органических полупроводников может значительно снизить энергопотребление устройств благодаря их уникальным электронным свойствам и способности эффективно преобразовывать энергию. Это открывает новые возможности для разработки более энергоэффективных и экологически чистых электронных устройств, что особенно важно в условиях растущего спроса на портативные и мобильные технологии.

В заключение, органические полупроводники представляют собой важный шаг вперёд в области электроники и могут сыграть ключевую роль в снижении энергопотребления и повышении эффективности электронных устройств. Их применение может способствовать развитию более устойчивых и экологически безопасных технологий, что является важной задачей современного общества.

Источники

1. Демидов А.А., Рыбалка С.Б. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020-2030 гг.) // Прикладная математика & Физика. 2021. Т. 53. № 1. С. 53-72.
2. Подольный А.В., Мастыкаш А.А. Особенности устройства органических светодиодов и перспективы развития технологии OLED // В сборнике: К вершинам познания. материалы IX Международной научно-практической конференции. Тюмень, 2019. С. 20-21.
3. Кулдашев Ж.Ш.У. Перспективы применения органических полупроводников в солнечных батареях // В сборнике: Актуальные и перспективные научные исследования. сборник статей III Международной научно-практической конференции. Пенза, 2024. С. 24-26.
4. Шишов Д.И. Использование органических полупроводников в наноэнергетике // Теория и практика современной науки. 2023. № 6 (96). С. 215-223.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В РАЗРАБОТКЕ ГИБКИХ И ПРОЗРАЧНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Мухутдинов К.Р.¹, Хамитов А.Р.², Калимуллин Р.И.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹79872359491mk@gmail.com, ²ainurkhamitov322@gmail.com

В статье анализируется применение нанотехнологий для создания гибких и прозрачных накопителей энергии. Обсуждаются свойства материалов, таких как графен и нанокomпозиты, а также различные типы накопителей: суперконденсаторы, органические солнечные батареи, гибкие литий-ионные батареи и наногенераторы. Поднимаются проблемы производства, стабильности и интеграции устройств. Подчёркивается значимость исследований для развития накопителей энергии нового поколения.

Ключевые слова: нанотехнологии, гибкие и прозрачные накопители энергии, двумерные материалы, наночастицы, нанокomпозиты, суперконденсаторы, органические солнечные батареи, наногенераторы.

NANOTECHNOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF FLEXIBLE AND TRANSPARENT ENERGY STORAGEES

Mukhutdinov K.R.¹, Khamitov A.R.², Kalimullin R.I.

^{1,2,3} KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan

¹79872359491mk@gmail.com, ²ainurkhamitov322@gmail.com

The article analyzes the application of nanotechnology to create flexible and transparent energy storages. The properties of materials such as graphene and nanocomposites are discussed, as well as various types of energy storages: supercapacitors, organic solar cells, flexible lithium-ion batteries and nanogenerators. Issues of production, stability, and device integration are being raised. The importance of research for the development of new generation energy storages is emphasized.

Keywords: nanotechnology, flexible and transparent energy storage, two-dimensional materials, nanoparticles, nanocomposites, supercapacitors, organic solar panels, nanogenerators.

В современном мире наблюдается стремительное развитие технологий, и одной из наиболее перспективных областей являются нанотехнологии. Они открывают новые горизонты в разработке инновационных материалов и устройств, включая гибкие и прозрачные накопители энергии. Эти

устройства могут стать основой для создания новых поколений электронных устройств, от смартфонов до носимых технологий и даже умных окон.

Нанотехнологии представляют собой область науки и техники, которая занимается изучением и использованием свойств материалов на атомном и молекулярном уровне. Это дает возможность разрабатывать инновационные материалы с особыми характеристиками, например, с высокой прочностью, эластичностью, прозрачностью и способностью проводить электрический ток.

Гибкие и прозрачные накопители энергии – это устройства, способные накапливать и отдавать электрическую энергию, сохраняя при этом гибкость и прозрачность. Они могут быть использованы в различных областях, включая электронику, медицину, энергетику и архитектуру [1].

Основные принципы работы таких накопителей основаны на использовании наноструктур и материалов с особыми свойствами. Например, графен и другие двумерные материалы обладают высокой электропроводностью, гибкостью и прозрачностью, что делает их идеальными для использования в качестве электродов накопителей. Кроме того, графен может быть модифицирован для улучшения его свойств, таких как ёмкость и скорость зарядки.

Наночастицы металлов и полупроводников могут быть использованы для улучшения электропроводности и ёмкости накопителей. Наноккомпозиты, состоящие из наночастиц и полимеров, могут обеспечить баланс между гибкостью, прозрачностью и электрохимическими характеристиками [2].

Электроды с наноструктурированной поверхностью могут увеличить площадь контакта между электродом и электролитом, что улучшает эффективность накопления энергии. Это имеет большое значение для гибких накопителей, где размер их электродов ограничен.

Нанопокрывтия и наноплёнки могут быть нанесены на поверхность накопителей для защиты от внешних воздействий, таких как влага и пыль. Это увеличивает срок службы и надёжность устройств [3].

Существует несколько типов гибких и прозрачных накопителей энергии, которые имеют свои особенности и применения. Одними из таких являются суперконденсаторы (ионисторы), обеспечивающие высокую плотность мощности и быструю зарядку/разрядку. Они могут быть изготовлены с использованием графена и других двумерных материалов, что делает их гибкими и прозрачными.

Органические солнечные батареи преобразуют солнечную энергию в электрическую и могут быть изготовлены из органических полупроводников. Они обладают гибкостью и прозрачностью, что позволяет интегрировать их в окна и другие поверхности [4].

Гибкие литий-ионные батареи—это традиционные литий-ионные батареи, адаптированные для гибких применений с использованием нанотехнологий. Это позволяет создавать лёгкие и гибкие источники энергии для портативных устройств.

Наногенераторы генерируют электричество из механических колебаний, таких как вибрация или движение. Они могут быть интегрированы в одежду, обувь и другие предметы, обеспечивая питание для носимых устройств [4].

Разработка гибких и прозрачных накопителей энергии с использованием нанотехнологий открывает новые перспективы для различных отраслей. Однако существуют и вызовы, которые необходимо преодолеть. Одним из таких вызовов является сложность производства, заключающаяся в том, что создание наноструктур и материалов требует сложных и дорогостоящих процессов. Это подвигает к разработке более эффективных и экономичных методов производства.

Кроме того, гибкие и прозрачные накопители должны быть стабильными и долговечными при различных условиях эксплуатации. Поэтому возникает необходимость провести дополнительные исследования для улучшения их характеристик.

Гибкие и прозрачные накопители могут быть интегрированы с другими электронными устройствами и системами, что требует разработки новых интерфейсов и стандартов [5].

Нами был проведён анализ применения нанотехнологий в разработке гибких и прозрачных накопителей энергии и оценены перспективы их использования в различных областях. Результаты исследования показали, что благодаря уникальным свойствам наноматериалов, таким как высокая электропроводность, гибкость и прозрачность, возможно создание новых поколений накопителей энергии, которые могут быть интегрированы в различные устройства, включая портативную электронику, солнечные панели и даже одежду. Это дает возможности для прогресса в сфере технологий, которые эффективно используют энергию и не наносят вред окружающей среде.

Подводя итог, нанотехнологии играют важную роль в создании гибких и прозрачных накопителей энергии, что способствует появлению новых решений в области электроники и энергетики. С их помощью можно создать устройства, которые будут не только эффективными, но и эстетически привлекательными. Будущее этой области зависит от дальнейших исследований и разработок, которые помогут преодолеть существующие вызовы и воплотить в жизнь идеи, которые ранее казались невозможными.

Исходя из этого, устойчивые решения в энергетике – это наш путь к более экологичному и продвинутому будущему.

Источники

1. Джумадурдыев Т., Аннагелдиев М., Годыков П. Наноматериалы и нанотехнологии: создание новых материалов с уникальными свойствами, применение нанотехнологий в медицине, электронике // В сборнике: Научные открытия 2024. Сборник материалов LV международной очно-заочной научно-практической конференции. В 3-х томах. Москва, 2024. С. 57-61.

2. Суздалев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. Москва: Либроком, 2018. 589 с.

3. Кашарнов А.И. Наноматериалы и нанотехнологии: перспективы технологического перевооружения в энергетике // В сборнике: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Нанотехнологии и наноматериалы». Сборник статей III Всероссийской научно-технической конференции. Анапа, 2021. С. 137-141.

4. Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Шестопалова Т.А., Юриков В.А. Гибридные энергокомплексы на основе возобновляемых источников энергии // Вестник КРСУ. 2012. № 10 (12). С. 11-17.

5. Усачёва И.В., Гладкая Е.А., Ландин С.В. Гибридные накопители энергии: проблемы и перспективы технологий хранения энергии» // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236. №4. С. 149-167.

РИСКИ И УГРОЗЫ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВА ТЭЦ

Князев Б.Д.¹, Миронова Е.А.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

mrdonda@vk.com

В статье рассмотрены ключевые риски и угрозы энергетической безопасности России, включая технологические, экологические и экономические вызовы, а также предложены стратегии их минимизации через модернизацию инфраструктуры, управление рисками.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, риски и угрозы, модернизация инфраструктуры, управление рисками.

RISKS AND THREATS IN THE ENERGY PRODUCTION SYSTEM OF CHP PLANTS

Knyazev B.D.¹, Mironova E.A.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan

mrdonda@vk.com

The article examines key risks and threats to Russia's energy security, including technological, environmental, and economic challenges, and proposes strategies for their mitigation through infrastructure modernization, risk management.

Keywords: energy security, risks and threats, infrastructure modernization, risk management.

Главная задача энергетики – бесперебойное обеспечение электрической и тепловой энергией всех её потребителей. Достичь эту задачу можно только при наличии энергетической безопасности. Риски и угрозы в энергетике – это потенциальные события или факторы, способные нарушить устойчивую работу энергосистемы, привести к авариям, финансовым потерям или дефициту энергоресурсов. Угрозы – это внешние факторы, а риски – внутренние потенциальные проблемы. Угрозы носят агрессивный, враждебный характер, возникают внезапно и непредсказуемо, полностью неконтролируемы персоналом станции, а риски – связаны с эксплуатацией оборудования, могут прогнозироваться и минимизироваться и напрямую зависят от качества управления станционным оборудованием и персоналом.

Критический износ оборудования, кибератаки на системы управления, каскадные аварийные отключения, внеплановые остановки выработки энергии, а также дефицит квалифицированного персонала – это основные риски в системе энергопроизводства на электрических станциях любого типа. Эти риски наиболее опасны, так как способны вызывать техногенные катастрофы, в том числе и с человеческими жертвами, длительные перебои в энергоснабжении целых регионов и значительные экономические потери, как и для самой станции, так и для потребителей энергии.

Для обеспечения стабильной работы станции необходим системный подход к устранению ключевых проблем. Старение оборудования – основная проблема, которая требует внедрения современных методов диагностики, а именно комплексный мониторинг. Вместе с этим должна осуществляться плановая замена наиболее изношенных агрегатов на современные, эксплуатационные характеристики которых лучше прежних. Реализация данных мер требует четкого планирования и поэтапного внедрения с учетом технологических и экономических факторов.

В современных политических условиях кибербезопасность систем управления также требует особого внимания. Основным принцип решения данной проблемы – физическое разделение сетей управления и корпоративных информационных систем. Необходимо реализовать многоуровневую системы защиты, которая будет сочетать в себе как организационные, так и технические меры.

Предотвращение каскадных аварийных отключений требует комплексной модернизации систем защиты и управления энергосистемой. Ключевое значение имеет переход на современные микропроцессорные устройства релейной защиты, которые обладают большей точностью и быстродействием по сравнению с уже устаревшими электромеханическими аналогами. Но эффективная защита невозможна без интеллектуальных систем автоматического регулирования, способных в реальном времени анализировать состояние сети и оперативно перераспределять нагрузку между всеми элементами системы. Особую роль в обеспечении надежности играет создание резервных генерирующих мощностей. Такими, например, могут быть высокоманевренные газотурбинные установки, способные компенсировать внезапные потери мощности. Дополнительную устойчивость системе придают локальные источники генерации и системы накопления энергии, позволяющие поддерживать электроснабжение критически важных потребителей в аварийных ситуациях. Важно отметить, что все эти элементы должны быть тщательно интегрированы в единую систему управления, проходить регулярное тестирование и обслуживание для поддержания

постоянной готовности к работе в экстренных условиях. Только такой комплексный подход позволяет обеспечить максимальную надежность.

Снижение внеплановых простоев станций достигается внедрением системы мониторинга оборудования в реальном времени, позволяющей перейти от планового обслуживания к ремонтам по фактическому состоянию. Ключевыми элементами являются: цифровые датчики контроля параметров, алгоритмы прогнозирования износа, стратегические запасы критичных комплектующих и четкие регламенты аварийного восстановления. Такой подход требует обновления инфраструктуры и, в том числе, переподготовки персонала, что существенно повысит надежность энергоснабжения.

Для преодоления кадрового дефицита необходимо массовое создание современных учебных центров, которые позволят отрабатывать как штатные, так и аварийные режимы работы оборудования. Такой подход уже применяется в учебном центре «Алабуга» в городе Елабуга. Эффективным дополнением станет внедрение системы наставничества и программ ускоренной подготовки ключевых специалистов. Одновременно требуется обеспечение конкурентоспособных условий труда и разработка системы непрерывного обучения с регулярной аттестацией персонала. Реализация этих мер позволит не только восполнить текущую нехватку квалифицированных кадров, но и создать устойчивый кадровый резерв для энергетической отрасли.

Наибольшую опасность для стабильной работы станций представляют экстремальные внешние угрозы, включая террористические акты и военные действия, способные вывести из строя ключевое оборудование. Природные катаклизмы – ураганы, наводнения и другие стихийные бедствия – создают риск масштабных разрушений инфраструктуры. Отдельную категорию составляют киберугрозы, особенно скоординированные атаки государственного уровня, которые могут парализовать системы управления. Наконец, полное прекращение поставок топлива вследствие геополитических или логистических кризисов способно остановить работу станции. Эти угрозы требуют разработки специальных мер защиты, включая физическую охрану объектов, дублирование критических систем, создание резервных запасов топлива и усиление кибербезопасности.

Таким образом, риски возможно контролировать в большей мере, что нельзя сказать про угрозы. На сегодняшний день существуют различные математические методы анализа рисков и угроз, как, например, «дерево отказов» и «матрица вероятностей». Для расчетов рисков и угроз, от исполнителя требуется полное понимание функционирования системы

энергопроизводства. Это создаст надежность и бесперебойность энергоснабжения.

Источники

1. Жилкина Ю.В. Экономический механизм инновационного управления энергетической безопасностью // III Манякинские чтения. Материалы международной научно-практической конференции. – Омск: Изд-во Российского государственного торгово-экономического университета, Омский институт (филиал), 2014.

2. Возжеников А.В., Прохожев А.А. Безопасность России: современное понимание, обеспечение. – М.: Росэкономфонд «Созидание», 1998. – С. 22.

ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ЭКРАНА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Мухаметова А.Р.¹, Гибадуллин Р.Р.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

mukhametova.15@mail.ru

Статья посвящена актуальной проблеме снижения наведенного напряжения в кабельных линиях, которое может возникать под воздействием внешних электромагнитных полей (например, от соседних ЛЭП, тяговых сетей, грозовых разрядов) и представлять опасность для персонала и оборудования.

Ключевые слова: кабельные линии, наведенное напряжение, экран кабеля, экранирование, электробезопасность, выбор сечения, сечение экрана, снижение напряжения.

SELECTION OF CABLE LINE SHIELD CROSS-SECTION TO REDUCE INDUCED VOLTAGE

Mukhametova A.R.¹, Gibadullin R.R.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

mukhametova.15@mail.ru

The article is devoted to the urgent problem of reducing the induced voltage in cable lines, which can arise under the influence of external electromagnetic fields (for example, from neighboring power lines, traction networks, lightning discharges) and pose a danger to personnel and equipment.

Keywords: cable lines, induced voltage, cable shield, shielding, electrical safety, selection of cross-section, screen cross-section, voltage reduction.

Современные энергетические и коммуникационные системы требуют прокладки большого количества кабельных линий, часто расположенных в непосредственной близости друг к другу или к источникам сильных электромагнитных полей, таким как воздушные линии электропередачи и электрифицированный рельсовый транспорт.

Одним из наиболее эффективных способов борьбы с наведенным напряжением является использование экранирующих оболочек кабелей. Экран представляет собой проводящий слой, который может быть выполнен в виде оплетки, ленты или трубки, и он окружает жилы кабеля. Основная

функция экрана в данном контексте заключается в создании пути для протекания индуцированного тока, что в свою очередь вызывает образование собственного электромагнитного поля, которое частично или полностью компенсирует поле источника наводки [1].

Ключевым параметром экрана, который определяет его эффективность в снижении наведенного напряжения, является его сечение. Повышение сечения провода экрана позволяет увеличить проводимость и тем самым улучшает его способность к отведению индукционных токов, тем самым уменьшая уровень наведенного напряжения. Этот аспект становится особенно важным в условиях интенсивного электромагнитного воздействия, когда кабели работают в повышенной близости к источникам помех.

Экранирующие оболочки должны быть корректно спроектированы и установлены, чтобы обеспечить максимальную защиту от наведенных напряжений. Использование высококачественных проводящих материалов для экранов, таких как медь или алюминий, в сочетании с правильной геометрией и толщиной экрана, позволяет добиться надежной защиты от негативных эффектов электромагнитной индукции, что является критически важным для долговечности и безопасности работы кабельных систем [2].

Наведенное напряжение в кабельных линиях возникает преимущественно по двум причинам:

1. электромагнитная индукция - переменные магнитные поля, создаваемые токами в соседних проводниках (ЛЭП, рельсы), пронизывают контур, образованный жилами кабеля, его экраном и землей (или другими проводящими структурами);

2. электростатическая индукция - переменные электрические поля, создаваемые высокими потенциалами соседних проводников, могут наводить заряд на жилах и экране кабеля, изменяя их потенциал относительно земли [3].

При близком расположении кабельной линии к мощным ЛЭП или электрифицированным железным дорогам основным фактором становится электромагнитная индукция. Наведенное напряжение проявляется как разность потенциалов вдоль кабельной жилы или экрана, а также как потенциал их относительно земли. Опасность представляют потенциалы, которые могут возникнуть при прикосновении (напряжение прикосновения), а также потенциалы между различными точками поверхности земли (шаговое напряжение), возникающие из-за растекания токов экрана в земле.

При выборе сечения экрана для кабельной линии важно учитывать несколько ключевых аспектов необходимо оценить условия её эксплуатации. Если кабель находится вблизи мощных источников помех или в условиях высокой влажности, предпочтительно использовать экран с большим

сечением. При выборе сечения важно рассчитать допустимое наведенное напряжение для вашей системы, что поможет определить необходимую эффективность экранирования. В отношении выбора материалов наиболее распространены медь и алюминий: медь обеспечивает лучшие экранирующие свойства, но стоит дороже, в то время как алюминий является более экономичным вариантом, но менее эффективен. Наконец, для определения оптимального сечения экрана стоит обратиться к существующим стандартам и рекомендациям, таким как ГОСТ Р 52121-2003, который предлагает рекомендации по экранировке в зависимости от специфических условий эксплуатации [4].

Для оценки эффективности экранирования используются специальные методы испытаний и измерений. Одним из наиболее распространённых методов является измерение наведённого напряжения на кабельной линии в условиях, максимально приближённых к реальным. Также могут использоваться методы расчёта электромагнитных полей и моделирования [5].

Источники

1. Абрамов В.А. Кабельные линии электропередачи. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 288 с.
2. Алексеев В.А., Лазарев Ю.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. — М.: Энергоатомиздат, 2004. — 384 с.
3. Демченко В.И., Лукьянов А.А. Электромагнитные наводки в кабельных линиях. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 160 с.
4. Денисов А.Н., Смирнов В.А. Кабельные системы: проектирование, монтаж, эксплуатация. — М.: Энергоатомиздат, 2002. — 416 с.
5. Ковалев А.В., Лазарев Ю.В. Электромагнитная совместимость в промышленных электроустановках. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 304 с.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ ИЗ-ЗА КОРОНЫ

Мухлисуллина А.Р.¹, Валиуллина Д.М.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

MAlsuR@mail.ru

Потери мощности из-за короны являются значительным фактором, влияющим на эффективность высоковольтных линий электропередач. Коронный разряд возникает, когда напряженность электрического поля вокруг проводов превышает критический уровень, вызывая ионизацию окружающего воздуха и появление видимого разряда. Этот разряд сопровождается выделением энергии, которая уходит в окружающую среду, что приводит к потерям мощности.

Методы снижения потерь мощности из-за короны: увеличение расстояния между проводами, использование проводов большего диаметра, снижение рабочего напряжения и переход на постоянный ток. Также помогают уменьшить потери применение многожильных проводов и установка коронных колец.

Ключевые слова: потери мощности, корона, коронный разряд, энергетическая энергия, многожильный провод, коронные кольца.

POWER LOSS DUE TO CORONA

Mukhlisullina A.R.¹, Valiullina D.M.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

MAlsuR@mail.ru

Power losses due to the corona are a significant factor affecting the efficiency of high-voltage power lines. A corona discharge occurs when the electric field strength around the wires exceeds a critical level, causing ionization of the surrounding air and the appearance of a visible discharge. This discharge is accompanied by the release of energy, which goes into the environment, which leads to power losses.

Methods to reduce power losses due to corona: increasing the distance between wires, using larger diameter wires, reducing operating voltage and switching to direct current. The use of stranded wires and the installation of crown rings also help to reduce losses.

Keywords: power loss, corona, corona discharge, energy energy, stranded wire, corona rings.

Когда напряжение на проводе превышает определенный критический уровень (начальное напряжение короны), электрическое поле вблизи провода

становится достаточно сильным, чтобы ионизировать окружающий воздух. Ионизированный воздух (корона) становится проводником, и через него начинает протекать ток утечки. Этот ток рассеивается в виде тепла и звука (характерное потрескивание), что и представляет собой потери на корону [1].

Факторы, влияющие на потери на корону:

- Напряжение линии: чем выше напряжение, тем больше потери на корону. Это особенно актуально для ВЛ напряжением 220 кВ и выше.
- Диаметр провода: чем меньше диаметр провода, тем выше напряженность электрического поля у его поверхности, и тем больше потери на корону. Использование проводов большего диаметра или расщепленных проводов (несколько проводов на фазу) снижает потери [2].
- Атмосферные условия: влажность, давление воздуха, осадки (дождь, снег, иней) значительно влияют на потери на корону. Во влажную погоду потери увеличиваются.
- Состояние поверхности провода: шероховатости, загрязнения и повреждения на поверхности провода способствуют возникновению короны и увеличивают потери.
- Расстояние между проводами: уменьшение расстояния между проводами может увеличить потери на корону.

Способы снижения потерь на корону:

- Увеличение диаметра проводов: как уже упоминалось, это снижает напряженность электрического поля.
- Расщепление фаз: использование нескольких проводов на фазу, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, эквивалентно увеличению диаметра одного провода [3].
- Применение пучкообразных проводов: это разновидность расщепления фаз, при которой провода скручиваются вокруг общей оси.
- Использование гладких проводов: гладкая поверхность провода уменьшает вероятность возникновения короны.
- Применение специальных покрытий: существуют специальные покрытия для проводов, которые уменьшают потери на корону.
- Оптимизация конструкции линии: правильный выбор расстояния между проводами и высоты подвеса может снизить потери.
- Контроль за состоянием проводов: регулярная очистка проводов от загрязнений и своевременный ремонт повреждений помогают снизить потери [4].

Расчет потерь на корону:

Существуют различные эмпирические формулы для расчета потерь на корону, учитывающие вышеперечисленные факторы. Эти формулы

достаточно сложны и требуют знания специфических параметров линии и атмосферных условий.

Источники

1. Важов В.Ф., Кузнецов Ю.И., Куртенков Г.Е., Лавринович В.А., Лопатин В.В., Мытников А.В. Техника высоких напряжений. Учебное пособие. Томск, Изд-во ТПУ, 2013.

2. Потери на корону и их снижение в сетях 220 кВ и выше. Путеводитель по Энергетике. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://pue8.ru/elektricheskie-seti/628-poteri-na-koronu-i-ikh-snizhenie-v-setyakh220-kv-i-vyshe.html>.

3. «Энергетика» Оборудование Документация. Потери на корону: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://forca.ru/knigi/arhivy/linii-elektroperedachi-345-kv-i-vyshe-23.html>.

4. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Официальный сайт Министерства энергетики РФ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.minenergo.gov.ru/node/1920>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИЛОВЫХ МИКРОСХЕМ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТАНОВОК

Новоселова С. В.¹, Востриков Д.Ю.², Сандаков В.Д.³

¹ ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

^{2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ fayazshaykh@gmail.com, ² denisesenina@yandex.ru, ³ vitalysandakov@gmail.com

В статье рассмотрены современные силовые микросхемы, применяемые в преобразователях энергии для промышленных энергосберегающих установок. Проанализированы типы ключевых приборов – MOSFET, IGBT, а также устройства на базе широкозонных материалов (GaN и SiC). Особое внимание уделено их техническим характеристикам, применению в различных отраслях промышленности, а также экономической эффективности. Обсуждаются перспективы развития силовой электроники с учетом внедрения цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Ключевые слова: Силовая электроника, микросхемы, энергосбережение, преобразователи энергии, GaN, SiC, MOSFET, IGBT, промышленная автоматизация, широкозонные полупроводники.

THE USE OF POWER INTEGRATED CIRCUITS IN ENERGY CONVERTERS FOR INDUSTRIAL ENERGY-SAVING INSTALLATIONS

Novoselova S. V.¹, Vostrikov D.Y.², Sandakov V.D.³

¹ KNRTU, Kazan, Russia

^{2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹ fayazshaykh@gmail.com, ² denisesenina@yandex.ru, ³ vitalysandakov@gmail.com

The article discusses modern power microchips used in energy converters for industrial energy-saving systems. It analyzes the types and characteristics of power semiconductor devices, including Si-based MOSFETs and IGBTs, as well as wide bandgap transistors based on SiC and GaN. Their application areas, efficiency, and advantages in industrial converters are presented. Special attention is given to the economic efficiency and development prospects of energy-saving technologies based on advanced microelectronics.

Keywords: power electronics, energy converters, GaN transistor, SiC transistor, energy efficiency, industrial systems, power semiconductor devices, wide bandgap materials

В современных условиях стабильный рост энергопотребления и требования к снижению выбросов CO₂ обостряют задачу повышения энергоэффективности. Силовая электроника (СЭ) – область техники, связанная с преобразованием энергии и коммутацией мощных электрических цепей. Значимость СЭ определяется тем, что примерно две трети вырабатываемой электроэнергии потребляется в преобразованном виде. Высокая эффективность преобразования критически важна для повышения производительности оборудования, снижения затрат и устойчивости энергосистем. Современные требования к энергосбережению способствуют развитию новых полупроводниковых технологий: традиционная кремниевая техника приближается к физическим пределам, поэтому перспективные решения связаны с широкозонными материалами SiC и GaN. Рынок силовых приборов на основе GaN быстро растёт в ответ на спрос на более эффективные преобразователи энергии.

Теоретическая часть

Среди классических силовых приборов на кремнии (Si) различают MOSFET (металло-оксидный полевой транзистор) и IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором). MOSFET-транзисторы работают на основе одного типа носителей, имеют высокую скорость переключения и подходят для низковольтных систем. IGBT-транзисторы – биполярные устройства, более медленные, но способные выдерживать очень высокие напряжения и токи [1].

Широкозонные полупроводники (WBG), такие как нитрид галлия (GaN) и карбид кремния (SiC), обладают существенно лучшими параметрами по сравнению с Si. Они характеризуются более высоким критическим электрическим полем и теплопроводностью, что обеспечивает меньшие потери и большую плотность мощности. Например, GaN-HEMT-транзисторы обеспечивают более высокую частоту переключения, тепловую устойчивость и КПД преобразователя благодаря своей широкой запрещенной зоне и высокой скоростью движения носителей. Доступные сегодня GaN-устройства поддерживают напряжения до ~650–1000 В, очень высокие частоты и высокие температуры работы при значительно сниженных коммутационных потерях. SiC-MOSFET-фототранзисторы выдерживают напряжения до 1200–1700 В и более, при этом их теплопроводность почти в три раза выше, чем у кремния. По сравнению с Si IGBT, SiC-MOSFET обеспечивают лучшую тепловую стабильность и позволяют отказаться от массивных систем охлаждения [2].

Напротив, GaN – транзисторы обычно рассчитаны на напряжения до 650 В, их высокая скорость и плотность делают их идеальными для

высокочастотных небольших преобразователей (зарядные устройства, телекоммуникационные и серверные БП, силовые модули ЧПУ) [3].

Анализ современных решений

В промышленных энергосберегающих установках силовые микросхемы внедряются для повышения эффективности, надёжности и компактности оборудования. Так, в электротранспорте (электромобили, локомотивы) силовые инверторы всё чаще строятся на SiC-микросхемах: SiC-МОП-транзисторы могут работать при напряжениях до 1200 В и высоких токах, обеспечивая надёжность при экстремальных условиях.

В сфере возобновляемой энергии GaN-технологии способствуют росту КПД и снижению габаритов. В современных фотовольтаических инверторах 3–5 кВт начали применять GaN-FETы: их высокая скорость переключения позволяет использовать более тонкие и меньшие по размеру фильтры, что значительно уменьшает общий объём и вес установки [4].

В промышленном электроприводе (двигатели ЧПУ, роботы, вентильные регуляторы) распространены современные системы с встраиваемыми управляемыми модулями. Устройства на SiC часто интегрируют непосредственно в корпус двигателя, избавляясь от длинных кабелей питания. Это позволяет резко снизить и упрощает конструкцию приводов. Одновременно улучшаются надёжность и точность управления: SiC-МОП-транзисторы за счёт повышенной частоты переключения дают более плавный ход и меньшее тепловыделение при той же нагрузке. В робототехнике и при точной автоматической сварке высокочастотные приводы на WBG-ключках позволяют добиться более жёсткого управления положением за счёт высокой скорости коммутации.

Таким образом, внедрение силовых микросхем нового поколения уже продемонстрировало рост эффективности и надёжности промышленных систем при одновременном уменьшении габаритов. Сниженные потери коммутации и улучшенное тепловое поведение WBG-устройств уменьшает нагрузку на системы охлаждения, а более высокая плотность мощности транзисторов позволяет создавать более компактные установки [5].

Таблица 1.

Сравнение типов силовых ключей и их применений

Тип прибора	Материал	Напряжение (прибл.)	Частота переключения	Основные применения
MOSFET (Si)	Si-полевой	до ~200–300 В	до ~200–300 В >20 кГц и выше	Низковольтные DC/DC-преобразователи, драйверы двигателей высокого разрешения

IGBT (Si)	Si- биполярный	~600–3300 В	до нескольких кГц	Тяговые инверторы, высоковольтные силовые установки
SiC MOSFET	Карбид кремния	600–1700 В (до 3300 В)	10–100+ кГц	Электромобили, солнечные и ветряные инверторы, промышленная тяга
GaN HEMT	Нитрид галлия (HEMT)	до ~650 В (иногда 100– 1000 В)	сотни кГц – МГц	Высокочастотные преобразователи питания (зарядки, серверы, встраиваемые мотор-драйверы)

Экономическая эффективность

Современные силовые микросхемы позволяют значительно повысить энергоэффективность промышленных систем.

По оценкам экспертов, применение энергоэффективных приводов и силовой электроники уже обеспечивает экономию десятков процентов потребляемой энергии: к примеру, внедрение электроприводов даёт до 40% экономии выработанной электроэнергии по сравнению с несинхронными методами, а применение силовой электроники в автомобильной технике может дать выигрыши в десятки миллиардов долларов на мировом уровне. В контексте преобразователей эффективность напрямую отражается на эксплуатационных расходах. Даже прирост КПД на 1–2% при мощностях в сотни киловатт или мегаватт даёт существенную экономию. Например, при установке 1 МВт, работающей 8000 часов в год, повышение эффективности на 1% обеспечивает экономию порядка 80 МВт·ч электроэнергии в год (что соответствует десяткам тысяч долларов в пересчёте на энергию). Эта экономия напрямую снижает затраты на электроэнергию и может компенсировать большую первоначальную стоимость WBG-решений за счёт меньших потерь и более компактной конструкции [6].

Конкретные цифры эффективности новых систем впечатляют. В рамках европейской программы YESvGaN рассчитано, что замена Si IGBT на GaN-транзистор в высоковольтном преобразователе позволит сократить потери до 50% и увеличить удельную мощность устройства на ~15% по сравнению с классической Si-технологией. Это означает, что при прочих равных энергопотребление установки резко падает. Одновременно GaN- и SiC-модули способны работать при более высоких температурах, что уменьшает затраты на охлаждение и повышает надёжность системы (уменьшая простои и обслуживание).

С другой стороны, цена современных WBG-компонентов пока выше, чем у стандартных Si-IGBT. Однако следует учитывать весь системный эффект: исследование Arrow показывает, что, несмотря на более высокую

цену SiC-МОП-транзисторов, применение их в приводах часто приводит к снижению общей стоимости системы. Уменьшается необходимость в массивных радиаторах, дополнительных компонентах и длинных кабелях. В итоге экономия на периферии и эксплуатационных расходах может превысить наценку на сам силовой ключ. Таким образом, внедрение силовой электроники нового поколения приводит к уменьшению совокупной стоимости владения оборудованием благодаря экономии энергии, повышению надёжности и упрощению конструкции [7].

Перспективы развития

Будущее силовой электроники связывают с дальнейшим развитием материалов и «умных» технологий управления. С одной стороны, продолжаются исследования новых широкой запрещенной зоной полупроводников: помимо GaN и SiC перспективны опыты с нитридом галлия на искусственном сапфире, оксидом галлия (Ga_2O_3), карбидом бора и даже алмазом. Эти материалы обладают ещё большими критическими полями и могут обеспечить дальнейший рост плотности мощности и КПД устройств. К концу 2020-х годов ожидается освоение SiC- и GaN-пластин диаметром 200–300 мм, что снизит себестоимость и расширит применение WBG-компонентов [8].

С другой стороны, в силовые преобразователи всё активнее внедряются цифровые системы управления и алгоритмы искусственного интеллекта [9]. Микроконтроллеры и DSP-процессоры позволяют реализовать адаптивные схемы управления, компенсацию ошибок и удалённый мониторинг. Уже появились ИИ-алгоритмы, оптимизирующие параметры коммутации в реальном времени: например, современный soft-switching контроллер на базе ИИ динамически подбирает задержки между ключами, минимизируя потери при каждом цикле преобразования. Объединение ИИ и силовой электроники по мнению экспертов открывает большие возможности для повышения эффективности и надёжности систем. Цифровые технологии также облегчают внедрение предиктивного обслуживания (прогноз отказов), автоматическую подстройку под сеть и интеллектуальную интеграцию в «умные» сети (Smart Grid) [10].

В дальнейшем ожидается, что силовые микросхемы будут тесно взаимодействовать с алгоритмами машинного обучения, позволяя системам гибко перенастраивать режимы работы под нагрузкой и условия сети, а также учитывать большие объёмы данных для оптимизации процесса преобразования.

Внедрение современных силовых микросхем MOSFET, IGBT и особенно широкозонных GaN/SiC-транзисторов в промышленную энергосберегающую аппаратуру позволяет существенно повысить общую

эффективность преобразователей энергии. В будущем дальнейшее развитие силовой электроники будет связываться с новыми материалами и «умным» управлением на базе цифровых технологий и ИИ. Предложения:

- Продолжать инвестиции в исследования и производство GaN/SiC-компонентов большой мощности, чтобы удешевить технологии WBG.
- Развивать интегрированные модульные решения с цифровыми контроллерами (DSP, FPGA) и алгоритмами машинного обучения для оптимизации работы преобразователей.
- Проводить междисциплинарные проекты (энергетика, электроника, ИИ) для создания энергоэффективных систем управления и самонастраивающихся преобразователей.

Каждое из этих направлений позволит обеспечить дальнейший рост КПД промышленных систем и достижение национальных и глобальных целей по энергосбережению.

Источники

1. Шульга Й. С., Иванов П. Н., Котова А. В. Рынок силовой электроники: динамика и тенденции // Энергия Единой Сети. – 2020. – № 5–6. – С. 12–18.
2. Боднар Д. С. SiC и GaN – основа новой силовой электроники // Микроэлектроника. – 2022. – № 3. – С. 27–34.
3. Ковальчук А. С. Перспективные направления развития силовой электроники в России // Вестник НГТУ. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 98–105.
4. Дроздов А. А., Малыхин Ю. В. Использование широкозонных материалов в силовой электронике // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2023. – № 1. – С. 43–49.
5. Чаплыгин С. А., Ковалев П. И. Энергоэффективные технологии на базе силовой микроэлектроники // Энергосбережение. – 2022. – № 6. – С. 22–27.
6. Di Giovanni F. AI and Power Electronics: Finding Common Ground // Power Electronics News. – 2024. – Июнь. – URL: <https://www.powerelectronicsnews.com> (дата обращения: 01.05.2025).
7. Toshiba Semiconductor. FAQ: What is the difference between a MOSFET and an IGBT? – URL: <https://toshiba.semicon-storage.com> (дата обращения: 01.05.2025).
8. Arrow Electronics. SiC vs Si: Efficiency and Cost Tradeoffs. – URL: <https://www.arrow.com> (дата обращения: 01.05.2025).
9. Feoktistov, D. I. Blockchain smart contract system in power engineering / D. I. Feoktistov, O. V. Vorkunov // XXVI Всероссийский аспирантско-

магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика : материалы докладов : в 3 т., Казань, 06–07 декабря 2022 года. Vol. 3. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – Р. 534-537.

10. YESvGaN Project Report. GaN for High Voltage Power Applications. – 2024. – URL: <https://www.yesvgan.eu> (дата обращения: 01.05.2025).

К ВОПРОСУ О МЕТОДАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ГОЛОЛЕДА НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Петров В.А.¹, Гиззатова И.Д.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

vlad_petrov2709@mail.ru

В данной работе проводится анализ существующих методов обнаружения гололёдных образований на высоковольтных линиях электропередач. Выделены технические решения, имеющие различную природу мониторинга гололёда на проводниках. Определены наиболее перспективные устройства, функционал которых построен на обмене высокочастотными сигналами в существующем высокочастотном канале. Выделены достоинства и недостатки каждого технического решения.

Ключевые слова: гололёд, линия электропередач, мониторинг, высокочастотный сигнал, канал, лёд.

ON THE ISSUE OF METHODS FOR DETECTING ICE ON POWER LINES

Petrov V.A.¹, Gizzatova I.D.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

vlad_petrov2709@mail.ru

In this paper, an analysis of existing methods for detecting ice formations on high-voltage power lines is carried out. Technical solutions with different types of monitoring of ice on conductors are highlighted. The most promising devices have been identified, the functionality of which is based on the exchange of high-frequency signals in the existing high-frequency channel. The advantages and disadvantages of each technical solution are highlighted.

Keywords: ice, power line, monitoring, high frequency signal, channel, ice.

В настоящее время вопрос диагностики и определения мест повреждений воздушных линий электропередач занимает достаточно важное место в электроснабжении потребителя. Это объясняется тем, что большую долю аварийности в электроэнергетических системах занимают однофазные замыкания на землю, возникающие на линиях электропередач (ЛЭП).

В южных районах Республики Татарстан и Республики Башкортостан на линиях электропередач в зимнее время достаточно часто встречаются гололёдные образования, способные существенно изменять физические и

геометрические параметры проводника. Данные дефекты необходимо своевременно выявлять, которые возможно отследить при помощи датчиков гололёдных образований. Датчики гололёда отслеживают следующие параметры: вес провода; натяжение проводника; физические свойства окружающей среды (воздух, лёд); электрические характеристики проводников; условия прохождения высокочастотных и импульсных сигналов [1].

Анализируя многолетний опыт эксплуатации линий электропередач в районах с повышенной вероятностью гололёдообразования определено, что нарастание гололёда на проводнике при определённых погодных условиях может достигать достаточно быстрых темпов, а разворот установок плавки гололёда может занимать длительное время, что ещё больше увеличивает вероятность обрыва проводов.

Исходя из этого, стоит рассмотреть различные методы борьбы с гололёдными образованиями, а также привести устройства, содействующие в борьбе с гололёдом:

– механический метод: является наиболее объективным, т.к. датчиком фиксируется гололёдная нагрузка на провод за несколько пролётов. Величина натяжения провода для конкретной воздушной линии определяется нагрузками от гололеда и ветра, а также температурой окружающей среды. Для оценки степени напряженного состояния материала провода и сравнения его с предельно допустимым значением представляется наиболее целесообразным контроль натяжения провода [2].

Однако информация, получаемая от сигнализаторов гололеда, обычно используется для управления плавкой гололеда с целью правильного определения токовой нагрузки на провод при проведении процедуры плавки. Исходя из этого, датчики гололеда могут являться частью автоматизированной системы управления установкой плавки льда на линиях электропередач. Плавка гололёда необходима, т.к. при значительном весе провода может наблюдаться ложное срабатывание датчиков на отключение защит, вызванное пляской перегруженного провода или порывов ветра. Важно отметить, что механические датчики обладают своей сложной конструкцией и невысокой надежностью, что требует применения более надежных устройств мониторинга гололёда на ЛЭП;

– физический метод: данный метод реализуется несколькими видами датчиков, которые функционируют за счёт различных явлений. Оптический датчик, в составе которого находятся фотоприёмник, помещённый в стеклянную трубку и излучатель света, осуществляет сигнализацию.

При появлении гололёдных образований на поверхности трубки, отражающая способность фотоприёмника увеличивается, что приводит к

увеличению сигнала на выходе фотоприемника и усилителя. Этот сигнал даёт оповещение о начале гололёдообразования. Но данный датчик имеет сложную конструкцию, а также подвержен запылению и требует оснащения телемеханикой. Также используется датчик, работающий за счёт фиксации напряженности электромагнитного поля. Суть работы датчика заключается в мониторинге напряженности электромагнитного поля от начала гололедной муфты и за её пределами. Это решение позволяет дифференцировать напряженности полей в двух точках. К недостаткам данного датчика можно выделить необходимость в системе телемеханики [3].

– локационный метод: сущность данного метода заключается в отправке импульсного сигнала в линию, который передаётся по высокочастотному каналу в пределах высокочастотных заградителей. Данный метод функционирует по принципу сравнения времени распространения сигналов. За счёт того, что гололёд является диэлектриком, генерируемый сигнал от датчика снижается при протекании по линии затухает. Эти затухания обуславливаются диэлектрическими потерями энергии генерируемой электромагнитной волны, расходуемой за счёт нагрева льда на ЛЭП. Чем длиннее линия с гололёдом, тем сильнее затухает сигнал. Важно выделить, что по двум параметрам сигнала локационного устройства можно определить гололёд на линии электропередач – снижение скорости сигнала и уменьшение амплитуды передаваемого сигнала.

Можно выделить два варианта использования локационного зондирования: по дополнительной задержке отраженного сигнала или по появлению дополнительного затухания на ЛЭП. Необходимо отметить, что среди преимуществ данного метода можно выделить: возможность бесконфликтного функционирования данных датчиков без влияния на функциональность основных защит ЛЭП, основанных на высокочастотных каналах. Среди недостатков можно выделить невозможность определения тонкого льда на ЛЭП.

Необходимо выделить ещё несколько устройств локационного зондирования, которые обладают достаточно высокой точностью обнаружения гололёда:

– датчик разности затухания в междуфазных и внутрифазных каналах работает за счёт высокочастотного канала на ЛЭП. Принцип работы основан на приращении затухания, которое вызвано образовавшимся гололедом во внутрифазном канале – это затухание превосходит приращение в междуфазном канале.

На основании этого, можно определить, что гололёд по всей длине линии распределен одинаково, а отношение изменения затухания импульсов во внутрифазном канале и междуфазном характеризует толщину льда на

проводе. Такое техническое решение даёт возможность производить мониторинг толщины льда по всей длине линии и не требует дополнительных датчиков на ЛЭП. Также данное устройство может применяться и для процесса плавки гололёда, т.к. высокочастотный канал может использоваться для мониторинга затухания сигнала;

– датчик стрелы провеса функционирует за счет сравнения по амплитуде и по фазе высокочастотных импульсов в рамках высокочастотных заградителей, установленных на ЛЭП. На рисунке показана схема линии электропередач, на которую устанавливается датчик стрелы провеса [4].

Необходимо отметить, что чем больший объем гололеда на проводе, тем больше он провисает. Отраженные от неоднородности импульсы зонда возвращаются обратно с затуханием, что напрямую свидетельствует о наличии гололёда на проводнике. Среди недостатков данного метода можно назвать сложность конструкции дополнительных опор, что не позволит дальнейшему провисанию провода и его обрыву. Также данное техническое решение требует специальный канал телемеханики для передачи сигнала о появлении гололеда с целью принятия мероприятий.

Подводя итоги, необходимо выделить, что рассмотренные методы обладают достаточно высокой эффективностью, но необходимо разрабатывать наиболее инновационные методы. Стоит отметить, что использование высокочастотного сигнала на ЛЭП является достаточно эффективным и универсальным решением, т.к. большинство линий электропередач в качестве основных защит используют дифференциально-фазную защиту или высокочастотную блокировку.

Источники

1. Хантимеров И. М. Термические методы борьбы с обледенением на воздушных линиях электропередачи / И. М. Хантимеров, О. В. Воркунов // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: Материалы Международной молодежной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 211-213.

2. Микуцкий Г.В., Скитальцев В.С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи. М.: Энергия, 1977. 489 с.

3. Минуллин Р.Г., Петрушенко Ю.Я., Фардиев И.Ш., Лукин Э.И. Обнаружение локационным методом обрывов и двухфазных коротких замыканий проводов воздушных электролиний // Электротехника. 2009. № 2. С. 25-34.

4. Обнаружение локационным зондированием гололеда на воздушных линиях электропередачи Республики Башкортостан / Р. Г. Минуллин, Р. Р. Аскаров, В. А. Касимов [и др.] // Энергетика Татарстана. – 2014. – № 3-4(35-36). – С. 42-45.

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ "УМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ"

Протасов П.А.¹, Миронова Е.А.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
pavelpro.post555@gmail.com

В статье рассмотрены современные подходы к мониторингу электрооборудования с использованием "умных технологий". Анализируются преимущества внедрения умных систем мониторинга по сравнению с традиционными методами диагностики, приводятся конкретные результаты внедрения интеллектуальной системы мониторинга на подстанции 110 кВ компании "Россети".

Ключевые слова: мониторинг электрооборудования, система мониторинга IoT, искусственный интеллект, цифровизация подстанций.

SMART TECHNOLOGY MONITORING OF ELECTRICAL EQUIPMENT

Protasov P.A.¹, Mironova E.A.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
pavelpro.post555@gmail.com

This article explores contemporary approaches to electrical equipment monitoring utilizing "smart technologies". The study analyzes the benefits of implementing intelligent monitoring systems in comparison with conventional diagnostic methods and provides specific implementation results from an advanced monitoring system installed at a 110 kV substation operated by "Rosseti" company.

Keywords: monitoring of electrical equipment, IoT monitoring system, artificial intelligence, digitalization of substations.

Современные энергосистемы и промышленные предприятия требуют высокой надежности электрооборудования. Традиционные методы диагностики не всегда позволяют своевременно выявлять неисправности [1]. Внедрение "умных технологий" обеспечивает непрерывный мониторинг, прогнозирование отказов и оптимизацию эксплуатации.

Мониторинг электрооборудования – это непрерывный или периодический контроль технического состояния электроустановок с помощью датчиков, систем сбора и обработки данных [2]. В последние годы

с развитием "умных технологий" мониторинг стал более эффективным и точным

Система мониторинга IoT (интернет вещей) — это технология, оснащенная умными датчиками, микропроцессорами и средствами связи, позволяющая осуществлять удаленный мониторинг и управление электрооборудованием [3]. Умные датчики, установленные на электрооборудовании, собирают информацию о различных параметрах, таких как напряжение, ток, температура, вибрация и другие. Эти данные передаются в облачные сервисы или локальные серверы по беспроводным сетям. С помощью алгоритмов машинного обучения и аналитических инструментов данные обрабатываются для прогнозирования неисправностей и оптимизации работы оборудования. На основе анализа принимаются решения о необходимости технического обслуживания, замены оборудования или других действиях.

Таблица 1

Основные компоненты системы мониторинга IoT

Компоненты	Назначение	Примеры
Датчики	Измерение параметров оборудования	Датчики температуры и вибрации ABB Ability, беспроводные измерители тока Honeywell Sentience
Микроконтроллеры	Обработка данных с датчиков	Arduino, Rapsberry Pi, ESP32
Сетевые технологии	Обеспечение передачи данных	Wi-Fi, LoRaWAN/NB-IoT, 5G
Облачные платформы	Хранение и анализ данных	Aws IoT, Google Cloud IoT, Siemens MindSphere

Система мониторинга с использованием искусственного интеллекта AI — это комплекс программных решений, направленных на автоматизацию процессов, повышение точности диагностики и прогнозирование потенциальных неисправностей электрооборудования. Эти технологии способствуют улучшению надежности и эффективности работы оборудования, позволяя оперативно реагировать на изменения и оптимизировать эксплуатацию.

Современные системы интеллектуального мониторинга электрооборудования предлагают значимые преимущества, трансформируя подходы к техническому обслуживанию. Прежде всего, они демонстрируют высокую экономическую эффективность, позволяя снизить затраты на ремонты и обслуживание на 20-30% благодаря предотвращению

катастрофических отказов и сокращению незапланированных простоев оборудования [4]. Операционная эффективность также возрастает за счет возможности удаленного мониторинга, автоматизации процессов сбора данных и интеграции с существующими системами управления.

Компания "Россети", крупнейший оператор электросетевого комплекса России, реализовала масштабный проект по цифровизации подстанции 110 кВ с применением современных технологий мониторинга.

В рамках проекта была внедрена комплексная система интеллектуального мониторинга, включающая сеть датчиков и IoT-устройств. На критически важных элементах подстанции установили температурные датчики для контроля состояния шин, трансформаторов и выключателей, датчики тока и напряжения, интегрированные в систему релейной защиты, а также вибрационные сенсоры для оценки состояния масляных выключателей. Особое внимание уделили диагностике трансформаторов, где применили газоанализаторы для мониторинга растворенных газов в масле.

Сбор данных осуществлялся через проводные и беспроводные каналы связи, включая оптоволокно и технологии LoRaWAN/NB-IoT, с передачей информации в режиме реального времени на облачную платформу. Уже в первый год эксплуатации удалось снизить количество отказов электрооборудования на 18%, предотвратив три потенциальные аварии [5]. Экономический эффект проявился в сокращении ремонтных затрат на 15-20% и увеличении межремонтных интервалов оборудования - для трансформаторов этот показатель вырос на 25%.

Операционная эффективность значительно повысилась благодаря возможности удаленного контроля состояния оборудования, автоматическому формированию отчетов об износе и интеллектуальным рекомендациям по обслуживанию.

В заключение, внедрение "умных технологий" в систему мониторинга электрооборудования представляет собой важный шаг к повышению надежности и эффективности работы энергосистем. Современные решения, основанные на IoT и искусственном интеллекте, обеспечивают непрерывный контроль технического состояния оборудования, что позволяет своевременно выявлять неисправности и предотвращать аварийные ситуации. Более того, использование умных технологий экономически выгодно благодаря снижению затрат на ремонт и обслуживание.

Источники

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – М.: СПО ОРГРЭС, 1997. – 56.
2. Мониторинг технического состояния оборудования. Ч. 1. Общие требования. – Введ. 2019-07-01. – М.: Стандартиформ, 2018. – 20 с.
3. Крючков И.П. Интеллектуальные системы мониторинга в энергетике / И.П. Крючков, В.В. Новиков. – М.: Изд-во МЭИ, 2021. – 184 с.
4. ABB Technical Report. Smart Grid Solutions for Predictive Maintenance. – Zurich, 2022. – 34 p.
5. Годовой отчет ПАО "Россети" за 2022 год. – М., 2023. – 120 с.

ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Ратников Л.М.¹, Валиуллина Д.М.², Сагитова М.Р.³

^{1,2}ФГБОУ ВО «КГЭУ»

³МБОУ СОШ №45, Россия, г.Казань

¹ ratnikovleonid@gmail.com, ² valiullinadiliya@mail.ru, ³ Maryam.sagitova07@mail.ru

В статье рассматривается метод газовой хроматографии как эффективный инструмент оценки состояния силовых трансформаторов и другого высоковольтного оборудования. Анализ растворенных в масле газов (РГА) позволяет выявлять скрытые дефекты изоляции на ранней стадии, предотвращая серьезные аварии.

Ключевые слова: трансформаторное масло, газовая хроматография, диагностика трансформаторов, растворенные газы, РГА, дефекты изоляции, предиктивный мониторинг.

CHROMATOGRAPHIC ANALYSIS OF TRANSFORMER OIL

Ratnikov L.M.¹, Valiullina D.M.², Sagitova M.R.³

^{1,2} KGEU

³MBOU SECONDARY SCHOOL № 45 Kazan, Russia

¹ ratnikovleonid@gmail.com, ² valiullinadiliya@mail.ru, ³ Maryam.sagitova07@mail.ru

The article discusses the gas chromatography method as an effective tool for assessing the condition of power transformers and other high-voltage equipment. Oil-dissolved gas analysis (OGA) allows detecting hidden insulation defects at early stages, preventing serious accidents.

Keywords: transformer oil, gas chromatography, transformer diagnostics, dissolved gases, RGA, insulation defects, predictive monitoring.

Надежность и бесперебойная работа силовых трансформаторов играют ключевую роль в современной энергетике. Трансформаторное масло служит для защиты изоляционных элементов трансформатора, поэтому раннее обнаружение неполадок критически важно для стабильного функционирования системы. Одним из методов оценки состояния трансформатора является хроматографический анализ масла, также известный как анализ растворенных газов [1].

Газовая хроматография – это способ диагностики оборудования, основанный на изучении газов, растворенных в масле. Данный метод помогает выявить дефекты на начальных этапах, определить их характер и степень повреждения изоляции [2].

Основу хроматографического анализа составляют детекторы – устройства, анализирующие растворенные газы. Они выполняют функцию преобразователей, переводя данные измерений в электрические сигналы, фиксируемые в виде хроматограмм. Каждый детектор включает два ключевых компонента: датчик, который следует располагать как можно ближе к выходу колонки для эффективного выявления отклонений в газовом составе, и электронный блок, преобразующий аналоговый сигнал в цифровой для последующей компьютерной обработки. Важным фактором повышения эффективности детекторов является скорость оцифровки сигнала.

Анализ позволяет точно определить концентрацию различных веществ в масле, что помогает диагностировать конкретные неисправности. Например, метан указывает на перегрев масла; водород и ацетилен свидетельствуют об искровых разрядах или дуге; водород, оксид углерода и метан сигнализируют о частичных разрядах в масляно-бумажной изоляции [3].

Однако метод имеет и недостатки, такие как невозможность точной локализации дефекта. Для уточнения диагноза требуются дополнительные исследования: акустический контроль, термография и высоковольтные испытания, что увеличивает затраты. Среди преимуществ – современные хроматографы не нуждаются в лабораторных условиях и способны непрерывно отслеживать изменения в составе масла, отбирая пробы с заданной периодичностью. Это позволяет оперативно оценивать состояние силовых трансформаторов, вводов, автотрансформаторов и реакторов, предотвращая их аварийные отключения [4].

Благодаря непрерывному мониторингу можно выявлять перегрев магнитопровода и обмоток, частичные разряды, степень старения целлюлозной изоляции. Дополнительным шагом в развитии метода может стать применение искусственного интеллекта для создания портативных хроматографов, позволяющих проводить экспресс-анализы непосредственно на подстанциях.

Газоанализаторы SITRAM обеспечивают реальный мониторинг концентрации газов в масле, прогнозируя стабильность работы трансформаторов. Они автоматизируют процесс контроля, снижая нагрузку на персонал и ускоряя реакцию на дефекты [5].

Таким образом, хроматографический анализ остается важнейшим инструментом диагностики трансформаторов. Несмотря на необходимость

дополнения другими методами, он позволяет заранее выявлять неисправности, предотвращая аварии и сокращая затраты на ремонт. Дальнейшая цифровизация и автоматизация открывают новые перспективы для предиктивной аналитики в энергетике, повышая надежность энергосистем.

Источники

1. Хайбулаев, А. М. Хроматографический анализ газов в трансформаторном масле / А. М. Хайбулаев, Г. К. Мамедшахов // Неделя науки - 2021 : Сборник материалов 42 итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, Махачкала, 17–22 мая 2021 года. – Махачкала: Типография ФОРМАТ, 2021. – С. 135-136.

2. Галимов, Д. Р. Методы диагностики трансформаторного масла / Д. Р. Галимов // Экология и безопасность жизнедеятельности : Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 13–14 декабря 2022 года / Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лукшина. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 67-69.

3. Шевченко, А. А. Хроматографический анализ масла и диагностика неисправностей силовых масляных трансформаторов / А. А. Шевченко, А. Д. Чернова // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 25–27 октября 2022 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. – С. 432-436.

4. Гайнуллин, М. Р. Контроль состояния трансформаторов с помощью диагностики трансформаторного масла / М. Р. Гайнуллин // Экология и безопасность жизнедеятельности : Сборник статей XXII Международной научно-практической конференции, Пенза, 13–14 декабря 2022 года / Под редакцией В.А. Селезнева, И.А. Лукшина. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 64-66.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619348 Российская Федерация. Программа для прогнозирования дефектов в трансформаторном масле по хроматографическому анализу растворенных газов : № 2022618383 : заявл. 05.05.2022 : опубл. 20.05.2022 / И. А. Мальцев, М. А. Набиев, Д. В. Нереуцкий [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА».

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Рыжов Н.С.¹, Ковырев В.С.², Писковацкий Ю.В.³

^{1,2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

mail@nryzhov.ru¹, kovyrevvadim@yandex.ru²

Статья посвящена анализу роли искусственного интеллекта (ИИ) в трансформации современной электроэнергетики в условиях резких вызовов: роста энергопотребления, декарбонизации и возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Ключевые слова: электроэнергетика, искусственный интеллект, автоматизация, энергосистема, интеллектуальные системы.

ANALYSIS OF GLOBAL EXPERIENCE IN THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

Nikita S.R.¹, Vadim S.K.², Piskovatsky Yu.V.³

^{1,2,3} KGEU, Kazan, Russia

mail@nryzhov.ru¹, kovyrevvadim@yandex.ru²

The article is devoted to the analysis of the role of artificial intelligence (AI) in the transformation of the modern electric power industry in the face of dramatic challenges: rising energy consumption, decarbonization and renewable energy sources (RES).

Keywords: electric power industry, artificial intelligence, automation, power system, intelligent systems.

Спрос на передовые исследования и технологии неуклонно растет в секторе электрических сетей. Автоматизация и интеллектуальные технологии стали широко использоваться в ответ на требования развития с течением времени. Традиционные методы исследования быстро становятся недостаточными для того, чтобы позволить ученым и исследователям данных идти в ногу с любыми глобальными проблемами, в решении которых искусственный интеллект (ИИ) может помочь нам, и раскрывать важные идеи среди миллиардов фрагментов данных, разбросанных по всем энергосистемам. ИИ может обрабатывать большие объемы данных и использовать их для повышения эффективности эксплуатации, управления и планирования энергосистем. Использование технологии ИИ в энергосистемах исследовалось и обсуждалось в смежных областях и привело

к большому количеству исследовательских материалов и определенным результатам, которые рассматриваются в этой статье. Спрос на передовые исследования и технологии постоянно растет в секторе электрических сетей. Применение технологии ИИ для автоматизации управления энергосистемой может повысить эффективность управления автоматикой, снизить риск аварий и обеспечить бесперебойную работу энергосистемы в течение длительного периода. Оценка использования технологии ИИ в энергосистемах требует всестороннего анализа существующих исследований в области искусственного интеллекта и смежных отраслей [1].

Актуальность темы обусловлена глобальным трендом цифровизации энергетической отрасли и растущей потребностью в повышении эффективности, надежности и устойчивости энергосистем. Искусственный интеллект (ИИ) предоставляет уникальные возможности для решения сложных задач, связанных с прогнозированием спроса, оптимизацией производства и распределения энергии, диагностикой оборудования и управлением рисками.

Научная новизна заключается в систематизации и анализе мирового опыта применения ИИ в электроэнергетике, выявлении лучших практик и перспективных направлений исследований. Особое внимание уделяется применению машинного обучения, нейронных сетей и алгоритмов оптимизации для решения конкретных задач в энергетической отрасли.

Практическая значимость темы определяется возможностью использования полученных результатов для разработки и внедрения инновационных решений на предприятиях электроэнергетики, повышения их конкурентоспособности и улучшения качества предоставляемых услуг. Исследование способствует формированию стратегии развития ИИ в энергетическом секторе и подготовке квалифицированных кадров.

Личный вклад автора заключается в систематизации мирового опыта развития ИИ в электроэнергетике посредством сравнительного анализа региональных кейсов и технологических решений. Автор выделяет универсальные изменения (повышение точности прогнозов, автоматизация управления сетями) и структурные проблемы области (цифровое изменение, регуляторные конфликты). На основе данных BloombergNEF и отраслевых предложена оценка рыночного потенциала ИИ (\$20 млрд к 2030 г.), а также осторожный взгляд на социальные и технические риски.

Современная электроэнергетика сталкивается с беспрецедентными вызовами: ростом энергии, необходимостью декарбонизации, интеграцией возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и повышением устойчивости сетей. В этих условиях искусственный интеллект (ИИ) становится решающим фактором трансформации отрасли. Мировой опыт, основанный

на технологиях машинного обучения, нейронных сетях и анализе больших данных, уже сегодня решает задачи по оптимизации генерации, прогнозированию будущего, управлению распределительными сетями и предотвращению аварийных ситуаций. Энергокомпании от Европы до Азии внедряют ИИ-решения, чтобы сделать энергосистемы умнее, экологичнее и надежнее. Этот анализ посвящен изучению успешных кейсов, технологических тенденций и препятствий на пути развития ИИ в электроэнергетике [2].

Одним из основных принципов применения ИИ является повышение точности прогнозов энергопотребления и выработки. Традиционные методы часто не справляются с такими факторами, как погодные аномалии, сезонные колебания или поведение потребителей. Например, в Германии, где доля ВИЭ составляет 40%, такие компании, как Siemens Energy, используют алгоритмы машинного обучения для прогнозирования выработки солнечных и ветровых электростанций. Модели анализируют исторические данные о метеорологических условиях, графики технического обслуживания и даже спутниковые снимки облачности. Это позволяет снизить дисбаланс между предложением и спросом на 15–20%, минимизируя использование резервных зон мощности. Аналогичные системы внедрены в штатах (США), где сервис AutoGrid помогает коммунальным предприятиям прогнозировать пиковые нагрузки с нагрузкой до 98%, последние данные с умных счетчиков 10 миллионов домохозяйств.

Управления современных энергосетей мгновенного реагирования требует изменений. ИИ-алгоритмы в режиме реального времени анализируют потоки энергии, предотвращая перегрузки и сокращая потери. Японская компания Tokyo Electric Power (TEPCO) после аварии на Фукусиме внедрила систему на базе ИИ для сетей. Она обнаруживает аномалии в 3 раза быстрее традиционных методов, снижая риск каскадных отключений. Особое внимание уделяется опыту Китая: Государственная электросетевая корпорация (SGCC) принимает ИИ для управления крупнейшей в мире энергосистемой. Алгоритмы обрабатывают данные с 1 млн датчиков, автоматически перенаправляя потоки энергии между регионами и снижая потери при передаче до 5%.

Переход на «зеленую» энергетику невозможен без решения проблем нестабильности ВИЭ. В Австралии проект «Виртуальная электростанция Тесла» в регионах 50 тыс. долл. США. домашние солнечные панели и батареи в единой виртуальной электростанции. ИИ-платформа восстанавливает избытки энергии между участниками сети, снижая зависимость от региональных электростанций. А в Марокко система NOOR PV Analytics оптимизирует работу крупнейшей солнечной станции Нур

Уарзат: компьютерное зрение отслеживает загрязнение панелей, а алгоритмы планируют мойку модулей с учетом прогноза выработки [3].

Энергосистемы — критическая инфраструктура, уязвимая как к техническим сбоям, так и к кибератакам. В Индии PGCIL внедрила ИИ-модель для прогнозирования обрывов ЛЭП: анализируя данные дронов и спутников о состоянии опор в зонах муссонов, система сократила количество аварийных ситуаций на 30%. В дистанционной компании Hydro-Québec разработала алгоритм DeepGrid для обнаружения скрытых дефектов трансформаторов — точность достигала 92%. Не менее важна защита от киберугроз: американский стартап Dragos использует ИИ для промышленных IoT-устройств в энергосетях. Система выявляет аномальные паттерны трафика, блокируя воздействие типа Stuxnet для проникновения в SCADA-системы.

Несмотря на успех, массовое внедрение ИИ тормозит несколько факторов. Во-первых, проблема данных: для обучения моделей нужны огромные массивы информации высокого качества (например, ежемесячные показатели потребления), которые представляют собой лишь крупные компании. Во-вторых — регуляторные ограничения: стандарты кибербезопасности NERC CIP в США запрещают использование облачных ИИ-сервисов для управления критической инфраструктурой. В-третьих — этические дилеммы: алгоритмы могут непреднамеренно дискриминировать регионы с низким уровнем цифровизации при распределении инвестиций в сети [4].

К 2030 году мировой рынок ИИ в энергетике достигнет \$20 млрд (BloombergNEF). Основные тенденции включают автономные микросети (например, проект LO3 Energy в Нью-Йорке), цифровые двойники электростанций (GE Digital Twins) и квантовые вычисления для построения сложных энергосистем. Однако главным прорывом станет переход от предиктивной аналитики к прескриптивной — системам не только предсказывающим проблемы («где через час произойдет перегрузка»), но и самостоятельно принимающим решения («переключить нагрузку на подстанцию Б через 15 минут») [5].

Таким образом, мировой опыт обеспечения: искусственный интеллект трансформирует электроэнергетику на всех уровнях — от генерирующих объектов до розетки в квартире потребителя. Технологические ограничения углеродного следа повышения надежности снабжения миллиардов людей. Но успех зависит от преодоления социальных барьеров и социальных барьеров.

Источники

1. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт».2019. 368 с. ISBN 978-5-98094-007-2.
2. Бушуев В.В., Каменев А.С., Кобец Б.Б. Энергетика как инфраструктурная «система систем» // Энергетическая политика. 2022. Вып. 5. С. 3-14.
3. Пять отличий автоматизации от цифровизации. Режим доступа: <https://www.bigdataschool.ru/blog/> (дата обращения: 25.02.2025).
4. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия РАН. Энергетика. 2024. №1.С. 64-73.
5. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные энергетические системы. В кн.: Инновационная электроэнергетика-21 / Под ред. Батенина В.М., Бушуева В.В., Воропая Н И. М.: ИЦ «Энергия». 2020. С. 181-193.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИОТ-УСТРОЙСТВ

Скворцов Е.А.¹, Востриков Д.Ю.², Сандаков В.Д.³

¹ ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

^{2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

fayazshaykh@gmail.com¹, denisesenina@yandex.ru², vitalysandakov@gmail.com³

В условиях стремительного развития интернета вещей (IoT) энергопотребление устройств становится одним из ключевых факторов их успешного внедрения. Статья посвящена разработке методов снижения энергопотребления микропроцессорных систем, предназначенных для применения в IoT-устройствах. Рассматриваются архитектурные особенности энергоэффективных микроконтроллеров и технологии управления питанием периферийных модулей. Проведён сравнительный анализ энергопотребления в различных режимах работы процессора. Полученные результаты демонстрируют эффективность применения многоуровневых стратегий энергосбережения при проектировании автономных устройств интернета вещей.

Ключевые слова: Интернет вещей, IoT, микропроцессор, энергопотребление, микроконтроллер

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT MICROPROCESSOR SYSTEMS FOR IOT DEVICES

Skvortsov E. A.¹, Vostrikov D. Y.², Sandakov V. D.³

¹ KNRTU, Kazan, Russia

^{2,3} KSPEU, Kazan, Russia

fayazshaykh@gmail.com¹, denisesenina@yandex.ru², vitalysandakov@gmail.com³

In the context of the rapid development of the Internet of Things (IoT), the energy consumption of devices is becoming one of the key factors for their successful implementation. The article is devoted to the development of methods for reducing the energy consumption of microprocessor systems intended for use in IoT devices. The architectural features of energy-efficient microcontrollers and peripheral module power management technologies are considered. A comparative analysis of power consumption in different processor operating modes is carried out. The results obtained demonstrate the effectiveness of applying multi-level energy saving strategies in the design of autonomous Internet of Things devices.

Keywords: Internet of Things, IoT, microprocessor, power consumption, microcontroller

Развитие интернета вещей приводит к существенному увеличению количества автономных устройств, взаимодействующих друг с другом и с пользователем. При этом одним из основных требований к таким устройствам является минимальное энергопотребление, что обеспечивает длительную работу от автономных источников питания без их замены или подзарядки. В настоящее время широкое распространение получили микроконтроллерные платформы, ориентированные на малое энергопотребление, такие как серии ARM Cortex-M, ESP32 и другие [1].

Однако даже при использовании современных энергоэффективных решений критическим остаётся вопрос оптимального управления ресурсами питания как на уровне аппаратной архитектуры, так и на уровне программного обеспечения. Целью данной работы является анализ существующих технологий энергосбережения и разработка комплекса мероприятий, направленных на снижение энергопотребления микропроцессорных систем для IoT-применений. В ходе исследования были рассмотрены различные режимы сна, методы отключения периферии и архитектурные оптимизации современных микроконтроллеров [2].

Для исследования энергопотребления микропроцессорных систем были выбраны популярные энергоэффективные микроконтроллеры, используемые в IoT-устройствах: STM32L4 (ARM Cortex-M4), ESP32-S3 и GD32F103. Экспериментальные измерения проводились на тестовом стенде с использованием цифрового осциллографа и прецизионного измерителя тока. Основное внимание уделялось анализу следующих технологий энергосбережения: 1 — Режимы сна: standby, stop, deep sleep, light sleep; 2 — Управление периферийными модулями: отключение неиспользуемых блоков, динамическая тактовая частота; 3 — Оптимизация работы процессора: переход в режимы энергосбережения в периоды бездействия. Для каждой платформы были разработаны тестовые программы, моделирующие типичные сценарии работы IoT-устройств, включая сбор данных с датчиков, передачу данных по беспроводным каналам и периоды ожидания [3].

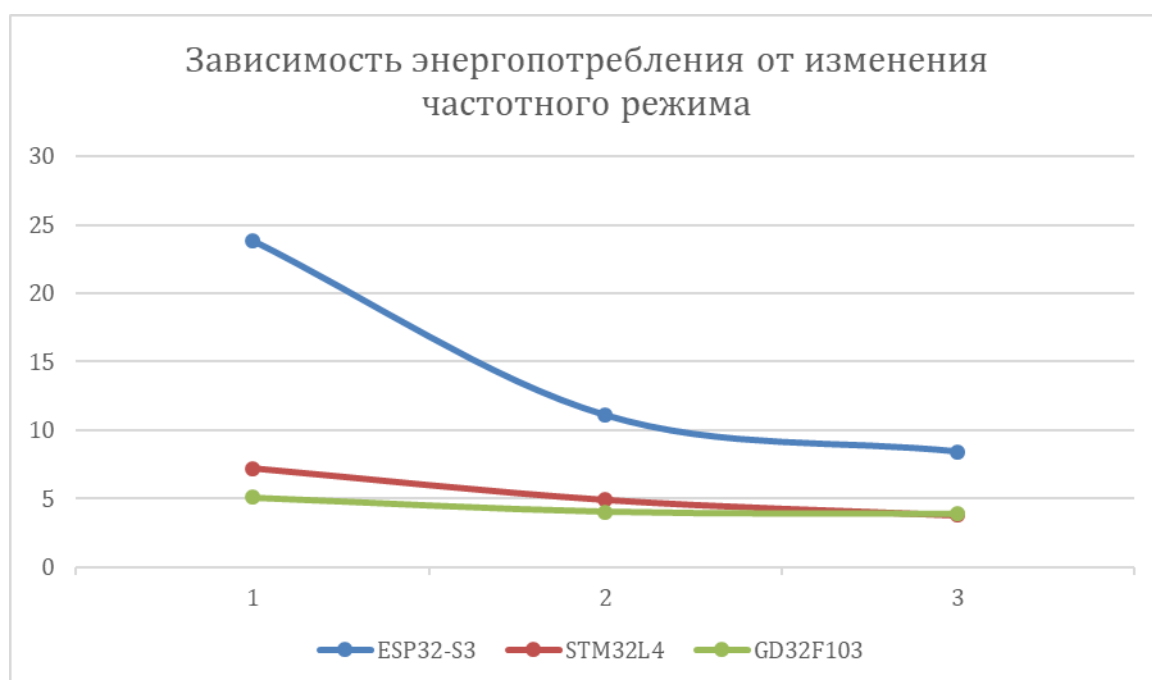
В ходе экспериментов было выявлено, что использование режимов глубокого сна позволяет снизить энергопотребление микроконтроллера в среднем на 85–95% по сравнению с активным режимом работы [4]. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Энергопотребление микроконтроллеров в различных режимах

Микроконтроллер	Активный режим (мА)	Лёгкий сон (мА)	Глубокий сон (мкА)
STM32L4	7,2	1,5	235
ESP32-S3	23,88	2,7	814
GD32F103	5,1	2,1	247

Дополнительно была оценена эффективность отключения неиспользуемых периферийных модулей. Например, отключение модулей UART, SPI и I2C на ESP32 позволило дополнительно сократить энергопотребление в активном режиме на 10–15% [6].

Анализ применения динамического изменения частоты показал, что при правильно подобранных порогах переключения возможно добиться баланса между производительностью и экономией энергии без существенного ухудшения времени отклика системы. Результаты представлены на рисунке.



Зависимость энергопотребления от изменения частотного режима (1 – режим максимальной нагрузки, 2 – режим стандартной нагрузки, 3 – режим оптимизации) [5]

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения многоуровневых стратегий энергосбережения в микропроцессорных системах для IoT-устройств [7]. Особенно значительное снижение энергопотребления достигается за счёт активного использования режимов глубокого сна и отключения периферийных блоков.

При этом наблюдается зависимость эффективности энергосбережения от архитектурных особенностей микроконтроллеров. Например, микроконтроллеры семейства STM32L4 демонстрируют существенно более низкие токи в спящем режиме по сравнению с ESP32-S3, что делает их более предпочтительными для автономных сенсорных узлов с длительным сроком службы батареи.

Применение динамического масштабирования тактовой частоты (DFS) позволяет дополнительно оптимизировать энергопотребление без критичного влияния на производительность. Однако при использовании DFS необходимо учитывать задержки на переключение режимов и возможность их негативного влияния на отклик системы в реальном времени.

Источники

1. Y. Zhang и C. Lee, «Маломощные микроконтроллерные системы для приложений IoT: методы проектирования и оптимизации», IEEE Trans. Ind. Inform., т. 18, № 5, стр. 3256–3264, май 2022 г.
2. Ultra-low-power 32-bit MCU based on ARM® Cortex®-M4 // ST URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l4-series.html> (дата обращения: 28.04.2025).
3. ESP32-S3 Technical Reference Manual // Espressif URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf (дата обращения: 28.04.2025).
4. Rahman, M., «Энергоэффективные методы для периферийных устройств Интернета вещей: обзор. Компьютерные системы будущего поколения», Energy Reports, т. 13, стр. 1739-1763, февраль 2025 г.
5. Misra, S., Maheswaran, M., & Hashmi, S Security Challenges and Approaches in Internet of Things. - Canada: Springer, 2017. - 107 с.
6. IEEE 802.15.4 — стандарт низкоэнергетических беспроводных сетей (для IoT).
7. Гачаев А.М. Внедрение ИОТ-технологий в экономические системы электроснабжения промышленных предприятий / А. М. Гачаев, О. В. Воркунов, М. М. Матыгов // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 3(164). – С. 971-974.

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ СТАНЦИИ

Титов С.Е.¹, Миронова Е.А.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

semen_titov_2003@mail.ru

В статье рассмотрено текущее состояние цифровизации электроэнергетики, перспективы и преимущества её развития, цели и задачи создания «умной электростанции», основные принципы цифровизации управления электростанцией.

Ключевые слова: «умная электростанция», цифровизация, цифровой двойник, автоматизированные системы управления, искусственный интеллект.

DIGITALIZATION OF POWER PLANT OPERATIONAL MODE MANAGEMENT PROCESSES

Titov S.E.¹, Mironova Ye.A.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

semen_titov_2003@mail.ru

The article examines the current state of digitalization in the electric power industry, prospects and advantages of its development, objectives and goals of creating a «smart power plant», as well as the core principles of digitalizing power plant management.

Keywords: «smart power plant», digitalization, digital twin, automated control systems, artificial intelligence.

Современная энергетика стремительно трансформируется под влиянием цифровых технологий. Цифровизация управления режимами работы электрических станций становится ключевым фактором повышения эффективности, надежности и безопасности энергосистем. В России этот процесс активно развивается в рамках концепции «умных электростанций».

Рассматривая текущее состояние цифровизации электроэнергетики можно отметить, что в условиях глобальной трансформации энергосистем, роста требований к эффективности и экологичности, внедрение цифровых технологий становится не просто трендом, а необходимостью. Многие компании электротехнической отрасли активно разрабатывают цифровые копии оборудования и системы прогнозной аналитики для промышленных

объектов, используя технологии искусственного интеллекта. Особое внимание уделяется цифровизации электросетей (например, инициативы «интеллектуальная подстанция» и «умные сети»).

В теплоэнергетике только недавно заговорили о необходимости решения подобных задач, так как большая часть энергетической инфраструктуры России была построена во времена СССР и физически устарела. По данным СО ЕЭС, большая часть оборудования ТЭС имеет срок эксплуатации свыше 30 лет, а каждое пятое нарушение в энергосистеме связано с отказами из-за его износа. В последние годы к традиционным нормативам по эксплуатации тепловых электростанций, которые в первую очередь гарантируют стабильность и безопасность энергосистемы, добавились строгие экологические стандарты, что тесно связано с государственными инициативами и стратегиями, а также с взятием курса на снижение углеродного следа. Для решения этих задач необходим переход на качественно новый уровень управления, основанный на цифровых технологиях, комплексной автоматизации, непрерывном мониторинге и оптимизации процессов.

Кроме того, в результате развития промышленности, электрификации транспорта и увеличения энергопотребления в ЖКХ, спрос на электроэнергию в России ежегодно увеличивается, что приводит к необходимости гибкого управления, адаптации к пиковым нагрузкам.

В последнее время вектор развития информационных систем направлен преимущественно на создание «умных систем», которым присуща высокая степень внутренней самоорганизации и большое количество обратных связей. Основываясь на них, можно вывести определение и основные аспекты «умной электростанции» - это энергообъект, оснащенный цифровыми технологиями для автономного анализа данных, прогнозирования нагрузок и адаптивного управления генерацией. В отличие от традиционных станций, такие системы работают с минимальным вмешательством человека.

Концепция «интеллектуальных электростанций» базируется на ряде передовых технологических решений. Важное место среди них занимает технология цифрового двойника - виртуальной копии физических промышленных объектов, таких как энергоагрегаты, трансформаторные подстанции или ветроэнергетические установки. Цифровой двойник создаётся на основе самых разнообразных данных с помощью многочисленных датчиков на оборудовании объекта. Данная модель формируется путем интеграции информации от множества сенсоров и различных источников данных. Она обеспечивает: непрерывный мониторинг

состояния оборудования, возможность оперативной корректировки рабочих параметров, тестирование оптимизационных решений в виртуальной среде. Преимуществом такого подхода является значительное сокращение времени внедрения усовершенствований и минимизация рисков, связанных с испытаниями на действующих энергообъектах.

Оптимальным является создание цифрового двойника на этапе проектирования станции, так как такая модель становится точнее за счёт последовательного совершенствования. Во время эксплуатации цифровой двойник даёт возможность прогнозировать поведение объекта в обстановке изменяющихся требований и условий функционирования, что делает его отличным аналитическим механизмом.

Другой ключевой технологией «умной электростанции» являются автоматизированные системы управления (АСУ ТП). АСУ ТП объединяет в себе комплекс подсистем, включая релейную защиту и автоматику (РЗА), противоаварийную автоматику (ПА), автоматизированную систему коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ), регистраторы аварийных событий (РАС), систему мониторинга и диагностики основного оборудования и другие. Эта система аккумулирует первичные данные о технологических процессах, обеспечивает регулирование параметров и дистанционное управление оборудованием. Кроме того, она служит ключевым источником информации для вышестоящих диспетчерских центров, во многом определяя эффективность управления энергосистемой в целом. Архитектурно АСУ ТП можно разделить на функции: сбор данных с оборудования; обработка данных, локальное управление; визуализация, архивирование данных, диспетчеризация и интеграция с бизнес-процессами (планирование ремонтов, логистика топлива). Современные АСУ ТП превращают электростанции в «цифровые предприятия», где большой процент решений принимается без участия человека.

Получившие не так давно распространение искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение нашли свое место и в энергетике. Под искусственным интеллектом понимают компьютерные технологии, обладающие возможностями, традиционно присущими человеческому мышлению: обработка визуальных и аудиоданных, стратегическое планирование, анализ проблемных ситуаций, принятие решений и обработка естественного языка. Машинное обучение представляет собой отдельное направление в области искусственного интеллекта. В отличие от ИИ, который ориентирован на решение задач, машинное обучение позволяет системам самостоятельно обучаться на предоставленных данных и улучшать свои показатели через накопление опыта, не требуя прямого

программирования. В энергетике эти системы используются во многих аспектах. Например, динамической балансировки нагрузок: нейросети анализируют потребление в режиме реального времени и перераспределяют мощность между станциями. Также их используют для анализа вибрации и данных, полученных с помощью тепловизоров, например, в качестве выявления износа подшипников до поломки.

Исходя из вышеперечисленных технологий «умной электростанции», можно сделать вывод, что цифровизация процессов управления режимами работы станций позволит снизить аварийность путем прогнозирования отказов оборудования, повысить КПД в результате оптимизации работы и создаст возможность удалённого управления и минимизации человеческого фактора.

Цифровизация управления электрическими станциями – неизбежный этап развития энергетики. В России этот процесс набирает обороты, внедряются «умные» технологии, что позволяет повысить надежность и экономическую эффективность энергосистемы. Дальнейшее развитие требует инвестиций в IT-инфраструктуру и подготовку кадров для работы с цифровыми решениями.

Источники

1. Мартынов В., Зорченко Н., Панфилов Д. Умные электростанции – Цифровое будущее энергетики // ЭП. 2021. №9 (163). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/umnye-elektrostantsii-tsifrovoe-budushee-energetiki> (дата обращения: 21.04.2025).
2. Старкова Г.С. Комплекс экономико-математических моделей прогнозирования потребления электроэнергии в регионах РФ и его инструментальная реализация. Дис. канд. экон. наук: 08.00.13 / Пермский государственный национальный исследовательский институт, 2014.
3. Круглый стол с представителями Министерства энергетики РФ, ПАО «Россети», АО «СО ЕЭС», Министерства промышленности и торговли РФ «Электроэнергия. Передача и распределение» № 1(76), январь-февраль 2023.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИИ

Халиуллина Г.И. ¹, Валиуллина Д.М. ²

^{1,2}ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹gulshat1907@gmail.ru, ²valiullinadiliya@mail.ru

Статья представляет собой руководство по проектированию заземляющих устройств для молниезащиты подстанций. Рассмотрены фундаментальные принципы работы заземления при грозовых разрядах, включая скин-эффект, ионизацию грунта и влияние импульсных токов. Детально анализируются компоненты заземляющих систем: горизонтальные сетки, вертикальные электроды, материалы и методы соединения. Особое внимание уделено учету характеристик грунта, методам его искусственного улучшения и современным программным средствам моделирования. Приводятся практические аспекты монтажа, эксплуатации и контроля заземляющих устройств, а также перспективные технологические решения.

Ключевые слова: молниезащита, заземляющее устройство, подстанция, импульсное сопротивление, растекание тока, проектирование заземления, грунтовые характеристики, монтаж заземления.

DESIGN OF GROUNDING DEVICE FOR LIGHTNING PROTECTION OF SUBSTATION

Khaliullina G.I. ¹, Valiullina D.M. ²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

¹gulshat1907@gmail.ru, ²valiullinadiliya@mail.ru

The article is a guide to designing grounding devices for lightning protection of substations. The fundamental principles of grounding during lightning discharges are considered, including the skin effect, soil ionization and the influence of pulse currents. The components of grounding systems are analyzed in detail: horizontal grids, vertical electrodes, materials and connection methods. Particular attention is paid to taking into account the characteristics of the soil, methods of its artificial improvement and modern software for modeling. Practical aspects of installation, operation and control of grounding devices, as well as promising technological solutions are presented.

Key words: lightning protection, grounding device, substation, impulse resistance, current spreading, grounding design, soil characteristics, grounding installation.

Эффективная молниезащита подстанции — это сложная инженерная задача, где заземляющее устройство играет ключевую роль. Многие ошибочно полагают, что достаточно установить молниеотводы и соединить их с землей, но реальность гораздо сложнее. Давайте детально разберем все аспекты проектирования заземления, от теоретических основ до практических нюансов монтажа.

Когда молния попадает в молниеприемник подстанции, в землю уходит колоссальный электрический заряд - токи могут достигать 100-200 кА при длительности импульса всего несколько микросекунд. Главная задача заземляющего устройства - безопасно принять этот импульс и равномерно распределить его в грунте. При этом возникают несколько критически важных физических явлений, которые необходимо учитывать в проекте.[1]

Во-первых, из-за высокой скорости нарастания тока проявляется скин-эффект - ток стремится распространяться по поверхности проводника, а не по всему его сечению. Это увеличивает эффективное сопротивление системы на высоких частотах. Во-вторых, при прохождении импульсного тока через грунт возникает эффект ионизации, который временно снижает удельное сопротивление почвы вокруг заземлителя. В-третьих, индуктивные свойства протяженных заземлителей создают дополнительное реактивное сопротивление для быстропеременных токов.

Современное заземляющее устройство подстанции представляет собой сложную систему взаимосвязанных элементов. Основу составляет горизонтальная сетка из стальных полос, уложенных в земле на глубине 0,5-0,7 метра. Типичное сечение полосы - 40×4 мм или 50×5 мм. Шаг сетки обычно составляет 5-10 метров, образуя своеобразную "электромагнитную подушку" под оборудованием подстанции.

К этой сетке добавляются вертикальные заземлители длиной 3-6 метров, располагаемые по периметру и в ключевых точках подстанции. Они выполняют несколько функций: снижают общее сопротивление заземления, улучшают растекание тока в глубину и обеспечивают дополнительную защиту при возможном повреждении горизонтальных элементов. Для вертикальных заземлителей обычно используют стальной круглый прут или уголок диаметром 16-20 мм или уголковую сталь 50×50 мм.

Особое внимание уделяется соединению всех элементов системы. Сварные соединения должны быть выполнены с нахлестом не менее 100 мм и иметь длину шва не менее 40-60 мм. Все сварные швы обязательно покрываются антикоррозионными составами, так как именно в местах соединений чаще всего возникает коррозия. [2]

Свойства грунта - это, пожалуй, самый изменчивый и сложный фактор в проектировании заземления. Удельное сопротивление грунта может

варьироваться от 10 Ом·м для влажной глины до нескольких тысяч Ом·м для скальных пород или сухого песка. При этом в пределах одной подстанции часто встречаются участки с разными типами грунта.

Для точного определения параметров грунта проводятся геоэлектрические исследования методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). На практике часто встречаются многослойные структуры грунта, когда на небольшой глубине залегают слои с резко отличающимися характеристиками. Например, поверхностный слой суглинка (50 Ом·м) может лежать на пласте известняка (2000 Ом·м).

В сложных случаях применяют искусственное улучшение свойств грунта:

- Химическое засоление (растворы солей меди или обычной поваренной соли)
- Использование бентонитовых смесей
- Укладка специальных электропроводящих бетонов
- Установка глубинных заземлителей, достигающих водоносных слоев
- Традиционные методы расчета заземления, основанные на формулах Лауренти или Шварца, дают лишь приблизительную оценку. [3]

Наиболее точные результаты дает метод конечных элементов, реализованный в программах типа CDEGS или ETAP. Эти комплексы позволяют построить трехмерную модель заземляющего устройства с учетом реальной конфигурации и свойств грунта.

Особое внимание уделяется расчету распределения потенциалов на поверхности земли при ударе молнии. Это важно для обеспечения электробезопасности персонала. Современные нормы требуют, чтобы напряжение прикосновения не превышало допустимых значений (обычно не более 5-10 кВ для импульсных воздействий).

Качество монтажа заземляющего устройства не менее важно, чем грамотный проект. Наиболее распространенные проблемы, возникающие при строительстве:

- Коррозия соединений из-за некачественной сварки
- Механические повреждения заземлителей при земляных работах
- Высыхание или промерзание грунта, ведущее к ухудшению параметров
- Разрушение антикоррозионных покрытий

Для контроля состояния заземляющего устройства проводятся регулярные измерения:

- Сопротивления растеканию тока (методом амперметра-вольтметра или специализированными приборами)
- Проверка целостности контура (методом падения напряжения)
- Контроль коррозии выборочных участков

Особое внимание уделяется местам подключения молниеотводов и разрядников. Эти точки испытывают наибольшие динамические нагрузки при грозовых разрядах и требуют периодического осмотра. [4]

Проектирование заземляющего устройства для молниезащиты подстанции - это комплексная задача, требующая глубоких знаний в области электротехники, материаловедения и геологии. Качественно выполненный проект и правильно смонтированное заземление - это гарантия долговечной и надежной защиты дорогостоящего оборудования подстанции от грозовых перенапряжений. Современные расчетные методы и новые материалы позволяют создавать эффективные системы даже в самых сложных условиях, но при этом не отменяют необходимости тщательного контроля качества на всех этапах - от проектирования до эксплуатации.

Источники

1. Никифоров А.И., Ярош А.С. Проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики. [Электронный ресурс]. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45690845_43258035.pdf (дата обращения: 25.04.25).
2. РД 34.21.122-87 : Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений / Минэнерго СССР. - Введ. 1987-07-01. - М. : СПО ОРГРЭС, 1987. - 56 с.
3. ГОСТ Р ИЕС 62305-1-2010 : Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы. - Введ. 2012-01-01. - М. : Стандартиформ, 2011. - 82 с.
4. Кузелев, М.В. Электрическая часть станций и подстанций : учебник для вузов / М.В. Кузелев, Б.Н. Неклепаев. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 2010. - 592 с. - ISBN 978-5-283-03246-5.

ЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Халиуллина Г.И. ¹, Валиуллина Д.М. ²

^{1,2}ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹gulshat1907@gmail.ru, ²valiullinadiliya@mail.ru

В статье рассматриваются современные подходы и технологии по обеспечению молниезащиты подстанций, которые играют ключевую роль в защите энергетической инфраструктуры от молний и связанных с ними повреждений. Отмечается важность использования как активных, так и пассивных систем молниезащиты, включая новейшие разработки, такие как плазменные разрядники, которые способны отклонять молнию от защищаемых объектов. Также акцентируется внимание на роли технологий мониторинга статических и динамических электростатических полей, позволяющих оперативно оценивать риски и адаптировать меры защиты в режиме реального времени.

Ключевые слова: подстанция, молниезащита, электромагнитная совместимость, энергетическая инфраструктура.

Э EFFECTIVE SUBSTATION LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS: MODERN APPROACHES AND TECHNOLOGIES

Khaliullina G.I. ¹, Valiullina D.M. ²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

¹gulshat1907@gmail.ru, ²valiullinadiliya@mail.ru

The article discusses modern approaches and technologies for providing lightning protection for substations, which play a key role in protecting energy infrastructure from lightning and related damage. The importance of using both active and passive lightning protection systems is noted, including the latest developments such as plasma arresters, which are capable of deflecting lightning from protected objects. The focus is also on the role of static and dynamic electrostatic field monitoring technologies, which allow for rapid risk assessment and adaptation of protective measures in real time.

Key words: substation, lightning protection, electromagnetic compatibility, energy infrastructure.

В условиях увеличения частоты и силы атмосферных электрических разрядов, эффективная молниезащита подстанций становится неотъемлемой

частью обеспечения надежности электроэнергетических систем. Современные методы, включающие использование интегрированных молниезащитных систем, технологии мониторинга статических и динамических электростатических полей, а также применение активных молниезащитных устройств, позволяют существенно повысить уровень безопасности оборудования и минимизировать риски отключений и повреждений. Исследование и внедрение таких решений не только способствуют улучшению эксплуатационных характеристик подстанций, но и поддерживают устойчивый и надежный энергетический баланс в условиях изменяющегося климата.

Подстанции, где осуществляется трансформация и распределение электроэнергии, подвержены разнообразным электрическим и электромагнитным воздействиям. Попадание молнии в оборудование подстанции может привести к серьезным повреждениям, отключениям, финансовым потерям и потенциальной опасности для людей, обслуживающих эти объекты. Поэтому правильное проектирование и внедрение системы молниезащиты играют решающую роль в снижении рисков и обеспечении балансировки нагрузок в электрической сети. [1]

Традиционные системы молниезащиты включают громоотводы, которые обычно размещаются на высоте и направляют электрические разряды в землю, минимизируя вероятность повреждения оборудования. Однако с развитием технологий появились новые и более эффективные методы защиты.

Одним из таких подходов являются интегрированные молниезащитные системы, которые сочетают в себе как пассивные, так и активные элементы защиты. Это может включать в себя системы мониторинга, которые позволяют заранее определять вероятность удара молнии и принимать превентивные меры.

При выборе элементов молниезащиты учитывается экономичность принимаемого решения, технологические и конструктивные особенности объектов. Во всех возможных случаях высокие сооружения целесообразно использовать как отдельно стоящие молниеотводы. Молниеприемники подразделяются на искусственные и естественные. Искусственные молниеприемники устанавливаются на объекте или вне его границ и могут быть следующих типов: стержневые, тросовые, сетки. Естественные молниеприемники — это некоторые конструктивные элементы защищаемого объекта. В качестве естественных молниеприемников могут использоваться конструктивные элементы зданий и сооружений: металлические кровли; металлические конструкции крыши (фермы, соединенная между собой стальная арматура). Токоотводы обеспечивают отвод тока молнии от

молниеприемника в землю. Для предотвращения опасного искрения токоотводы должны располагаться так, чтобы между точкой поражения и землей ток растекался по нескольким путям и длина их была минимальной. [2]

Совсем недавно начали использоваться активные молниезащитные системы, которые способны снижать вероятность попадания молнии в защищаемый объект. Эти устройства, такие как системы, использующие плазменные разрядники, могут изменять электрические поля на местах, тем самым отклоняя молнию от цели. Их внедрение на подстанциях стало значительным шагом вперед в области молниезащиты, поскольку они не только защищают оборудование, но и снижают затраты на его обслуживание.

Автоматизация выбора молниезащиты включает в себя использование специальных программных комплексов и систем, которые позволяют проводить расчеты и анализ данных. Эти системы используют информацию о географическом положении подстанции, климатических условиях, характеристиках оборудования и других факторах, чтобы определить наиболее эффективный тип молниезащиты, места установки молниеотводов, расчет длины молниезащитных проводников и т.д. [3]

Совершенствование технологий мониторинга статических и динамических электростатических полей также играет важную роль в молниезащите подстанций. Внедрение современных сенсорных систем и программного обеспечения для анализа данных позволяет оперативно оценивать риски и адаптировать меры защиты в реальном времени. Эти технологии помогают поддерживать высокий уровень безопасности и надежности, а также предсказывать и реагировать на потенциально опасные условия.

С учетом постоянно изменяющегося климата и увлечения мира новыми технологиями, надежная система молниезащиты подстанций становится не только необходимостью, но и основой для устойчивого развития энергетической инфраструктуры. Интеллектуальные системы молниезащиты, интеграция активных и пассивных методов, а также использование современных технологий мониторинга и анализа являются ключом к обеспечению долгосрочной безопасности и надежности подстанций. [4]

Источники

1. Никифоров А.И., Ярош А.С. Проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики. [Электронный ресурс]. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_45690845_43258035.pdf (дата обращения: 25.04.25).

2. Шукин О.С. Техника Высоких Напряжений // Издательство Нижневартковского государственного университета, 2014 [Электронный ресурс]. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24911146_37252633.pdf (дата обращения: 25.04.25).
3. Обухова А.О. Автоматизация расчета молниезащиты подстанции 110/10 кВ [Электронный ресурс]. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_56916916_41279122.pdf (дата обращения: 25.04.25).
4. Карякин Р.Н. Справочник по молниезащите. М.: Энергосервис, 2005. 880 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Хасаншин И.С.¹, Денисова А.Р.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
ilshat.khasanshin999@mail.ru¹

Современная электроэнергетика переживает трансформацию, связанную с внедрением цифровых технологий, среди Интернета вещей (IoT) занимает ключевое место. Интернет вещей позволяет создавать интеллектуальные системы, способные оптимизировать генерацию, распространение и потребление энергии. В статье исследования возможности применения Интернета вещей в электроэнергетических системах: умные сети (Smart Grid), интеллектуальные счетчики, прогнозирование нагрузки, интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ), управление микросетями и прогнозирующая аналитика. Особое внимание уделяется преимуществам технологий, таким как повышение эффективности, снижение потерь и рост устойчивости энергосистемы. Также анализируются вызовы, включая вопросы кибербезопасности, масштабируемости и стандартизации. В статье говорится, что IoT не только модернизирует энергетику, но и формирует основу для перехода к децентрализованным и экологичным моделям энергоснабжения.

Ключевые слова: интернет вещей, электроэнергетические системы, кибербезопасность, интернет, датчики.

THE USE OF THE INTERNET OF THINGS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Khasanshin I.S.¹, Denisova A.R.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
ilshat.khasanshin999@mail.ru¹

The modern electric power industry is undergoing a transformation related to the introduction of digital technologies, and it occupies a key place among the Internet of Things (IoT). The Internet of Things makes it possible to create intelligent systems capable of optimizing energy generation, distribution, and consumption. The article examines the possibilities of using the Internet of Things in electric power systems: smart grids, smart meters, load forecasting, integration of renewable energy sources (RES), microgrid management and predictive analytics. Special attention is paid to the advantages of technology, such as increased efficiency, reduced losses and increased stability of the energy system. Challenges are also

analyzed, including cybersecurity, scalability, and standardization issues. The article says that IoT is not only modernizing the energy sector, but also forms the basis for the transition to decentralized and environmentally friendly energy supply models.

Keywords: Internet of things, electric power systems, cybersecurity, Internet, sensors.

Электроэнергетические системы — это сложная работа, требующая точного баланса между генерацией, передачей и потреблением. Традиционные методы управления, основанные на ручном контроле и периодических замерах, уже не соответствуют вызовам современности: растущему спросу на электроэнергию, обеспечению постоянных возобновляемых источников и необходимости минимизировать экологический след. Интернет вещей (IoT) предлагает решения этих проблем, превращая энергосистемы в динамичные, самонастраивающиеся сети.

IoT предполагает использование подключенных устройств — датчиков, исполнительных элементов и платформ анализа данных, объединенных через Интернет. В энергетике это означает, что каждый компонент системы — от электростанции до домашнего счетчика — становится «умным», передавая информацию в режиме реального времени. Например, датчики на ЛЭП могут отслеживать перегрузки, а интеллектуальные выключатели — автоматически перенаправлять потоки энергии при авариях.

Одним из основных направлений развития Интернета вещей являются умные сети (Smart Grid). В отличие от традиционных, Smart Grid использует двусторонний поток данных между поставщиками и потребителями. Датчики, установленные на трансформаторах, подстанциях и даже у домашних пользователей, собирают информацию о напряжении, токе, частоте и качестве энергии. Алгоритмы машинного обучения анализируют данные, прогнозируя пиковые нагрузки и предотвращение аварий. В стандартах, например, IoT-платформы позволяли предотвращать отключения на 30% за счет перераспределения нагрузки при лесных пожарах [1].

Важным элементом Smart Grid стали интеллектуальные счетчики. Они не только фиксируют потребление энергии, но и передают данные врачам за 15–30 минут, что позволяет поставщикам анализировать модели солнечного света. В Европе массовый переход по таким счетчикам сократил коммерческие потери (включая хищения) на 40%. Для потребителей это тоже выгодно: мобильные приложения, подключенные к счетчикам, показывают затраты в режиме реального времени, стимулируя экономию.

IoT революционизирует управление спросом (Demand Response). Раньше энергокомпании решали проблему пикового потребления, запуская резервные электростанции, что дорого и вредно для окружающей среды. Новое IoT-устройство позволяет гибко регулировать нагрузку. Умные

термостаты, подключенные к сетям, могут временно отключать кондиционеры в домах, на промышленных предприятиях — переносить энергоемкие процессы в ночное время. При такой системе Япония снизила пиковую нагрузку в Токио на 10%, что исключает необходимость строительства новой ТЭЦ [2].

Интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — еще одна область, где IoT незаменим. Солнечные панели и ветрогенераторы зависят от погоды, что создает нестабильность в сетях. Эти решения IoT помогают сбалансировать колебания. Например, датчики на солнечных фермах прогнозируют выработку на основе данных об облачности, а системы хранения энергии (например, умные батареи Tesla) автоматически компенсируют недостаток. В Германии, где доля ВИЭ составляет 40%, IoT-платформы объединяют миллионы домашних солнечных установок в виртуальные электростанции, стабилизируя национальную сеть.

Предиктивная аналитика на основе IoT меняет подход к обслуживанию оборудования. Раньше ремонт проводился по графику или после поломки. Теперь датчики вибрации, температуры и тока на трансформаторах или турбинах выявляют аномалии до критического состояния. В газовой энергокомпании Fortum использует такую систему, сокращая расходы на обслуживание на 25% и увеличивая срок службы оборудования [3].

Отдельное направление — микросети, локальные энергосистемы, способные работать автономно. Интернет вещей здесь играет роль координатора: определяет, когда необходимо переключиться на солнечную батарею, дизель-генератор или накопители. В другом случае, где миллионы людей не имеют доступа к центральным сетям, IoT-микросети на базе солнечной энергии излучают электричество целым деревням, адаптируясь к изменениям в солнце и погоде.

Однако внедрение IoT в энергетике сталкивается с вызовами. Кибербезопасность — главный риск. В 2015 году хакерская атака на украинскую энергосистему оставила без света 230 тыс. человек — уязвимость оказалась из-за слабой защиты IoT-устройства. Энергокомпании последовательно инвестируют в шифрование данных и методические технологии для идентификации транзакций.

Другая проблема — масштабируемость. Энергосистемы генерируют петабайты данных, и их обработка требует мощных облачных платформ и Edge-вычислений (анализ на уровне устройства). Кроме того, отсутствие единых стандартов совместимости устройств разных производителей. Инициативы типа IEEE P2668 (стандарт для IoT в энергетике) призваны решить эту проблему, но их внедрение идет медленно.

Несмотря на сложность, потенциал IoT в энергетике огромен. Технология уже меняет ландшафт науки: по прогнозам McKinsey, к 2025 году IoT-решения сгенерируют для энергетиков прибыль в размере \$11 млрд. Будущее связано с интеграцией IoT с искусственным интеллектом и 5G-сетями, что ускоряет обработку данных и повышает точность решений. Например, в Китае тестируют AI-алгоритмы, которые в связке с IoT-датчиками оптимизируют работу угловых электростанций, снижая выбросы на 20% [4].

Уже сегодня Интернет вещей доказывает свою эффективность. В Бразилии умные сети сократили потери при передаче энергии с 16% до 11%, а в Индии IoT-системы на солнечных электростанциях увеличили их КПД на 15%. Эти примеры показывают, что интернет вещи — не просто технологический тренд, необходимое условие для перехода к устойчивой, децентрализованной и цифровой энергетике.

Однако успех зависит от устойчивости игрока. Государствам необходимо регулировать регуляторные рамки, стимулировать инвестиции в Интернет вещей и развивать цифровую инфраструктуру. Производители оборудования должны обеспечить безопасность и совместимость устройства. Потребителям же предстоит принять новую роль — из пассивных пользователей стать активными участниками энергорынка, позволяя излишки энергии из своих солнечных панелей через IoT-платформы [5].

В заключение стоит констатировать, что Интернет вещей — это мост между традиционной энергетикой и будущим, где энергосистемы будут гибкими, яркими и экологичными. Технология не только определяет текущие проблемы, но и открывает возможности, о которых раньше не задумывались: от «умных» городов с нулевым углеродным следом до персонализированных тарифов, основанных на анализе поведения потребителей. Как и любая трансформация, этот путь требует времени, инвестиций и преодоления рисков, но альтернативы у человечества нет — следующая энергетическая революция уже началась.

Источники

1. Дорохин В.Н., Соловьев А.А., Тимофеечев А.А., Рожков А.Г. Новые технологии в электроэнергетике. Учебное пособие. Омск: Сибирское отделение Академии военных наук (СО АВН); 2020. с.33.

2. Крохалев Я.В. Особенности промышленной политики в электроэнергетике (на примере Свердловской области). Материалы XXI Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов

«Конкурентоспособность территорий». Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет»; 2021, с.117–119.

3. Колтунова Р.Э., Свинтецкий Я.Я. Управление качеством в электротехнике и электроэнергетике. В сборнике «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование». Курск: ПАО «Университетская книга»; 2022, с.285–289.

4. Мамбетова С.Ш., Ахметова А.С., Ескерова З.А. Влияние интернета вещей на современную экономику. UNIVERSUM: Экономика и юриспруденция. 2023, с. 13–15.

5. Кутовой Г.В. Электроэнергетика вновь перед выбором. ЭНЕРГОНАДЗОР. 2020, с.14–15.

ИНТЕГРАЦИЯ ИОТ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СИЛОВУЮ ПРОВЕРКУ СИЛОВЫХ АГРЕГАТОВ: ПОВЫШЕНИЕ ПРЕДУСМОТРЕННОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Хасаншин И.С.¹, Фетисов Л.В.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

ilshat.khasanshin999@mail.ru¹

В статье исследуются трансформационные подходы к диагностике и управлению силовыми агрегатами в энергетике через интеграцию интернета вещей (IoT) и машинного обучения (МО). Авторы акцентируют внимание на неэффективности традиционных методов технического обслуживания, основанных на плановых ремонтах и реактивном устранении неполадок, и производительности, поскольку предиктивная диагностика позволяет прогнозировать отказы, оптимизировать ограничение оборудования и снижать финансовые потери.

В статье также обсуждаются вызовы, включая проблемы качества данных, интерпретируемости моделей МО и кибербезопасности. Перспективными направлениями развития являются периферийные вычисления, цифровые двойники и генеративный ИИ, которые усиливают прогнозы точности и снижают зависимость от занятости.

Авторы подчеркивают, что переход к прогнозному обслуживанию — не просто технологический тренд, а стратегическая необходимость для повышения надежности энергосистемы в условиях глобального энергоперехода. Ключевыми факторами успеха становятся модернизация оборудования, подготовка кадров и поддержание нормативной базы для работы с ИИ.

Ключевые слова: IoT, машинное обучение, предиктивная диагностика, силовые агрегаты, электрические системы.

INTEGRATION OF IOT AND MACHINE LEARNING INTO POWER UNIT VALIDATION: IMPROVING THE FORESIGHT AND EFFECTIVENESS OF SYSTEM MANAGEMENT

Khasanshin I.S.¹, Fetisov L.V.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

ilshat.khasanshin999@mail.ru¹

The article explores transformational approaches to diagnostics and control of power units in the energy sector through the integration of the Internet of Things (IoT) and machine learning (MO). The authors focus on the inefficiency of traditional maintenance methods based

on scheduled repairs and reactive troubleshooting, and productivity, since predictive diagnostics can predict failures, optimize equipment limitations, and reduce financial losses.

The article also discusses challenges, including issues of data quality, interpretability of MOD models, and cybersecurity. Promising areas of development are peripheral computing, digital twins, and generative AI, which enhance accuracy forecasts and reduce dependence on employment.

The authors emphasize that the transition to predictive maintenance is not just a technological trend, but a strategic need to improve the reliability of the energy system in the context of the global energy transition. Equipment upgrades, staff training, and maintaining a regulatory framework for working with AI are key success factors.

Keywords: IoT, machine learning, predictive diagnostics, power units, electrical systems.

Современная энергетика стоит на пороге трансформации, вызванной необходимостью перехода к устойчивым, безопасным и экономически выгодным методам эксплуатации оборудования. Силовые агрегаты, будь то газовые турбины, дизельные генераторы или гидроэлектростанции, являются ключевыми элементами энергосистемы, отказы которых могут привести к масштабным авариям, возникновению потерь и экологическим рискам. Традиционные подходы к обслуживанию, основанные на реактивном устранении неполадок или плановых ремонтах, всё чаще демонстрируют свою неэффективность. Они не учитывают реальное состояние оборудования, которое ведет к избыточным затратам или, наоборот, к неожиданным простоям. Решением этой проблемы становится предиктивная диагностика, объединяющая интернет вещей (IoT) и машинное обучение (МО). Эта связка технологий не только предупреждает о возможных опасностях, но и оптимизирует управление энергетическими активами, повышая их надежность и КПД [1].

Интернет вещей как основа для сбора данных. Интернет-вещи формируют «нервную систему» для силовых агрегатов. Установленные на оборудовании датчики непрерывности фиксируют следующие параметры: температуру, вибрацию, давление, уровень смазочных материалов, электрические характеристики. Например, в газовой турбине датчики следят за состоянием лопаток, отслеживающих микротрещины или эрозию, а в дизельном генераторе — за износом поршневых колец. IoT-платформы агрегируют эти данные в режиме реального времени, перенося их в облачные хранилища или локальные серверы. Важным преимуществом является масштабируемость: к одной системе можно подключить тысячи устройств, от отдельных узлов до целых электростанций. Однако объемы генерируемой информации колоссальны —

только одна турбина за сутки может произвести несколько терабайт данных. Для этого требуются не только мощные каналы связи, но и интеллектуальной фильтр, чтобы препятствовать значимым сигналам из «шумов».

Машинное обучение: из данных к прогнозам.

Собранные IoT-устройствами данные превращаются в источники машинного обучения. Алгоритмы МО анализируют исторические и текущие показатели, выявляя скрытые закономерности, которые невозможно поддерживать консервативные методы. Например, рекуррентные нейронные сети (RNN) эффективны для обработки временных рядов, таких как колебание вибрации двигателя, алгоритмы кластеризации (например, k-means) позволяют классифицировать режимы работы агрегата. Обученные модели способны предсказывать остаточный ресурс оборудования, определять аномалии и даже предлагать оптимальные условия эксплуатации.

Яркий пример — прогнозирование отказов подшипников в гидрогенераторах. Датчики вибрации фиксируют малейшие изменения амплитуды и колебаний частоты. Модель, обученная на данных о предыдущих поломках, представляет текущие показатели шаблонами, предшествующими происшествиям, и вычисляет вероятность возникновения опасений до 95%. Это позволяет заменить подшипник до того, как разрушилось его соединение с остановкой генератора [2].

Симбиоз IoT и МО в комплексном управлении

Интеграция IoT и машинного обучения меняет парадигму управления энергетическими объектами. Раньше решения принимались на основе усредненных нормативов или субъективного опыта инженеров. Теперь системы управления получают рекомендации, основанные на анализе реального состояния агрегатов. Например, если алгоритм прогнозирует перегрев турбины через 48 часов, система автоматически корректирует нагрузку, запускает дополнительное охлаждение или планирует техническое обслуживание в автономное время.

Такая связь особенно важна для гибридных энергосистем, где сочетаются традиционные и возобновляемые источники энергии. Солнечные панели или ветрогенераторы создаются под воздействием погодных условий, что создает неравномерную нагрузку на сеть. Предиктивная диагностика силовых агрегатов позволяет гибко перераспределять мощность, избегая перегрузок. В территориальных ТЭЦ, где оборудование часто работает на пределе, алгоритмы могут исключать щадящие режимы, продлевающие срок службы котлов.

Кейсы обслуживания

Компания Siemens применяет платформу MindSphere для мониторинга газовых турбин по всему миру. IoT-датчики передают данные о работе

турбины в облаке, где модели МО анализируют их, предупреждая о необходимости очистки лопаток от нагара. Это сокращает расход топлива на 3–5% и увеличивает межсервисные интервалы на 20% [3].

Другой пример — нефтяная платформа в Северном море, где дизельные генераторы критичны для работы оборудования. Внедрение предиктивной системы на базе Azure IoT и ML сократит количество внеплановых остановок на 40%, сэкономяв компании \$1,2 млн в год.

Вызовы и ограничения

Несмотря на потенциал, интеграция IoT и МО сталкивается с проблемами. Во-первых, качество данных: датчики могут выходить из здания, а шумы сообщать о происшествиях. «Мусор на входе — мусор на выходе» — это правило актуально для любой модели МО. Во-вторых, сложные результаты: нейросети часто работают как «черный ящик», что затрудняет принятие решений в тяжелых условиях. В-третьих, кибербезопасность: подключенные к интернету устройства становятся мишенью для хакеров. Атака на систему управления электростанцией может иметь катастрофические последствия.

Кроме того, внедрение технологий требует немалых инвестиций. Малые предприятия часто не могут позволить себе IoT-инфраструктуру и оплату труда ученых, работающих с данными. Однако развитие облачных сервисов (AWS IoT, Google Cloud IoT) и открытых библиотек (TensorFlow, PyTorch) постепенно снижает порог входа [4].

Будущее предиктивной диагностики

Эксперты прогнозируют, что к 2030 году до 80% компаний будут применять прогностические системы. Тенденции указывают на несколько направлений развития:

Edge Computing — обработка данных на уровне датчиков, что обеспечивает задержку и нагрузку в сети.

Цифровые двойники — виртуальные копии агрегатов, которые имитируют их поведение в режиме реального времени, позволяя тестировать сценарии без риска для физического оборудования.

Генеративный ИИ — модели типа GPT-4, способные привести новые шаблоны поломок для обучения алгоритмов в условиях дефицита данных.

Блокчейн — для защиты данных IoT-устройств и решений аудита, принимаемых последовательного управления [5].

Заключение

Интеграция IoT и машинного обучения в прогнозную оптимизацию силовых агрегатов — это не просто технологический апгрейд, стратегический императив для надежности. Она превращает реактивное обслуживание в проактивное, управление активами — в науку, основанное

на данных. Компании, которые внедряют эти решения, дают не только экономию на ремонте, но и конкурентное преимущество в эпоху энергетического перехода. Однако успех создания зависит от комплексного подхода: модернизация оборудования, подготовка кадров и нормативной базы для работы с ИИ. Как сказал основатель Сименса Вернер фон Сименс: «Технологии должны служить людям». В данном случае они привели к тому, что свет в домах не был газом, а на производстве работали без перебоев.

Источники

1. Грунтович Н. В. Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения // Электротехн. системы и комплексы. - 2020. - № 3 (32). - С. 54-59.
2. Великанов Н. Л. Оценка энергоэффективности городских систем транспортировки и подъема воды / Н. Л. Великанов // Транспорт и сервис. - 2024. - № 2. -С. 74-82.
3. A novel approach to optimal pump scheduling in water distribution systems / A. M. Bagi-rov [et al.] // 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, Adelaide, Australia, 24-27 Sept., 2022 / University of Adelaide. - Adelaide, 2022. - Vol. 1. - P. 618-631.
4. Sowby R. B. Review of Energy Management Guidance for Water and Wastewater Utilities // Energy Nexus. - 2023. -P.100235.
5. Голыбин Ю. А. Энергосбережение при автоматизации насосных станций // Уральская горная школа - регионам : материалы междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 6-7 апр. 2020 г. / Урал. гос. гор. ун-т. - Екатеринбург, 2020. - С. 196-197.

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Хидиятов И.М.¹, Фетисов Л.В.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

stalker.with.axe@gmail.com

Работа представляет обзор современных систем автоматического контроля надежности электроснабжения, анализируя их архитектуру, функциональные возможности и перспективы развития в контексте цифровизации энергетики и использования SCADA, IED, Big Data и AI.

Ключевые слова: энергопотребление, надежность электроснабжения, мониторинг, управление, автоматический контроль, цифровизация.

MODERN SYSTEMS FOR AUTOMATIC CONTROL OF POWER SUPPLY RELIABILITY

Khidiyatov I.M.¹, Fetisov L.V.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

stalker.with.axe@gmail.com

The paper presents an overview of modern systems for automatic control of the reliability of power supply, analyzing their architecture, functionality and development prospects in the context of digitalization of the energy sector and the use of SCADA, IED, Big Data and AI.

Keywords: energy consumption, reliability of power supply, monitoring, control, automatic control, digitalization.

Рост энергопотребления и повышение требований к надежности электроснабжения требуют совершенствования систем мониторинга и управления. Современные системы автоматического контроля надежности электроснабжения (САКНЭ) повышают надежность и эффективность работы энергосистем, предотвращая аварии и оптимизируя режимы работы [1]. В работе проведён анализ САКНЭ и их архитектуры, функциональные возможности и перспективы развития в контексте цифровизации и интеграции возобновляемых источников энергии.

Анализ современных систем автоматического контроля надежности электроснабжения (САКНЭ) показывает, что их функционирование базируется на комплексном использовании передовых технологий обработки и анализа больших объемов данных в режиме реального времени [2]. Куршев М.Р. с соавторами подчеркивают критическую роль высокопроизводительных вычислительных систем в обеспечении эффективной работы САКНЭ [2].

Центральным элементом таких систем являются системы сбора данных (SCADA), функциональные возможности которых, по мнению Пожидаева Н.К. и Трухана Д.А., включают не только сбор и обработку информации, но и ее визуализацию, а также формирование отчетности для оперативного принятия решений [3]. Выбор протоколов связи, таких как IEC 60870-5-104, Modbus и DNP3, определяется спецификой интегрируемых устройств и требованиями к скорости и надежности передачи данных [3, 4, 5]. Золотарев С.В. и Бачуринская М.Е. отмечают постоянное совершенствование SCADA-систем и расширение поддержки современных протоколов связи в контексте развития интеллектуальных сетей [4]. В то же время, Тугов Н.Ю. и Тряпкин Е.Ю. акцентируют внимание на необходимости создания высокотехнологичных лабораторных комплексов для моделирования и тестирования САКНЭ, что обеспечивает адекватную оценку их производительности и надежности в сложных условиях эксплуатации [5]. Таким образом, эффективность САКНЭ существенно зависит от интеграции передовых технологий во всех компонентах системы – от устройств сбора данных до программного обеспечения для анализа и визуализации.

Интеллектуальные электронные устройства (IED) выполняют функции защиты, управления и измерения, обеспечивая высокоскоростной сбор и обработку данных. IED обмениваются информацией между собой и с SCADA системами по сети, часто использующей протоколы Ethernet или специализированные сети связи, такие как IEC 61850 [6-8]. Это обеспечивает целостность и оперативность передачи данных, необходимых для эффективного функционирования САКНЭ.

Анализ подходов к построению САКНЭ, представленный в работах Вашуровой Е.А. и Сергеевой А.И., подчеркивает критическую роль интеллектуальных электронных устройств (IED) в обеспечении высокоскоростного сбора и обработки данных [6]. Авторы указывают на необходимость применения стандартизированных протоколов связи, таких как IEC 61850, для обеспечения целостности и оперативности передачи информации между IED и SCADA-системами [7]. Соломин Е.В. с

соавторами детально рассматривают организацию обмена данными между IED и SCADA-системой в рамках стандарта IEC 61850, подчеркивая значение этого стандарта для обеспечения взаимодействия разнообразного оборудования в современных энергосистемах [8].

В контексте обработки больших объемов данных, генерируемых IED и другими источниками, Шпак Д. и Нетребя К. отмечают перспективность применения технологий Big Data для анализа качества электроэнергии и прогнозирования отказов оборудования [9]. Авторы подчеркивают возможности выявления скрытых закономерностей и трендов в больших массивах данных, что позволяет повысить точность прогнозов и эффективность управления энергосистемой.

Жилкина Ю.В. в своей работе анализирует влияние цифровой трансформации электроэнергетики на развитие САКНЭ, отмечая расширенное использование облачных сервисов, искусственного интеллекта и программного обеспечения для повышения эффективности и надежности систем мониторинга и управления [10]. Автор подчеркивает важность интеграции различных систем и источников данных для более полного анализа состояния энергосистемы и принятия оптимальных управленческих решений, что в целом способствует повышению надёжности и экономической эффективности электроснабжения. Таким образом, современные САКНЭ характеризуются сложной интеграцией различных технологий и методов, направленных на обеспечение высокого уровня надежности и эффективности электроснабжения.

Анализ технических характеристик коммерчески доступных САКНЭ показывает существенный разброс значений по точности измерений, надежности функционирования и стоимости внедрения и обслуживания. Высокая точность измерений критически важна для своевременного обнаружения дефектов и предотвращения аварий. На надежность работы САКНЭ влияет как качество оборудования, так и эффективность используемых алгоритмов обработки данных. Стоимость внедрения и эксплуатации САКНЭ зависит от многих факторов, включая масштаб системы, количество контролируемых объектов, функциональные возможности и сложность интеграции с существующей инфраструктурой [11]. В современных системах все чаще используются функции прогнозирования отказов на основе машинного обучения, что повышает стоимость внедрения, но одновременно снижает потенциальный ущерб от аварий.

Опыт применения САКНЭ в различных областях электроэнергетики демонстрирует их эффективность в повышении надежности

электроснабжения. В распределительных сетях САКНЭ позволяют оптимизировать режимы работы, снижать потери электроэнергии и оперативно реагировать на аварийные ситуации [12-13]. На промышленных предприятиях САКНЭ обеспечивают надежное энергоснабжение технологических процессов, предотвращая простои и экономические потери [14]. В транспортной отрасли САКНЭ используются для обеспечения бесперебойного электроснабжения транспортных узлов, повышения безопасности и эффективности перевозок [15]. В то же время, эффективность применения САКНЭ во многом определяется адекватностью выбора системы под конкретные задачи, своевременностью технического обслуживания и квалификацией персонала. Перспективы развития САКНЭ связаны с более широким внедрением технологий искусственного интеллекта, больших данных и усовершенствованием методов прогнозирования отказов энергооборудования.

Источники

1. Анищенко В. А., Мысло Е. Л., Иванова А. Н. Анализ надежности резервированных систем автоматического контроля и управления производственными энергетическими процессами //Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – №. 6. – С. 5-14.
2. Магамадова, Т. С. Применение компьютерных сетевых технологий в информатизации предприятия / Т. С. Магамадова, О. В. Воркунов, А. И. Багаева // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 4, № 5(146). – С. 65-71.
3. Пожидаев Н. К., Трухан Д. А. Инструментальная система автоматизации промышленных систем SCADA //Прикладные вопросы точных наук. Материалы I Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей. – 2017. – С. 264.
4. Золотарев С. В., Бачуринская М. Е. Новая версия SCADA-пакета RsVue 10.0: оптимизация и расширение поддержки современных протоколов для энергетики //Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2011. – №. 11.
5. Тугов Н. Ю., Тряпкин Е. Ю. Развитие лаборатории «цифровая тяговая подстанция» //Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2020. – Т. 2. – С. 25-29.

6. Решение проблемы ошибочных действий в процессе оперативного обслуживания электроустановок / А. Р. Латыпов, В. В. Максимов, О. В. Воркунов [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2025. – № 1(88). – С. 138-141.

7. Feoktistov, D. I. Blockchain smart contract system in power engineering / D. I. Feoktistov, O. V. Vorkunov // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов: в 3 т., Vol. 3. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – Р. 534-537.

8. Соломин Е. В., Топольский Д. В., Топольский Н. Д. Организация обмена данными между адаптивным цифровым трансформатором тока и напряжения и SCADA-системой в стандарте МЭК 61850 //Пром-Инжиниринг. – 2015. – С. 185-190.

9. Миннебаев, Г. Ф. Выбор системы управления системами электропередачи / Г. Ф. Миннебаев // Фундаментальные научно-практические исследования: актуальные тенденции и инновации: сборник научных трудов по материалам XXX Международной научно-практической конференции. – Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2022. – С. 110-114.

10. Жилкина Ю. В. Цифровизация электроэнергетики как "окно возможностей" для повышения эффективности энергосистем государственных участников СНГ //Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14. – №. 4 (56). – С. 142-155.

11. Доан Н. Ш. Исследования по созданию модели системы сбора, контроля и мониторинга данных для систем электроснабжения //Тинчуринские чтения. – 2019. – С. 195-199.

12. Ишелев, И. Ю. Анализ проблем надежности систем электроснабжения / И. Ю. Ишелев // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика: Материалы конференции. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 101-104.

13. Феоктистов Д. И. Особенности контактного мониторинга температуры электрооборудования / Д. И. Феоктистов, О. В. Воркунов, А. М. Маклецов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 6(368). – С. 127-135.

14. Насырова Э. Н. Использование солнечных панелей для электроснабжения собственных нужд подстанции // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике, Казань, 26–28 ноября 2024 года. – Казань:

Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 125-127.

15. Комов А. А. Комплексная автоматизированная система Безопасный город// Вестник Всероссийского института повышения квалификации сотрудников МВД России. – 2008. – №. 1. – С. 75-79.

ТЕХНОЛОГИИ РАБОТ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4-10 кВ МЕТОДОМ РПН

Хидиятуллин Н.М.¹, Миронова Е.А.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
niaz.hidiatullin@yandex.ru¹

В данной статье рассматриваются особенности технологий работ под напряжением, основные цели и задачи, актуальность и их практическая значимость для снижения потерь электрической энергии, а также опыт реализации таких работ в Республике Татарстан.

Ключевые слова: работа под напряжением, технологии, потери, безопасность, недоотпуск электроэнергии.

TECHNOLOGIES OF WORK IN DISTRIBUTION NETWORKS OF 0.4-10 kV BY THE RPN METHOD

Hidiyatullin N.M.¹, Mironova Ye.A.²
^{1,2} FGBOU HE "KGEU", Kazan, Russia
niaz.hidiatullin@yandex.ru¹

This article discusses the features of live work technologies., the main goals and objectives, relevance and their practical significance for reducing electric energy losses, as well as the experience of implementing such work in the Republic of Tatarstan.

Keywords: live operation, technology, losses, safety, under discharge of electricity.

Основные цели и задачи, решаемые при РПН (работа под напряжением) - непрерывность подачи электроэнергии; снижение потерь при ее передаче; упрощенное изменение напряжения линии (замена изоляторов); профилактический характер работ, повышение управляемости системы; упрощение процедуры выдачи нарядов на работу; повышение безопасности работ; увеличение объемов продаж электроэнергии; сокращение времени внеурочных работ и работ в выходные и праздничные дни.

Актуальность и практическая значимость таких работ в улучшении показателей Saidi и Saifi, снижении недоотпуска электроэнергии, повышении производительности труда персонала, снижении потерь электрической

энергии при ее передаче, сокращении персонала диспетчерских служб (не требуется оперативный персонал для переключений в электроустановках и для подготовки рабочего места).

При выполнении работ под напряжением безопасность персонала обеспечивается по следующим схемам: провод под напряжением-изоляция-человек-изоляция-земля; провод под напряжением-изоляция-человек-земля; методом работы «в изоляции»; методом работы «на расстоянии».

В 2017 году в РЭС начали работать методом РПН до 1000 В, затем в 2021 году продолжили методом РПН до 10 кВ. Основные виды работ, выполняемые при техническом обслуживании распределительных устройств 0,4 -10 кВ, методом РПН:

- монтаж и подключение ответвления 0,22 кВ (0,4 кВ), выполненного СИП (самонесущим изолированным проводом), к зданию от ВЛИ - 0,4 кВ с деревянными опорами с железобетонными приставками (с железобетонными опорами, с деревянными опорами);
- подключение, отключение ответвления 0,22 кВ (0,4 кВ), подключение фонаря уличного освещения выполненных СИП от ВЛИ 0,4 кВ с применением АГП (автогидроподъемника);
- замена спусков 0,22 кВ (0,4 кВ) от выносного щита учета на опоре до ВЛ-0,4 кВ с деревянными опорами с железобетонными приставками (с железобетонными опорами, с деревянными опорами);
- замена анкерного зажима и анкерного кронштейна на угловой анкерной опоре ВЛИ 0,4 кВ с применением АГП;
- техническое обслуживание разъединителя РЛНД на ВЛ 6(10) кВ с применением ПС,
- замена промежуточной железобетонной (деревянной, деревянной с железобетонной приставкой) опоры на ВЛ 6(10) кВ с применением ПС;
- замена траверсы на промежуточной опоре ВЛ 6(10) кВ с применением АГПИ;
- перетяжка проводов на ВЛ 6 (10) кВ с применением АГПИ под напряжением;
- регулировка стрелы провеса проводов на ВЛ 0,4 кВ с деревянными опорами с железобетонными приставками (железобетонными опорами; деревянными опорами) под напряжением;
- замена автоматического выключателя в РУ 0,4кВ;
- сухая чистка изоляции ТП-КТП 10/0,4 кВ;
- чистка оборудования ТП 6(10)/0,4 кВ с увлажнением;
- чистка оборудования ТП 6(10)/0,4 кВ сухим способом;

- доливка масла в силовой трансформатор на КТП 0,4/10 кВ (всех типов), ЗТП 0,4/10 кВ, РТП 0,4/10 кВ;
- обрезка кроны деревьев на ВЛ 0,4-10 кВ.

С экономической точки зрения использование методов РПН позволяет снизить недоотпуск электроэнергии и время на производство работ. Например, замена изоляторов на ВЛ 10 кВ на одной опоре при выполнении работы с отключением, с учетом времени на планирование, подачу заявок согласование работы, предупреждения потребителей, вывода в ремонт, подготовки рабочего места, ремонта, восстановления и ввода в работу займет 13 дней. Если же выполнять работы без снятия напряжения, то менее двух часов.

При выполнении одной из наиболее распространенных видов работ под напряжением - замене дефектных изоляторов на стеклянные и полимерные новых марок на ВЛ 10 кВ методом РПН с применением АГПИ бригада работала с 9:03 по 15:42 часов. (6 часов 39 минут). В это время, 349 точек учета находились без перебоя электроэнергии.

Увеличение безопасности труда при РПН становится возможным благодаря строгому соблюдению главных правил: защита работника от поражения электрическим током; защита электроустановки от повреждения и короткого замыкания.

В Сетевой Компании работы методом РПН проводятся с 2009 года. За 14 лет использования этого метода не зафиксировано ни одного несчастного случая. С каждым годом методы РПН развиваются, заказывается новые современные инструменты, защитные средства для безопасного производства работ.

Источники

1. Стандарт предприятия «Требования к распределительным сетям». Организация и проведение работ под напряжением на оборудовании распределительных сетей до 1000 В. СТП 9001.7.3.2-08-01-2018-(63/218).
2. Технологическая карта №ТК-219-РПН-23 от 18.02.2023.
3. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (утверждены Приказом Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 24.07.2013 № 328н). – consultant.ru>document/cons_doc_LAW_372952 (дата обращения: 03.12.2024). – Текст : электронный.

ВЛИЯНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ И РЕЖИМНОЙ АВТОМАТИКИ

Чернов Д.В.¹, Писковацкий Ю.В.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
davidchernov16@gmail.com

В настоящее время проблемы энергоэффективности и перехода на возобновляемые источники энергии приобретают особую значимость. В качестве источников энергии увеличивается процент использования газотурбинных (ГТУ), парогазовых (ПГУ) и альтернативных (АИЭ) энергоустановок, внедрение которых оказывает влияние на протекание аварийных процессов в энергосистемах. Вышеуказанные источники имеют существенный недостаток: неспособность устойчиво работать при пониженной частоте переменного напряжения — как в продолжительном, так и в некоторых случаях в краткосрочном режиме. Это часто приводит к их аварийному отключению от технологических защит или автоматики еще до срабатывания устройств противоаварийной автоматики (включая автоматическую частотную разгрузку — АЧР). В результате первоначальный дефицит активной мощности в системе возрастает, что может спровоцировать каскадное развитие аварии с неконтролируемым обесточиванием потребителей в процессе её развития.

Ключевые слова: нетрадиционные источники, противоаварийная автоматика, солнечная энергия.

THE IMPACT OF NON-TRADITIONAL SOURCES OF ELECTRICITY ON THE OPERATION OF EMERGENCY AUTOMATION

Chernov D.V.¹, Piskovatsky Yu.V.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
davidchernov16@gmail.com

Currently, the problems of energy efficiency and the transition to renewable energy sources are becoming particularly important. As energy sources, the percentage of gas turbine (GTU), combined-cycle (CCGT) and alternative (AIE) power plants is increasing, the introduction of which affects the occurrence of emergency processes in power systems. The above sources have a significant drawback: the inability to operate steadily at a reduced AC voltage frequency, both in long—term and in some cases in short-term mode. This often leads to their emergency disconnection from technological protections or automation even before the emergency automation devices (including automatic frequency unloading) are activated. As a

result, the initial shortage of active power in the system increases, which can trigger a cascading development of an accident with uncontrolled de-energization of consumers during its development.

Key words: non-traditional sources, emergency automation, solar energy.

В данной статье рассматривается влияние нетрадиционных источников электроэнергии на функционирование противоаварийной автоматики, что представляет собой важную проблему современной энергетики. Среди таких источников можно выделить солнечную энергию, ветряную энергию, геотермальные источники, а также энергию воды и биомассу. Их использование становится все более популярным благодаря стремлению к уменьшению зависимости от традиционных источников, таких как нефть, уголь и газ. Однако, интеграция этих источников в энергосистемы требует тщательного анализа их влияния на работу противоаварийной и режимной автоматики.

Солнечная энергия является одним из наиболее привлекательных вариантов нетрадиционных источников электроэнергии. Солнечные панели могут успешно работать в условиях независимости от внешних энергетических факторов что позволяет использовать их для автономного питания ответственных объектов. Однако, необходимо учитывать специфику работы солнечных батарей в различных климатических условиях и наличие резервных источников энергии для непрерывной работы. Нестабильность генерации солнечной энергии может привести к сложностям в управлении частотой и напряжением в сети [1]. Так, например, электросеть работает при определенной частоте (в большинстве стран это 50 Гц или 60 Гц). Из-за нестабильной генерации ВИЭ частота в сети может колебаться. Режимная автоматика должна обеспечивать быструю реакцию на эти отклонения, стабилизируя частоту через регулирование нагрузки или подключение/отключение генераторов. А изменение уровня генерации от ВИЭ влияет на напряжение в сети. Если оно выходит за допустимые пределы, это может привести к повреждению оборудования или отключениям потребителей. Автоматические системы регулирования напряжения помогают поддерживать стабильное состояние сети, корректируя подачу реактивной мощности. [2].

Энергия ветра также предоставляет значительный потенциал для обеспечения электроэнергией потребителей, особенно в регионах с устойчивыми ветровыми режимами. Ветрогенераторы могут эффективно работать в условиях переменных скоростей ветра, что делает их привлекательными для объектов, расположенных в регионах с хорошим потенциалом для получения ветровой энергии. Возобновляемая энергетика

зависит от природных факторов, например, скорость ветра. Этот фактор отличается высокой изменчивостью, что приводит к существенным колебаниям в объеме вырабатываемой электроэнергии. Это создает проблемы для режимной автоматики, так как она должна быстро реагировать на изменения в нагрузке и поддерживать стабильность всей энергетической системы. Изменчивость ветровой генерации может вызывать колебания в энергосистеме, что требует внедрения систем прогнозирования и компенсации для обеспечения стабильности.

Геотермальные источники, энергия воды и биомасса также могут играть важную роль в обеспечении энергетической безопасности объектов противоаварийной автоматики. Однако, необходимо учитывать инфраструктурные особенности данных источников энергии и обеспечить их стабильную работу в условиях возможных изменений во внешней среде. Данные источники, хотя и более стабильны по сравнению с солнечной и ветровой энергией, требуют интеграции в единую систему управления для минимизации рисков аварийных ситуаций.

Особенностью современных энергосистем является возрастающая доля генерации от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как фотоэлектрические станции и ветроэнергетические установки (повторение). Их интеграция существенно изменяет традиционные характеристики энергосистемы - динамику переходных процессов, уровни токов короткого замыкания и стабильность напряжения, - что требует адаптации алгоритмов противоаварийной автоматики.

При работе с нетрадиционными источниками электроэнергии необходимо учитывать их изменчивую и нестабильную природу. Например, солнечная энергия может быть недоступна в периоды ночи или пасмурной погоды, в то время как ветряная энергия зависит от скорости и направления ветра. Эти факторы могут повлиять на работу противоаварийной автоматики, так как нестабильное энергетическое питание может вызвать ложные аварийные сигналы или задержку в срабатывании системы [3].

Для обеспечения надежной работы противоаварийной и режимной автоматики при использовании нетрадиционных источников электроэнергии необходимо разработать специализированные алгоритмы и методики. Эти методы должны учитывать особенности работы каждого конкретного источника энергии и предусматривать адаптацию системы автоматики к изменяющимся условиям энергоснабжения [4].

Влияние нетрадиционных источников электроэнергии на работу противоаварийной автоматики требует особого внимания к алгоритмам работы системы. Разработка специализированных методик и исследование принципов работы таких систем важны для обеспечения надежности и

эффективности реализации управляющих воздействий противоаварийной автоматики в условиях с использованием нетрадиционных источников электроэнергии.

Источники

1. Сагиров, В. Р. Основные проблемы, связанные с использованием солнечной энергии / В. Р. Сагиров, Ю. В. Писковацкий // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники : Материалы V Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ. В 2-х томах, Казань, 11–12 октября 2023 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 130-133.

2. Патрашкин Е. А. Возможности использования солнечных электростанций в системе противоаварийной автоматики / Е. А. Патрашкин, Е. А. Патрашкина // 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 2016 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2016. — С. 616-619.

3. Проскурякова Л. Четыре сценария развития возобновляемых источников энергии для России // Материалы Петербургского Международного Форума (ПМЭФ 2016) [Электронный ресурс]. URL: <http://tass.ru/pmef-2016/article/3348989> (дата обращения 14.11.16).

4. Тарасенко, П. В. Анализ физических процессов в вакуумных выключателях при коммутационных перенапряжениях / П. В. Тарасенко // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика: Материалы конференции. В 3-х томах, Казань. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 81-84.

О ПРИМЕНЕНИИ ДУГОГАСЯЩИХ РЕАКТОРОВ В СЕТЯХ 6-35 кВ ОСОБЕННОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Шагеев Р.А.¹, Гиззатова И.Д.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
rusya-shageevvvvvv@bk.ru

В данной работе проводится анализ требований к заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ. Определены виды заземления нейтрали в данных сетях. Рассмотрен мировой опыт заземления нейтрали с определением целесообразности применения конфигурации заземления через дугогасящий реактор с параллельным присоединением низкоомного резистора. При анализе Правил устройства электроустановок определены условия, при которых применяется заземление нейтрали через дугогасящий реактор. Определены условия применения дугогасящих реакторов на подстанциях с выделением преимуществ их применения.

Ключевые слова: сети, электроснабжение, дугогасящий реактор, заземление нейтрали, однофазное замыкание на землю.

ON THE USE OF ARC-EXTINGUISHING REACTORS IN 6-35 kV NETWORKS, THE SPECIFICS OF THEIR OPERATION

Shageev R.A.¹, Gizzatova I.D.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan
rusya-shageevvvvvv@bk.ru

In this paper, the requirements for neutral grounding in 6-35 kV networks are analyzed. The types of neutral grounding in these networks have been determined. The world experience of neutral conductor grounding is considered with the determination of the expediency of using a grounding configuration through an arc-extinguishing reactor with parallel connection of a low-resistance resistor. When analyzing the Rules for electrical installations, the conditions under which neutral grounding is applied through an arc-extinguishing reactor are determined. The conditions for the use of arc-extinguishing reactors at substations are determined, highlighting the advantages of their use.

Keywords: networks, power supply, arc extinguishing reactor, neutral grounding, single-phase earth fault.

В настоящее время вопрос заземления в сетях 6-35 кВ является достаточно важным аспектом в обеспечении надежного электроснабжения потребителя. Важно выделить требования к режиму заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ: в месте замыкания ток однофазного замыкания на землю и величина перенапряжения на неповреждённых фазах не должны влиять на электроснабжение потребителя; конфигурация и схема релейной защиты от ОЗЗ должна соответствовать необходимым требованиям селективности; уровень и объем изоляции оборудования должен обладать необходимым запасом прочности; определение количества, состава и характеристик ограничителей перенапряжения для защиты от перенапряжений в сети; надежность электроснабжения потребителя; обеспечение необходимого сопротивления контура заземления объекта электроэнергетики; безопасность проведения работ персоналом и защищенности оборудования при ОЗЗ.

В мировой электроэнергетике в сетях до 69 кВ используется четыре варианта заземления нейтральной точки электрической сети: изолированная; заземлённая через дугогасящий реактор (ДГР); заземленная через высокоомный или низкоомный резистор; глухозаземленная, которая не применяется в сетях среднего напряжения в Российской Федерации.

Помимо этого, необходимо выделить, что в мире применяется комбинация с ДГР и резисторами. Такой режим заземления нейтрали применяется в сетях 20 кВ в Германии. Дугогасящий реактор обеспечивает гашение перекрытий изоляции при замыканиях на землю, тем самым снижая ёмкость в сети, а низкоомный резистор подключается только кратковременно во время специальным однофазным выключателем, параллельно реактору. Низкоомный резистор таким образом обеспечивает селективность релейной защиты за счёт определения фидера с устойчивым ОЗЗ [1].

Анализируя нормативную документацию в Российской Федерации, можно отметить, что в пункте 1.2.16 Правил устройства электроустановок закреплено следующее: «Работа электрических сетей напряжением 2-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземлённой через дугогасящий реактор или резистор» [2]. В ходе анализа регламентирующих документов, которые определяют режим заземления нейтрали выявлено, что чётких требований к конкретному заземлению нейтрали в сетях 6-35 кВ не присутствует.

Помимо этого, необходимо выделить, что в сетях до 20 кВ с железобетонными и металлическими опорами необходимо обязательно

использовать средства компенсации ёмкостных токов, а также до 35 кВ, где ёмкостные токи могут достигать более 10 ампер (А). Дополнительно регламентируется, что в сетях, где не присутствуют железобетонные и металлические опоры требуется применять средства в сетях 3-6 кВ с токами более 30 А, 10 кВ – более 20 А, а в сетях 15-20 кВ – более 15 А. Также необходимо отметить, что в схемах с генераторами от 6 до 20 кВ необходима компенсация ёмкостных токов при величине более 5 А [3].

Необходимо отметить особенности эксплуатации такого режима заземления нейтрали: при ОЗЗ в сети с дугогасящим реактором возникают большие по величине ёмкостные токи, которые компенсируются индуктивной составляющей, равной по величине ёмкостной. Это позволяет обеспечить нулевое значение тока, что даёт возможность при возникновении первого ОЗЗ не отключать линию электропередач и обеспечивать потребителя электроэнергией. Особенно популярно применение дугогасящего реактора на подстанциях, где присутствует большое количество кабельных линий.

Данное техническое решение в виде дугогасящего реактора в сетях 6-35 кВ имеет следующие преимущества: отсутствие необходимости отключения потребителя при однофазном замыкании на землю; несрабатывание токовой отсечки на линии, т.к. при ОЗЗ наблюдаются достаточно малые остаточные токи; при однофазных замыканиях возможна самоликвидация повреждения; использование ДГР позволяет организовать селективность релейной защиты от ОЗЗ; использование данного технического решения позволяет исключать повреждения трансформаторов напряжения в ходе возникновения феррорезонансных явлений;

– при применении ДГР в сети увеличивается чувствительность сигнализации при однофазном замыкании на землю через большое переходное сопротивление. Анализируя опыт внедрения дугогасящих реакторов, показывает, что при существенных ёмкостных токах в сети 6 кВ и активной проводимости цепи в месте замыкания может превышать 10 кОм. Наличие правильно настроенного в резонанс ДГР может выявлять замыкания на землю даже при больших значениях переходного сопротивления – 10 кОм и менее.

Говоря о российских электрических сетях 6-35 кВ с дугогасящими реакторами можно выделить, что конструктивно реализованы они в следующих конфигурациях – ручное регулирование и с подмагничиванием. Но, к сожалению, без шунтирующего резистора возможна проблема с организацией селективности релейной защиты от

однофазных замыканий на землю. Это приводит к тому, что в таких сетях не могут применяться простые токовые защиты и направленные защиты. В связи с тем, что ДГР компенсирует ток ОЗЗ в месте повреждения до нулевых значений [4].

Также режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор со шунтирующим резистором низкого напряжения, подключенным к вторичной обмотке силового трансформатора напряжением 500 В, обеспечивает возможность реализации селективной защиты от замыканий на землю. Такие защиты запускаются и срабатывают на сигнал, не на отключение в данных сетях.

Наличие низковольтного шунтирующего резистора обеспечивает следующую логику: перед моментом однофазного замыкания ДГР настроен в резонанс, а резистор отключен. На начальном этапе замыкания дуга зажигается, но неустойчива, переменнo гасится и зажигается [5].

Важно отметить, что в этот момент реактор компенсирует емкостный ток, что способствует гашению дуги и неотключению фидера. В случаях устойчивости замыкания в дугогасящих реакторах с выдержкой времени подключается шунтирующий резистор, который включается командой регулятора реактора. Время включения резистора составляет от одной до трёх секунд. За это время шунтирующий резистор создаёт некоторый активный ток в повреждённом фидере. Но при этом, данного тока достаточно для обеспечения селективности работы релейной защиты от замыканий на землю.

При нормальном режиме работы сети шунтирующий резистор отключен от дугогасящего реактора и никаким образом не влияет на точность настройки компенсации ДГР. Во время замыкания резистор подключается до 3 секунд, но при этом, если за этот промежуток времени замыкание самоустранивается, то резистор отключается регулятором дугогасящего реактора. Также важно отметить, если ДГР определяет, что однофазное замыкание возникло и держится более 5 секунд, то также включается низковольтный резистор.

При применении в сетях 6-35 кВ дугогасящих реакторов с низковольтными резисторами можно повысить надежность работы сети, а также снизить аварийность при ОЗЗ. Но в последнее время наблюдается возросшая аварийность в сетях данного уровня напряжения. Это объясняется тем, что дугогасящие реакторы некоторых производителей не соответствовали требованиям и техническим параметрам сети [6, 7].

Подводя итоги, можно сказать, что применение дугогасящих реакторов в сетях 6-35 кВ обуславливается рассчитываемым

электроэнергетическим режимом в данной схеме. Помимо этого, необходимо выделить, что ДГР позволяет обеспечивать надежность электроснабжения потребителя за счёт компенсации ёмкостных токов в сетях при однофазных замыканиях на землю.

Источники

1. Афанасенко А. С., Кудряшев Г. С. Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ и селективность релейной защиты от однофазных замыканий на землю // Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития. 2014. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezhim-zazemleniya-neytrali-v-setyah-6-35-kv-i-selektivnost-releynoy-zaschity-ot-odnofaznyh-zamykaniy-na-zemlyu> (дата обращения: 06.04.2025).
2. Министерство энергетики Российской Федерации. Правила устройства электроустановок / Министерство энергетики Российской Федерации — 6-е и 7-е. — Москва: 2003. — 504 с.
3. Воркунов, О. В. Ограничение токов короткого замыкания с помощью линейного реактора / О. В. Воркунов, Е. В. Яковлева // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 12. — С. 453-456.
4. О технических требованиях к дугогасящим реакторам в распределительных сетях 6-35 кВ / Д. А. Матвеев, А. М. Быкова, А. В. Жуйков [и др.] // Электротехника. — 2016. — № 8. — С. 3-8.
5. Воркунов, О. В. Иммитационное моделирование токоограничивающего линейного реактора / О. В. Воркунов, Л. А. Глоткина, З. М. Шакурова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 4(142).
6. Титенков, С. С., Пугачев, А. А. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю [Текст] / С.С. Титенков, А.А. Пугачев // Энергоэксперт. — 2010. — № 2. — С. 18-25.
7. Хусаенов, И. Р. Современные средства защиты ОРУ и ПС от прямых ударов молнии / И. Р. Хусаенов, О. В. Воркунов, Т. И. Афанасьева // Theory and practice of scientific research: Материалы XXXIX Международной научно-практической конференции,. — Москва: Научный центр "Олимп", 2018. — С. 80-81.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МИКРОСХЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Шаймарданов Т.А.¹, Востриков Д.Ю.², Сандаков В.Д.³

¹ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

^{2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹clever27012005@gmail.com, ²denisesenina@yandex.ru, ³vitalysandakov@gmail.com

В статье рассматриваются принципы разработки энергосберегающих микросхем, предназначенных для использования в распределённых энергетических системах. Приведены современные архитектурные решения, направленные на снижение энергопотребления микроконтроллеров и датчиков. Отмечено влияние таких микросхем на повышение надёжности, автономности и устойчивости работы распределённых источников энергии. Представлены практические примеры применения энергоэффективной микроэлектроники в реальных энергетических установках. Сделаны выводы о перспективах дальнейшего внедрения энергооптимизированных решений в системах управления ВИЭ и микросетях.

Ключевые слова : энергосберегающие микросхемы, распределённые энергетические ресурсы, надёжность, микроконтроллеры, энергоэффективность, ВИЭ, микросети, автономность.

DEVELOPMENT OF ENERGY-SAVING MICROCHIPS TO INCREASE THE RELIABILITY OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES

Shaimardanov T.A.¹, Vostrikov D.Y.², Sandakov V.D.³

¹ KNRTU, Kazan, Russia

^{2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹clever27012005@gmail.com, ²denisesenina@yandex.ru, ³vitalysandakov@gmail.com

This article discusses the principles of designing energy-efficient microchips intended for use in distributed energy systems. It presents modern architectural solutions focused on reducing power consumption in microcontrollers and sensors. The impact of such microchips on improving the reliability, autonomy, and resilience of distributed energy resources is emphasized. Practical examples of implementing energy-saving microelectronics in real-world energy systems are provided. The study concludes with prospects for further integration of energy-optimized solutions in RES control systems and microgrids.

Keywords: energy-efficient microchips, distributed energy resources, reliability, microcontrollers, energy efficiency, renewable energy sources, microgrids, autonomy.

В современных распределённых энергетических системах (солнечные панели, ветряки, микросети и др.) резко возросла роль энергоэффективных микросхем как составной части систем управления и мониторинга. Использование ВИЭ и микрогридов позволяет локально генерировать энергию, но требует надёжной электроники с минимальным собственным потреблением [1]. Существенные тенденции энергосбережения (энергосберегающие лампы, СБ, ВИЭ, «умный дом» и т.д.) включают также разработку микросхем с ультранизким энергопотреблением [2]. Во введении рассмотрим актуальность задачи: ключевые требования к микроконтроллерам и датчикам в распределённых системах — низкое энергопотребление, удалённое питание, автономность и высокая надёжность [2,3]. В этой статье проанализированы значение энергоэффективных ИС для надёжности DER, методы их разработки, практические примеры и влияние на автономность системы.

Значение энергоэффективных микросхем в DER. В распределённых информационно-управляющих системах ограничение энергопотребления узлов предъявляет особые требования: контроллеры должны питаться от удалённых источников, часто по линиям связи, а потребляемый ток — не более нескольких десятков мА при 12–36 В [3]. При этом рост потребления одним модулем не должен снижать стабильность питания всей сети. Энергоэффективные микросхемы уменьшают собственные потери на управление и системную нагрузку, что повышает надёжность. Например, компания Infineon разработала семейство 32-битных микроконтроллеров ХМС4000 для энергоэффективных приводов и ВИЭ, которые «позволяют улучшить энергоэффективность, расширить коммуникационные возможности» систем [4]. Аналогично, новые чипы GD32L233 (ARM Cortex-M23) поддерживают до шести режимов глубокого сна и при максимальной частоте потребляют всего 66 мкА/МГц [5]. Эти примеры иллюстрируют, как архитектурные решения снижают расход энергии самим микроконтроллером.

Методы и технологии разработки. Основной путь повышения энергоэффективности — снижение рабочего напряжения ИС. Исследователи MIT совместно с TI показали, что при переходе питания с ≈ 1 В до 0.3 В возможна 10-кратная экономия энергии. Для этого были разработаны «горячие» схемы памяти и логики под низкое напряжение и встроенный преобразователь DC–DC на кристалле, обеспечивающий

питание этих цепей [6]. Другим важным направлением является использование низкопотребляющих микроконтроллеров с энергооптимизированными архитектурами и множеством режимов ожидания. Интеграция преобразователей энергии (энергетический «харвестинг»: солнечные ячейки, термоэлементы, пьезоэлементы) позволяет снабжать микросхемы запасом энергии без батарей.[7]

Основные методы разработки энергосберегающих ИС можно сформулировать так:

- Пониженное напряжение питания. Проектирование цепей памяти и логики под субвольтовый режим (пример – 0.3 В) [6].
- Встроенная преобразовательная часть. Интеграция на кристалле высокоэффективных DC–DC-конверторов для стабилизации пониженного напряжения [6].
- Ultra-low-power архитектуры. Применение MCU на ядре Cortex-M0+/M23/M4 с расширенными энергорежимами (deep sleep, wake-on-interrupt) [5].
- Адаптивные режимы работы. Делегирование задач микропроцессору только по требованию (прерывистый сбор данных, duty-cycling) [7].
- Энергетический харвестинг и накопление. Использование гибридных источников (солнечные панели + аккумулятор) для бесперебойного питания миниатюрных контроллеров [7].

Эти технологии в комплексе обеспечивают снижение собственных потерь ИС в энергосистемах и являются основой для надёжной и автономной работы интеллектуальных узлов управления [6,7].

Применение энергосберегающих микросхем уже находит отражение в конкретных решениях. Например, описана система управления домашней микросетью, построенная на микроконтроллере: она координирует работу фотоэлектрической панели, топливного элемента и батареи, балансируя нагрузку в сетевом и автономном режимах [8].

Эксперименты подтвердили, что система способна переключаться на островной режим и питать нагрузки от локальных ресурсов при отключении сети. В этом случае низкое потребление самой электронной части существенно продлевает время работы от накопителя энергии.

Другой пример – развертывание сенсорной сети для мониторинга распределённой энергетики. В ряде пилотных проектов показано, что интеграция маломощных IoT-датчиков снижает общее энергопотребление системы и улучшает обнаружение неисправностей[7]. Так, «умный» пилот А (smart grid pilot) обеспечил значительное снижение потребления и

сокращение времени реакции на сбои . Пилот В (адаптивные протоколы) увеличил эффективность передачи данных до 60%. Для гетерогенной сети с ВИЭ (пилот С) адаптивные датчики улучшили протоколы управления потоком, повысив КПД распределения энергии [7]. Эти примеры демонстрируют влияние энергосберегающей электроники на надёжность инфраструктуры: точное и своевременное обнаружение аномалий позволяет предсказывать и предотвращать аварии.

Также на практике используются готовые решения от производителей. Например, фирмы предлагают микроконтроллеры MSP430 и ARM-серии с расширенным набором энергорежимов для солнечных инверторов и ветроустановок. Энергоэффективные ПЛИС и специализированные микросхемы снижают тепловыделение и повышают срок службы оборудования. Использование таких компонентов позволяет построить автономные накопители (ESS) и интеллектуальные инверторы, которые практически не потребляют лишней энергии в режиме ожидания. В целом практические примеры показывают: применение энергосберегающих ИС в DER-системах ведёт к большей устойчивости и автономности энергоснабжения [1,7].

Энергосберегающие микросхемы являются ключевым элементом надёжности распределённых энергосистем. За счёт значительно уменьшенного потребления они снижают тепловую нагрузку и продлевают время работы при отключённом питании. Например, перспективный дизайн нового микрочипа показал в 10 раз более высокую энергоэффективность по сравнению с традиционным [9], что открывает возможности для «самозаряжающейся» электроники. Эксплуатация таких ИС способствует улучшению показателей надёжности: низкая токовая нагрузка контроллеров предотвращает падения напряжения на длинных линиях , а энергоэффективные датчики обеспечивают более качественное обнаружение отказов и управление энергопотоками .

Основные выводы включают:

- Сокращение простоев. Низкое энергопотребление и автономные режимы датчиков позволяют быстро реагировать на аварии и снижать время отключений [7].
- Повышение автономности. Микросхемы с малым энергопотреблением увеличивают продолжительность работы узлов от батарей и харвестинга, что важно для автономных микросетей [9].
- Устойчивость сети. Энергоэффективные компоненты уменьшают нагрузку на ВИЭ-подсистемы и позволяют интегрировать больше возобновляемых источников без перегрузки сети [1,7].

- Экологичность. Снижение потребления электроники в целом уменьшает углеродный след энергетической инфраструктуры.

Таким образом, развитие энергосберегающих микросхем непосредственно повышает эффективность, надёжность и устойчивость распределённых энергетических ресурсов. Дальнейшие исследования и внедрение таких технологий (низковольтные схемы, энергооптимизированные MCU, умные датчики и т.д.) выведет микросети на новый уровень надёжности и автономности [1,7].

Источники

1. Wood E. «Кто и зачем использует микрогрид?», МКА (Автоматизация в энергетике), №15, 2017, с. 107–110 (перевод).
2. Проскуряков Ю. «Распределенные системы учета энергоресурсов», Беспроводные технологии (GSM/GPRS), №4, 2009, с. 48–53.
3. Ключев А., Кустарев П., Платунов А. «Контроллеры с микроэнергопотреблением в распределенных системах управления», Компоненты и технологии, №7, 2001, с. 97–105.
4. Born G. «Новые микроконтроллеры семейства XMC4000 для промышленных приложений», Электронные компоненты, №4, 2012, с. 90–94.
5. AuroraEvernet, «GD32L233 – новая серия ARM Cortex-M23 микроконтроллеров с низким энергопотреблением», 16.12.2022 (Online).
6. Thomson E. (MIT News). «Team develops energy-efficient microchip», MIT Media Lab Press Release, 5 Feb 2008.
7. Sant D., Liu L., Wendig P. и др., «Development of Low-Power IoT Sensors for Smart Electrical Networks», Advances in Nonlinear Variational Inequalities, т.28, вып.3S, 2025, с. 323–330.
8. Belvedere B., Bianchi M., Borghetti A., Paolone M., «A microcontroller-based automatic scheduling system for residential microgrids», Proc. 2009 IEEE PowerTech, Bucarest, 2009, pp. 1–6.
9. ScienceDaily, «Energy-efficient Microchip Could Result In Cell Phones Staying Charged 10 Times As Long», Feb 5, 2008 (MIT).

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Шайхулов Ф.Ф.¹, Востриков Д.Ю.², Сандаков В.Д.³

¹ ФГБОУ ВО «КНИТУ», г. Казань, Россия

^{2,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

¹ fayazshaykh@gmail.com, ² denisesenina@yandex.ru, ³ vitalysandakov@gmail.com

В статье рассматривается применение микроэлектронных датчиков в системах мониторинга состояния электроэнергетических систем. Описаны типы и принципы действия сенсоров, а также архитектура современных распределённых систем мониторинга. Отмечено влияние микроэлектроники на повышение надёжности и эффективности диагностики оборудования. Выявлены ключевые преимущества, такие как компактность, энергоэффективность и возможность беспроводной передачи данных. Также рассмотрены потенциальные риски, включая киберугрозы и необходимость стандартизации. Приведены направления дальнейших исследований и рекомендации по внедрению.

Ключевые слова: микроэлектроника, датчики, мониторинг, электроэнергетические системы, надёжность, IoT, Smart Grid.

APPLICATION OF MICROELECTRONIC SENSORS IN CONDITION MONITORING SYSTEMS OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Shaikhulov F.F.¹, Vostrikov D.Y.², Sandakov V.D.³

¹ KNRTU, Kazan, Russia

^{2,3} KSPEU, Kazan, Russia

¹ fayazshaykh@gmail.com, ² denisesenina@yandex.ru, ³ vitalysandakov@gmail.com

This paper discusses the use of microelectronic sensors in condition monitoring systems for electric power systems. It describes sensor types and operating principles, as well as the architecture of modern distributed monitoring systems. The impact of microelectronics on improving reliability and diagnostic efficiency is emphasized. Key advantages such as compactness, energy efficiency, and wireless communication capabilities are highlighted. Potential risks, including cybersecurity issues and the need for standardization, are also examined. Directions for further research and implementation recommendations are presented.

Keywords: microelectronics, sensors, monitoring, electric power systems, reliability, IoT, Smart Grid.

Обеспечение надёжности электроэнергетических систем (ЭЭС) требует постоянного контроля за состоянием оборудования и сетевых параметров. В рамках концепции «умной сети» (Smart Grid) используются цифровые технологии для двусторонней связи и мониторинга по всей системе передачи и распределения электроэнергии. Современные «умные» сети собирают данные об энергопотреблении и потоках энергии, позволяют автоматически переключаться при нарушениях, тем самым повышая надёжность и эффективность электроснабжения. Одновременно растёт число подключённых устройств и датчиков (IoT), что даёт возможность наблюдать за физическим миром с беспрецедентной точностью и в реальном времени [1]. Однако возросшая связанность систем приводит к увеличению поверхности атаки: злоумышленники могут использовать IoT-устройства для манипуляции потоками энергии и нарушения работы сетей. Цель статьи – рассмотреть роль современных микроэлектронных датчиков в системах мониторинга ЭЭС, оценить их влияние на надёжность энергосистем и определить направления дальнейших исследований [2].

Традиционные системы мониторинга ЭЭС включают АСУ ТП/СКАДА и распределённые системы диспетчерского управления. На питающих подстанциях широко применяются программно-аппаратные комплексы, собирающие данные через дискретные датчики, измерительные трансформаторы и телеизмерительные модули. Синхронизированные векторные измерения (Phasor Measurement Units, PMU) позволяют с высокой точностью оценивать фазовые углы и амплитуды токов/напряжений в реальном времени и являются составной частью систем WAMS (Wide Area Monitoring). Для локальной диагностики оборудования используются классические методы: вибрационный анализ (акселерометры, датчики деформации), термография (ИК-камеры), анализ газов трансформаторного масла (DGA), ультразвуковые и радиочастотные измерения частичных разрядов (ПД) изоляции. Наиболее частые «слабые звенья» электрооборудования – системы изоляции, стыки и высокие нагрузки – требуют постоянного слежения: появление ПД или локального перегрева резко сокращает ресурс оборудования. Например, системы мониторинга трансформаторов обычно включают устройство синхронизированных векторных измерений (ЭНИП-2 PMU), многозадачные счётчики энергии (ESM) и блоки ввода-вывода параметров

РПН и температуры. В совокупности такие системы обеспечивают предиктивную диагностику — определение приближения отказов до их критического проявления. Как отмечают Монтанари и соавт., внедрение онлайн-диагностики и систем оценки состояния электроаппаратуры (схемы РД, температуры, газов) снижает расходы на ремонт и существенно увеличивает надёжность сетей [3].

Микроэлектронные датчики — это миниатюрные интегральные устройства на базе полупроводниковых и МЭМС-технологий, предназначенные для измерения физических параметров. Микроэлектромеханические системы (МЭМС) объединяют в себе микрожёсткие структуры и микроэлектронику для преобразования физических воздействий в электрические сигналы. Например, МЭМС-акселерометры содержат на кристалле подвижную массу и систему пружин — при вибрации меняется ёмкость между электродами, что позволяет измерять ускорение по осям. По принципу действия акселерометры разделяют на конденсативные, пьезорезистивные и пьезоэлектрические подгруппы. Аналогично работают микродатчики давления и деформации: изменение давления на тонкоплёночную мембрану вызывает изменение ёмкости или сопротивления. Также широко распространены датчики тока на эффекте Холла или магниторезистивные сенсоры, позволяющие измерять силы тока бесконтактно. Температурные датчики реализуются в виде полупроводниковых терморезисторов или интегральных чипов (термокомпенсированных цифровых датчиков температуры). Применяются и микросенсоры газов (полупроводниковые химочувствительные слоистые датчики), влажности, освещённости и др. [4].

Благодаря микроэлектронным технологиям удаётся создавать «умные» датчики с встроенной электроникой обработки сигнала и связи (программируемые контроллеры на кристалле). Такие датчики отличаются малыми размерами, низким энергопотреблением и возможностью массового производства. Стэнфордский исследовательский центр отмечал, что комбинация тонкоплёночных технологий и новых температуростойких полупроводников открывает путь к миниатюрным датчикам низкой стоимости и высокой надёжности. Они обеспечивают «in-situ» контроль в труднодоступных и суровых условиях (например, внутри каналов ОРУ или корпуса трансформатора) с возможностью массового развертывания. В частности, перспективны МЭМС-датчики газоанализа для работы при высоких температурах, которые могут заменить громоздкие спектрометры для диагностики смесей топливных газов на ТЭС. Чтобы эффективно

использовать большие сети миниатюрных сенсоров, их часто снабжают возможностью беспроводной передачи данных и автономным питанием (энергопозитив). В результате развивается новая тенденция к «умным сетям» датчиков, где сами сенсоры проводят предварительную обработку и взаимодействуют друг с другом без постоянной поддержки центрального сервера.

Современные системы мониторинга представляют собой многоуровневые архитектуры. На нижнем (сенсорном) уровне размещаются разнообразные датчики (вибро-токовые, температурные, газовые и др.), часто сгруппированные в «узлы сбора данных». Каждый узел содержит набор микроэлектронных сенсоров, преобразователи сигналов и микроконтроллер для локальной обработки. Собранные данные передаются на уровень коммуникаций: это могут быть проводные каналы (Ethernet/оптоволокно, PLC) или беспроводные сети (Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee, сотовые технологии NB-IoT/5G). Передачи чаще организуются через локальные концентраторы или шлюзы, которые агрегируют данные от множества сенсорных узлов. На прикладном уровне функционируют системы диспетчеризации и аналитики (АСУ ТП, SCADA/EMS/DMS), а также облачные платформы для хранения и обработки больших данных.[4]

Важно рассматривать архитектуру в разрезе «слоёв»: физическая инфраструктура (линии, ОРУ, генераторы), сеть передачи данных и прикладные сервисы. На практике сенсоры могут быть связаны прямо с контроллерами РЗА/САУ, либо с независимыми концентраторами. Так, например, в системах мониторинга трансформаторов данные тока и напряжения снимаются измерительными трансформаторами, отправляются в PMU-модули и multifunctional счётчики, а температурные и дискретные сигналы (положение РПН, состояние вентиляторов, влажность) – в аналоговые модули ввода. Далее всё поступает на серверы мониторинга или в облако для вычислительного анализа. Использование беспроводных сенсорных сетей (WSN) позволяет существенно упростить прокладку и расширение сети: миниатюрные сенсоры с интегрированными радиомодулями могут самостоятельно формировать распределённые сети, передающие данные в центральный узел. Такая горизонтальная структура (с учётом переиспользования каналов связи) разрывает традиционные «силосы» данных и позволяет гибко комбинировать данные из разных подсистем.

Интеграция микроэлектронных датчиков в системы мониторинга способствует значительному росту информативности и быстродействия диагностики. За счёт онлайн-контроля оборудования вводится режим

условно-ориентированного обслуживания (Condition-Based Maintenance), при котором ремонт выполняется только по необходимости, что сокращает затраты и время простоя. Постоянный мониторинг вибрации, температуры и тока позволяет выявлять признаки износа или аварий ещё на ранних стадиях, продлевая срок службы аппаратов и повышая надёжность всей сети. Высокая плотность размещения сенсоров и их компактность обеспечивают всесторонний контроль параметров (например, синхронное измерение вибрации по трем осям, см. рисунок) [5].

Кроме того, современные датчики могут автоматически проводить самодиагностику и калибровку, что улучшает стабильность и достоверность измерений.

Среди преимуществ отмечаются также возможность работы датчиков от микро-аккумуляторов или за счёт энергоаккумулирующих технологий (например, пьезоэлектрических генераторов), что исключает необходимость частой замены батарей. Распределённые сети микро-датчиков упрощают расширение и ремонт систем мониторинга. Быстрый цифровой обмен информацией по современным протоколам (IEC 61850, OPC UA, MQTT и др.) обеспечивает совместимость оборудования разных производителей и интеграцию в единые платформы управления.

Однако есть и потенциальные риски. Уязвимость сетевых датчиков к кибератакам является серьёзной проблемой: увеличенная связанность систем и удалённый доступ могут быть использованы злоумышленниками для перегрузки сетей, подмены данных или массового «заглушения» каналов связи. Это требует внедрения надёжных механизмов шифрования, аутентификации и сегментации сетей. Высокая стоимость внедрения новых сенсорных сетей и требования к модернизации инфраструктуры также усложняют их использование: во многих регионах устаревшее оборудование не рассчитано на подключение дополнительных датчиков и требует существенной реконструкции. Наконец, надёжность самих микроэлектронных компонентов зависит от качества изготовления: электронные датчики могут со временем дрейфовать, выходить из строя от перенапряжения или экстремальных условий, что требует резервирования каналов и регулярной проверки. Таким образом, внедрение микроэлектронных решений должно сопровождаться тщательным анализом кибербезопасности, энергоэффективности и совместимости с существующими стандартами [6, 7].

Микроэлектронные датчики открывают новые возможности для мониторинга энергосистем: они обеспечивают более детальное и оперативное отслеживание ключевых параметров, позволяя проводить

прогностическую диагностику и сокращать аварии. Текущие разработки в области МЭМС-технологий и интегрированной электроники обещают дальнейшее снижение стоимости и размеров датчиков, а также повышение их живучести в жёстких условиях электроэнергетики. Практические рекомендации включают развитие унифицированных архитектур и протоколов связи для сенсорных сетей, применение энергоэффективных и защищённых беспроводных технологий, а также внедрение методов анализа больших данных для обработки получаемой информации. Важно уделять внимание кибербезопасности и надёжности каналов передачи – это ключевые направления дальнейших исследований. Только комплексное сочетание микроэлектроники, интеллектуальных алгоритмов и стандартизированных решений обеспечит значительный прирост надёжности и экономической эффективности электроэнергетических систем.

Источники

1. Гачаев, А. М. Внедрение IoT-технологий в экономические системы электроснабжения промышленных предприятий / А. М. Гачаев, О. В. Воркунов, М. М. Матыгов // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 3(164). – С. 971-974.
2. Сервис С. Мониторинг состояния промышленного оборудования с помощью носимой электроники // Control Engineering Россия. – 2021. – № 12.
3. Lockwood T. Advanced sensors and smart controls for coal-fired power plants. – UK: IEA Clean Coal Centre, 2015. – (CCC/251).
4. Montanari G., Hebner R., Seri P. Condition Monitoring for a Smarter Grid // IEEE Power and Energy Magazine. – 2019. – Vol. 17, No. 4. – P. 48–58.
5. Электроэнергетический совет СНГ. Методика мониторинга участия энергосистем стран СНГ в регулировании частоты и перетоков активной мощности. – М.: Электроэнергетический совет СНГ, 2009.
6. Denning P. Internet of Things and the Increasing Threats to the Electric Grid // Security Management. – 2024. – Feb.
7. Grid Architecture Initiative. Архитектура сенсорных сетей для модернизации распределительных сетей. – США: PNNL, DOE, 2013.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Шарафеев Э.И.¹, Наумова Я.О.², Валиуллина Д.М.³

^{1,3} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

²МБОУ «Гимназия №94 им. Л.Н.Мурысина», г. Казань, Россия

¹ email.sharafeev@yandex.ru

Статья посвящена актуальным вопросам проведения высоковольтных испытаний изоляции силового оборудования — ключевого элемента обеспечения надежности современных энергосистем. Рассмотрены основные методы диагностики, включая подачу повышенного напряжения, измерение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$), детекцию частичных разрядов, импульсные испытания и мегаомметрию. Особое внимание уделено эволюции подходов: переходу от разрушающих тестов к неразрушающему контролю, интеграции цифровых технологий и машинного обучения. Автор анализирует преимущества использования встроенных датчиков, цифровых двойников и предиктивной аналитики для мониторинга состояния изоляции в режиме реального времени и прогнозирования ее старения.

Ключевые слова: силовое оборудование, изоляция, высоковольтные испытания, диэлектрическая прочность, энергосистема.

HIGH-VOLTAGE INSULATION TESTING OF POWER EQUIPMENT

Sharafeev E.I.¹, Naumova Y.O.², Valiullina D.M.³

^{1,3} KSPEU, Kazan, Republic of Tatarstan

²MBOU "Gymnasium № 94 named after L.N.Murysin", Kazan, Russia

¹ email.sharafeev@yandex.ru

The article is devoted to topical issues of conducting high—voltage insulation tests of power equipment, a key element of ensuring the reliability of modern power systems. The main diagnostic methods are considered, including applying an increased voltage, measuring the tangent of the dielectric loss angle ($\text{tg } \delta$), partial discharge detection, pulse testing and megaohmmetry. Special attention is paid to the evolution of approaches: the transition from destructive tests to non-destructive testing, the integration of digital technologies and machine learning. The author analyzes the advantages of using embedded sensors, digital twins, and predictive analytics to monitor the condition of insulation in real time and predict its aging.

Keywords: power equipment, insulation, high-voltage tests, dielectric strength, power system.

Современные энергетические системы, промышленные предприятия и инфраструктура городов немыслимы без силового оборудования, такого как трансформаторы, генераторы, кабельные линии, распределительные устройства и электрические машины. Их надежная работа обеспечивается, в первую очередь, качественной изоляцией, которая предотвращает пробой, короткие замыкания и аварии, способные парализовать целые отрасли. Высоковольтные испытания изоляции — это комплекс методов, направленных на проверку ее способности выдерживать не только номинальное рабочее напряжение, но и кратковременные перенапряжения, возникающие вследствие коммутационных процессов, атмосферных разрядов или внештатных ситуаций. Эти испытания являются неотъемлемой частью жизненного цикла оборудования: от этапа производства и монтажа до регулярной эксплуатации и диагностики. В условиях роста энергопотребления, увеличения мощностей и ужесточения экологических норм значение высоковольтных испытаний сложно переоценить. Они служат барьером между штатной работой энергосистемы и катастрофическими отказами, способными привести к человеческим жертвам, финансовым потерям и экологическому ущербу [1].

Основная задача изоляции — обеспечить диэлектрическую прочность, то есть способность противостоять электрическому пробое под воздействием высокого напряжения. Однако со временем изоляционные материалы деградируют из-за термических, механических и химических нагрузок, увлажнения, загрязнения или частичных разрядов. Например, в силовых трансформаторах масляно-бумажная изоляция постепенно теряет свойства из-за окисления и образования шлама, а в кабелях среднего напряжения причиной старения часто становятся микротрещины, возникающие при температурных расширениях. Высоковольтные испытания позволяют выявить эти дефекты до того, как они приведут к аварии. При этом сами методы испытаний эволюционируют: если раньше акцент делался на проверке пробивного напряжения, то сегодня все большее внимание уделяется неразрушающему контролю, который оценивает состояние изоляции без риска ее повреждения.

Одним из ключевых видов испытаний является подача повышенного напряжения, величина которого превышает номинальное в 1.5–2 раза. Для оборудования на 10 кВ, например, испытательное напряжение может достигать 20–28 кВ. Это позволяет имитировать кратковременные

перенапряжения, вызванные, скажем, грозовыми разрядами. Испытание проводится с помощью высоковольтного генератора, который формирует необходимое напряжение и подает его на изоляцию в течение заданного времени (обычно 1–5 минут). Если пробой не происходит, изоляция считается удовлетворительной. Однако такой метод, при всей его наглядности, имеет ограничения: он не выявляет начальные стадии деградации и создает риск повреждения оборудования при неверно выбранных параметрах. Поэтому его часто комбинируют с другими подходами [2].

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) — более тонкий метод, который оценивает энергетические потери в изоляции под воздействием переменного напряжения. Когда изоляционный материал стареет или увлажняется, его сопротивление снижается, что увеличивает активную составляющую тока утечки и, соответственно, тангенс угла потерь. Это явление можно зафиксировать с помощью моста Шеринга — устройства, сравнивающего токи через эталонный и испытуемый образцы. Превышение $\text{tg } \delta$ допустимых значений (например, более 2–3% для трансформаторного масла) сигнализирует о необходимости замены изоляции. Метод особенно эффективен для жидкостных и композитных диэлектриков, но требует точной настройки оборудования и учета температуры окружающей среды.

Частичные разряды (ЧР) — локальные пробои в микронеоднородностях изоляции — считаются одним из главных индикаторов ее скорого отказа. Даже слабые ЧР постепенно разрушают материал, образуя проводящие каналы. Для их детекции используют датчики высокочастотных импульсов тока или электромагнитного излучения. Современные системы анализа ЧР позволяют не только зафиксировать факт разрядов, но и определить их местоположение, интенсивность и характер. Например, в кабельных линиях это помогает находить участки с поврежденной изоляцией без необходимости вскрытия трассы. Однако интерпретация данных требует высокой квалификации: помехи от соседнего оборудования или некорректная калибровка могут привести к ложным выводам [3].

Импульсные испытания, имитирующие воздействие грозовых перенапряжений, проводятся с помощью генераторов импульсных напряжений, формирующих волны стандартной формы (1.2/50 мкс). Они показывают, как изоляция поведет себя при ударе молнии или коммутационных перенапряжениях. Для оборудования, работающего в регионах с высокой грозовой активностью, такие испытания обязательны.

При этом фиксируется не только факт пробоя, но и форма волны после прохождения через изоляцию, что дает информацию о ее емкостных и индуктивных характеристиках.

Мегаомметрия — простой, но важный метод, оценивающий сопротивление изоляции постоянному току. Мегаомметр подает напряжение 500–2500 В и измеряет ток утечки, рассчитывая сопротивление. Низкие значения (менее 1 МОм для оборудования на 1 кВ) указывают на критическое ухудшение изоляции. Однако этот метод чувствителен к поверхностным загрязнениям и влаге, поэтому требует предварительной очистки поверхности.

Современные технологии добавляют в арсенал испытателей цифровые системы сбора данных и машинное обучение. Например, встроенные датчики температуры, вибрации и частичных разрядов передают информацию в режиме реального времени на централизованные платформы, где алгоритмы анализируют тренды и предсказывают остаточный ресурс изоляции. Цифровые двойники оборудования, созданные на основе 3D-моделей и данных испытаний, позволяют симулировать различные сценарии старения и оптимизировать графики обслуживания.

Безопасность при проведении высоковольтных испытаний — отдельная область. Работа с напряжениями в десятки киловольт требует строгого соблюдения правил: заземления всех частей оборудования, использования диэлектрических ковров и инструментов, наличия защитных экранов. Персонал должен пройти специальное обучение и использовать средства индивидуальной защиты. Даже небольшая ошибка, такая как забытый заземляющий провод, может привести к трагедии [4].

Экономический аспект высоковольтных испытаний не менее важен. Своевременное обнаружение дефектов изоляции позволяет избежать затрат на ремонт вышедшего из строя оборудования, простоев производства и штрафов за недоотпуск энергии. Например, замена изоляции трансформатора обходится в 5–7 раз дешевле, чем ликвидация последствий его взрыва, сопровождающегося разливом масла и пожаром. Экологические риски также снижаются: пробой изоляции в оборудовании, содержащем элегаз или полихлорированные бифенилы, приводит к выбросам, опасным для окружающей среды.

Тенденции в области высоковольтных испытаний связаны с миниатюризацией оборудования, повышением точности и интеграцией в системы Industry 4.0. Переносные устройства, такие как УЗИ-сканеры для выявления расслоений в композитной изоляции или дроны с

тепловизорами для обследования ЛЭП, сделали испытания более доступными. Искусственный интеллект помогает обрабатывать терабайты данных, выявляя аномалии, невидимые человеческому глазу. В будущем распространение получит предиктивная аналитика, предупреждающая о необходимости ремонта до появления критических дефектов.

Однако отсутствие универсальных стандартов для новых материалов (например, нанокompозитов) затрудняет разработку испытательных протоколов. Этические вопросы возникают при использовании ИИ: кто несет ответственность, если алгоритм пропустит дефект. Кроме того, рост числа распределенной генерации усложняет условия испытаний: оборудование должно работать в сетях с двунаправленными потоками мощности и высоким уровнем гармоник [5].

В заключение, высоковольтные испытания изоляции — это не просто техническая процедура, а фундамент безопасности и надежности энергетики. Их развитие отражает общий тренд на переход от реактивного к проактивному управлению рисками. Внедрение цифровых технологий, обучение персонала и международная стандартизация позволят сделать испытания еще более эффективными, обеспечив бесперебойную работу силового оборудования в условиях растущих нагрузок и экологических требований.

Источники

1. Стеблевская Л.А., Черневский И.Н. Исследование эффективности испытаний изолированных жил и проводов аппаратами непрерывного контроля // Труды ВНИИ кабельной промышленности. - М.: ВНИИКП, 2. - С. 217-232.
2. ГОСТ 2990-78. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением.
3. ГОСТ 23286-78. Кабели, провода и шнуры. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний напряжением.
4. РД 16.14.640-88. ОСТПП. Кабели, провода и шнуры. Испытание напряжением на проход. Типовой технологический процесс.
5. Техника высоких напряжений / под ред. Д.В. Разевига. -2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 2020. - 471 с.

ПРИНЦИП ВЫБОРА ОПОРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ, ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЕ И УВЛАЖНЕНИЕ

Якупов Р.А.¹, Маклецов А.М.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

radik_yakupov_2000@mail.ru

В статье рассматриваются ключевые аспекты выбора опорных изоляторов для электроэнергетических установок, эксплуатируемых в условиях загрязнения и увлажнения. Проанализированы факторы, влияющие на снижение электрической прочности изоляции в таких условиях, и предложены рекомендации по выбору типов и конструкций изоляторов, обеспечивающих надежную работу оборудования.

Ключевые слова: опорные изоляторы, загрязнение, увлажнение, электрическая прочность, электроэнергетические системы, токи утечки, перекрытие, материалы изоляции, конструкция изолятора.

THE PRINCIPLE OF CHOOSING SUPPORT INSULATORS IN CONDITIONS OF THEIR CONTAMINATION AND MOISTURE

Yakupov R.A.¹, Makletsov A.M.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

radik_yakupov_2000@mail.ru

The article examines key aspects of selecting support insulators for electric power plants operating in polluted and humid conditions. It analyzes factors that affect the reduction of the electrical strength of insulation in such conditions and offers recommendations for selecting types and designs of insulators that ensure reliable operation of equipment.

Keywords: support insulators, pollution, moisture, dielectric strength, electric power systems, leakage currents, flashover, insulation materials, insulator design.

Обеспечение надежной работы электроэнергетических систем является приоритетной задачей, требующей комплексного подхода к выбору и эксплуатации оборудования. Опорные изоляторы, являясь важным элементом конструкции подстанций и линий электропередачи, обеспечивают электрическую изоляцию токоведущих частей от заземленных конструкций. Однако, в условиях загрязнения и увлажнения поверхности изоляторов их электрическая прочность существенно снижается, что может привести к пробое изоляции и аварийным

отключениям. Поэтому правильный выбор опорных изоляторов с учетом условий эксплуатации является критически важным для обеспечения бесперебойного электроснабжения [1].

На электрическую прочность опорных изоляторов, работающих в условиях загрязнения и увлажнения, оказывает влияние множество факторов. В первую очередь, это тип и концентрация загрязняющих веществ, которые оседают на поверхности изолятора. К ним относятся промышленные выбросы, пыль, соли, сельскохозяйственные удобрения и другие. Второй важный фактор – это влажность окружающей среды, которая приводит к растворению загрязнений и образованию проводящей пленки на поверхности изолятора. Данная пленка, в свою очередь, является причиной увеличения токов утечки и снижения электрической прочности. Также значительное влияние оказывают температура окружающей среды, интенсивность осадков и скорость ветра [2].

Для эксплуатации в условиях загрязнения и увлажнения применяются различные типы опорных изоляторов, отличающиеся материалом и конструкцией. Традиционно используются фарфоровые и стеклянные изоляторы, которые обладают хорошими диэлектрическими характеристиками и стойкостью к воздействию окружающей среды. В последнее время все большее распространение получают полимерные изоляторы, изготовленные из кремнийорганических резин (силикона). Они характеризуются высокой гидрофобностью, то есть способностью отталкивать воду, что препятствует образованию проводящей пленки на поверхности.

Конструкция изолятора также играет важную роль в обеспечении надежной работы в условиях загрязнения. Изоляторы с развитой поверхностью, имеющие большое количество юбок и ребер, обеспечивают увеличение пути утечки тока и снижают вероятность перекрытия. Форма юбок и ребер также влияет на степень загрязнения изолятора. Например, изоляторы с аэродинамической формой юбок лучше очищаются дождем и ветром.

При выборе опорных изоляторов для эксплуатации в условиях загрязнения и увлажнения необходимо учитывать следующие факторы:

- Степень загрязнения окружающей среды: необходимо провести анализ загрязненности атмосферы в районе установки оборудования и выбрать изоляторы с соответствующей длиной пути утечки тока. Для районов с высокой степенью загрязнения рекомендуется использовать изоляторы с увеличенным удельным путем утечки тока.

- Климатические условия: необходимо учитывать температурный режим, влажность и интенсивность осадков в районе эксплуатации. Для районов с высокой влажностью рекомендуется использовать полимерные изоляторы с гидрофобным покрытием.
- Рабочее напряжение: выбирать изоляторы с учетом рабочего напряжения электроустановки и коэффициента запаса электрической прочности.
- Тип и конструкция изолятора: при выборе типа и конструкции изолятора необходимо учитывать условия эксплуатации и требования к надежности электроснабжения. Для районов с сильным загрязнением рекомендуется использовать изоляторы с развитой поверхностью и аэродинамической формой юбок.

Выбор опорных изоляторов для работы в условиях загрязнения и увлажнения является сложной задачей, требующей учета множества факторов. Правильный выбор типа и конструкции изолятора, а также регулярный мониторинг их состояния, позволит обеспечить надежную и бесперебойную работу электроэнергетических систем. В дальнейшем необходимо проводить исследования по разработке новых материалов и конструкций изоляторов, обладающих улучшенными характеристиками по устойчивости к загрязнению и увлажнению.

Источники

1. Дырнаев П. Н. Дистанционный контроль технического состояния изоляторов воздушных линий электропередачи / П. Н. Дырнаев, О. В. Воркунов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: Материалы VI Национальной научно-практической конференции, в 2 т., Казань. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 237-239.
2. Феоктистов Д. И. Особенности контактного мониторинга температуры электрооборудования / Д. И. Феоктистов, О. В. Воркунов, А. М. Маклецов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 6(368). – С. 127-135.

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ И СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЧЕТЧИКИ

Янушевская Я.С.¹, Воркунов О.В.²
^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
ynushevskaya@mail.ru

Современные распределительные сети электроэнергии сталкиваются с необходимостью повышения эффективности, надежности и управляемости в условиях роста энергопотребления и интеграции возобновляемых источников энергии. Одним из ключевых элементов цифровизации энергосистем являются интеллектуальные счетчики (smart meters), которые не только фиксируют объем потребленной электроэнергии, но и обеспечивают двусторонний обмен данными, удаленный мониторинг и аналитику.

Ключевые слова: интеллектуальные счетчики, электробезопасность, системы защиты, дистанционный сбор данных, умный учет электроэнергии, smart grid.

MEASUREMENT ACCURACY AND LOSS REDUCTION. SMART METERS

Yanushevskaya Y.S.¹, Vorkunov O.V.²
^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia
ynushevskaya@mail.ru

Modern electricity distribution networks face the need to increase efficiency, reliability, and manageability in the face of rising energy consumption and the integration of renewable energy sources. One of the key elements of the digitalization of energy systems are smart meters, which not only record the amount of electricity consumed, but also provide two-way data exchange, remote monitoring and analytics.

Key words: smart meters, electrical safety, protection systems, remote data collection, smart electricity metering, smart grid.

Забота об энергоэффективности, новые тенденции на рынках электроэнергии, устарелость существующей модели энергообеспечения, опасения насчёт изменения климата — вот основные факторы, побуждающие нас двигаться в сторону парадигмы умных сетей (Smart Grid). Тем более что без умных измерительных устройств (Smart Meters) в

сетях нельзя контролировать всю совокупность ресурсов распределённой генерации с заметной долей ВИЭ.

Первый коммерческий автоматический счётчик с удалённым считыванием показаний был разработан Т. Параскевакосом в 1977 г. Однако до реального внедрения концепции дистанционных измерений в электросетях было ещё очень далеко. Прошло более трёх десятилетий, прежде чем всё расширяющееся внедрение ВИЭ, распределённой генерации и систем распределённого хранения электроэнергии привело к необходимости поменять привычную модель энергообеспечения. Её эволюция в сторону сетей, объединяющих множество децентрализованных ресурсов генерации и хранения, привела к концепции умной сети, которая не может эффективно функционировать без не менее умных измерительных систем (УИС).

УИС подразумевает развёртывание гетерогенной инфраструктуры, включающей четыре вида основных элементов:

- умный счётчик (УС);
- устройство сбора данных, или концентратор данных (КД);
- система связи для передачи данных (СС);
- централизованная система управления и контроля, или центр управления (ЦУ).

Без организации должной системы достоверного учета поступившей в электрические сети, отпущенной из сетей и полезно потребленной электроэнергии невозможно рассчитать балансы электроэнергии по сети в целом и ступеням напряжения, технические и фактические потери электроэнергии, а также выявить места очагов потерь для выработки мероприятий по снижению потерь. Наконец, невозможно обоснованно определить реальный эффект внедрения энергосберегающих мероприятий. Если кратко, чтобы эффективно экономить электроэнергию, ее нужно точно измерять [1].

Опыт показал, что для систем интеллектуального учета энергоресурсов особое значение имеют вопросы защиты от несанкционированного доступа к базам данных, программному обеспечению, средствам связи и передачи информации. В этом направлении и в России, и за рубежом в настоящее время ведутся активные работы. Этот вопрос становится особенно актуальным при применении приборов учета со встроенными силовыми реле и возможностью дистанционного ограничения потребления.

Очевидно, что создание в короткие сроки (три-пять лет) полномасштабной интеллектуальной АСКУЭ БП невозможно в связи со значительными материальными и временными затратами и необходимостью решения всех указанных выше проблем. Тем не менее эту работу необходимо начинать уже сейчас в рамках пилотно-демонстрационных проектов так, как это и делается в настоящий момент в промышленно развитых странах [2].

Новые технологии особенно актуальны для России, обладающей исторически сложившейся масштабной централизованной системой энергоснабжения, а это свыше 2,5 млн км линий электропередачи, около 500 тыс. подстанций, 700 электростанций мощностью более 5 МВт. По объему производства и потребления электроэнергии Россия является одним из крупнейших энергетических рынков в мире, поэтому можно говорить, что потенциал развития отрасли огромен. Электроэнергетический комплекс России стоит на пороге существенных перемен, которые изменят модель функционирования отрасли в будущем. Необходимость изменений вызвана факторами, которые, с одной стороны, связаны с повышением требований заинтересованных сторон, а с другой – с внутренними проблемами самой отрасли [3, 4].

Внедрение интеллектуальных счетчиков в распределительных сетях, несмотря на все преимущества в области точного учета и автоматизации, ставит серьезные вопросы кибербезопасности и защиты данных. Эти устройства, будучи подключенными к сетям передачи данных, становятся потенциальными точками входа для злоумышленников, что требует особого внимания к вопросам их защищенности. Основные риски связаны с возможностью несанкционированного доступа к показаниям счетчиков, перехватом передаваемых данных и даже удаленным управлением устройствами. Особую опасность представляют атаки типа "человек посередине", когда злоумышленник может не только считывать передаваемую информацию, но и модифицировать ее, что приводит к искажению данных учета и финансовым потерям. Еще одной серьезной угрозой являются распределенные атаки типа "отказ в обслуживании", которые могут парализовать работу целых сегментов системы учета. При этом интеллектуальные счетчики собирают детальную информацию о режимах энергопотребления, что создает риски нарушения конфиденциальности данных потребителей [5].

Для противодействия этим угрозам необходимо применять комплекс мер, начиная с использования современных протоколов шифрования данных при передаче и хранении. Важнейшую роль играет надежная

аутентификация устройств в сети, которая должна исключать возможность несанкционированного подключения. Особое внимание следует уделять регулярному обновлению программного обеспечения счетчиков, чтобы своевременно закрывать выявляемые уязвимости. Не менее важны организационные меры, включающие мониторинг сетевой активности и оперативное реагирование на подозрительные события [6]. При проектировании систем с интеллектуальными счетчиками необходимо предусматривать сегментацию сети, что позволяет локализовать потенциальные угрозы. Также требуется соблюдение международных стандартов информационной безопасности и разработка четких нормативных требований к защите таких систем. Только комплексный подход, сочетающий технические, организационные и нормативные меры, может обеспечить необходимый уровень безопасности интеллектуальных систем учета электроэнергии и доверие к ним со стороны как энергокомпаний, так и конечных потребителей.

Источники

1. Кузьмин П. С. Интеллектуальные системы учета электроэнергии: эмпирический анализ факторов восприятия технологии //Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 8-23.
2. Зиганшин А. Г., Михеев Г. М. Цифровизация системы учёта электроэнергии //Вестник Чувашского университета. – 2020. – №. 3. – С. 74-83.
3. Fang X. et al. Smart grid—The new and improved power grid: A survey //IEEE communications surveys & tutorials. – 2011. – Т. 14. – №. 4. – С. 944-980.
4. Экономические перспективы разработки автоматизированной интеллектуальной системы оперативно-диспетчерского управления / О. В. Воркунов, В. В. Максимов, О. Е. Куракина, Д. И. Смирнова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 12, № 2(155). – С. 94-100.
5. Андреева Л. В., Осика Л. К., Тубинис В. В. Коммерческий учет электроэнергии на оптовом и розничном рынках //Энергосбережение. – 2010. – №. 5. – С. 54-63.
6. Феоктистов, Д. И. Средства измерения числовых параметров в электроэнергетике / Д. И. Феоктистов, О. В. Воркунов // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2024. – № 10. – С. 49-51.

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕСТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ НА ПРОТЯЖЕННЫХ УЧАСТКАХ МАГИСТРАЛЕЙ ВЛ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Янушевская Я.С.¹, Воркунов О.В.²

^{1,2} ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия

ynushevskaya@mail.ru

Кража электроэнергии – это незаконный расход энергоресурсов при несанкционированном подключении к сети потребителем либо манипуляции с прибором учета с целью занижение его показаний. Энергетики довольно часто сталкиваются с самовольными подключениями к электросетям. Несмотря на стремительное развитие прогресса, незаконное подключение к линиям электропередачи всё ещё остаётся одной из основных проблем электросетевых организаций.

Ключевые слова: несанкционированное подключение, электробезопасность, линии электропередачи, системы защиты.

IDENTIFICATION OF PLACES OF UNAUTHORIZED CONNECTION ON LONG SECTIONS OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES (OPTL)

Yanushevskaya Y.S.¹, Vorkunov O.V.²

^{1,2} KSPEU, Kazan, Russia

ynushevskaya@mail.ru

Theft of electricity is the illegal consumption of energy resources when a consumer is connected to the grid without authorization or manipulates a metering device in order to underestimate its readings. Power engineers often encounter unauthorized connections to the power grid. Despite the rapid development of progress, illegal connection to power transmission lines is still one of the main problems of electric grid organizations.

Key words: unauthorized connection, electrical safety, power transmission lines, protection systems.

Для обеспечения своевременности обнаружения неучтённого потребления может использоваться один из двух вариантов:

- постоянный контроль (измерение через минимальные интервалы времени, в результате увеличивается точность до максимального уровня,

но также растут необходимые вычислительные мощности и, в некоторых случаях, затраты на передачу данных);

- внезапный контроль (в дополнение к учётному: измерения через случайные интервалы времени – в результате уменьшается вероятность своевременно обнаружить неучтённое потребление, однако снижается нагрузка на вычислительные устройства) [1].

Большую часть нарушений обнаруживают в ходе плановых проверок. Компания, которая поставляет ресурсы, контролирует работу и целостность счетчиков после их установки. С этой целью в штате работают контролеры, которые периодически обходят объекты и проверяют учетные приборы и пломбы. Периодичность и порядок проверки фиксируется в договоре между поставщиком и потребителем при монтаже счетчика. Если в ходе планового или внепланового рейда контроллеры обнаруживают признаки несанкционированного использования электроэнергии, они составляют акт самовольного подключения электроэнергии и фиксируют в нем факт нарушения. Акт составляется в двух экземплярах: один оставляют нарушителю, второй направляют в технический отдел энергокомпании, где определяют порядок дальнейших действий. В большинстве случаев компания подает судебный иск в районный суд по адресу проживания нарушителя. Граждане, подключённые к электрической сети, должны иметь на руках договор энергоснабжения, заключённый с гарантирующим поставщиком, а также акты, подтверждающие факт легального присоединения с учётом всех правил безопасности. В случае обнаружения неполадки в работе прибора учета гражданин обязан обратиться в районные электрические сети и уведомить о неисправности. Соккрытие информации о некачественном функционировании счётчика, вмешательство в его механизм или нарушение знаков визуального контроля приравнивается к безучётному потреблению электроэнергии. У энергетиков и правоохранительных органов есть огромный опыт по выявлению данных приборов учета и привлечению их собственников к ответственности.

Так же факт наличия неучтённого потребления электрической энергии в системе электроснабжения фиксируется при появлении небаланса отдаваемого и потребляемого токов, превышающего суммарную погрешность приборов (необходимо рассчитывать не арифметическую, а геометрическую сумму потребляемых токов) – критерий сбалансированности системы электроснабжения [2].

Стоит учитывать, что данный способ позволяет определять любые утечки тока в рассматриваемой системе электроснабжения, то есть

обнаруженное неучтённое потребление электрической энергии может быть вызвано неисправностью изолятора, который уже пропускает сквозь себя значительный ток, но однофазное короткое замыкание ещё не возникло.

Таким образом, становится возможным не только регистрировать несанкционированные подключения, но и обнаруживать элементы с низким сопротивлением изоляции.

Для разработанного способа создан математический аппарат для обеспечения единообразия и строгости выполнения расчётов и создания возможности для автоматизации (алгоритмизации) расчётов.

Очевидно, что точность получаемых значений величины неучтённого тока на элементах и координаты места его «подключения» является достаточной для практического использования, так как протяжённость элемента системы как правило невелика [3] и при определении элемента, на котором происходит неучтённое потребление, становится возможным обнаружить несанкционированное подключение в кратчайшие сроки.

Одним из направлений развития использования современных приборов учёта является создание на основе передаваемой данными приборами информации методов и алгоритмов решения задач по определению мест возникновения повышенных потерь электрической энергии в системе электроснабжения, в том числе с целью поддержки принятия организационных и/или технических решений для снижения потерь электрической энергии [4]. Планомерное снижение величины потерь в системах электроснабжения на сегодняшний день возможно не только за счёт увеличения точности измерений, но и за счёт выявления точек несанкционированного технологического присоединения к системам электроснабжения, а также определения элементов систем электроснабжения с повышенными техническими потерями.

Выявлять факты несанкционированного подключения к системам электроснабжения с повышенной селективностью стало возможно только с появлением приборов учёта последнего поколения, позволяющих передавать показания поставщику электрической энергии напрямую в автоматическом режиме.

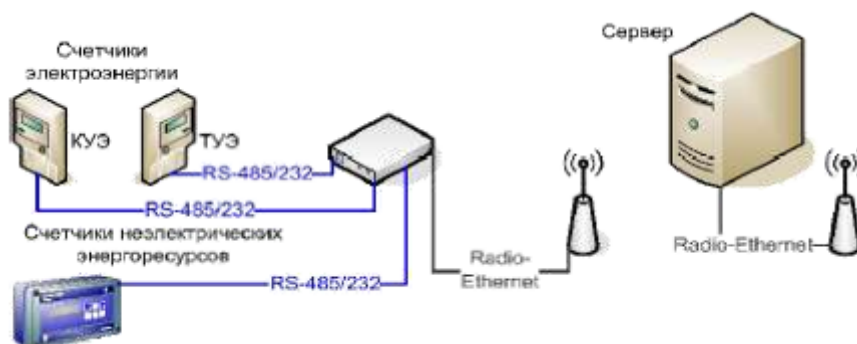


Рис. 1.

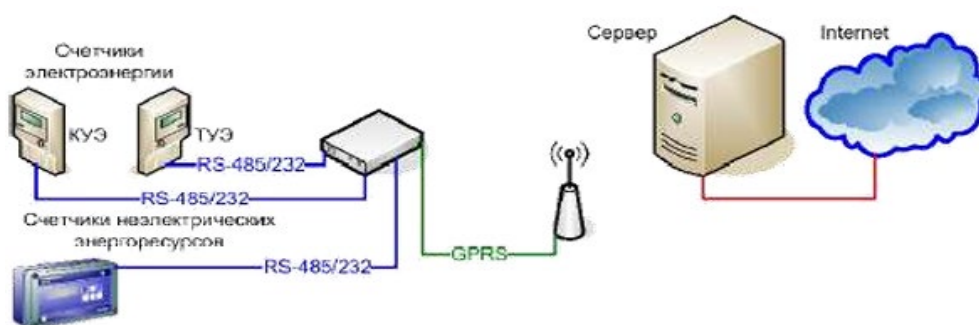


Рис. 2.

Как следует из показанных рисунков 1 и 2, система может осуществлять как групповое подключение приборов учёта к одному роутеру с последующей одновременной передачей показаний всех подключённых устройств, так и индивидуальное, когда каждый прибор учёта имеет в своём составе элемент, позволяющий передавать данные на сервер посредством какого-либо вида связи. Одной из наиболее широко используемых систем учёта является система учёта «Матрица», позволяющая организовать все уровни сбора и обработки информации, а именно:

- устройства и аппаратура, устанавливаемые в центре приёма и обработки информации;
- устройства, предназначенные к установке непосредственно на объекте электроснабжения (однофазные/трёхфазные приборы беспроводной передачи информации на расстоянии); учёта, средства
- различные вспомогательные приборы (удалённый дисплей для считывания показаний со счётчика, установленного на опоре воздушной линии электропередач).

Данная система позволяет накапливать и систематизировать данные о параметрах электрической энергии в системах электроснабжения, измеряемых приборами учёта, через удалённый доступ к ним по одному из

возможных каналов связи, синхронизировать работу всех приборов в системе, а также следить за состоянием системы электроснабжения и системы передачи и анализа данных. На основе подобных систем в будущем может быть построена «умная» система электроснабжения, позволяющая в режиме постоянной готовности следить за корректностью работы всех элементов и оперативно сигнализировать о возможных появлениях неучтённого потребления.

Известно техническое решение по определению мест несанкционированного подключения с помощью переносных токоизмерительных клещей, которыми периодически измеряют токи в общей линии электропередачи в местах подключения потребителей и в самих ответвлениях к потребителям.

Измерение осуществляется без разрыва цепи путем смыкания клещей вокруг проводника тока. При измерениях проводник тока не разрывается и остаётся электрически изолированным от входов измерительного прибора. Для выполнения измерения нет необходимости прерывать подачу питания [5]. Этот способ позволяет определять практически все места несанкционированного подключения и величину похищаемой электроэнергии с высокой точностью.

Схема и устройство токовых клещей показаны на рис. 1.

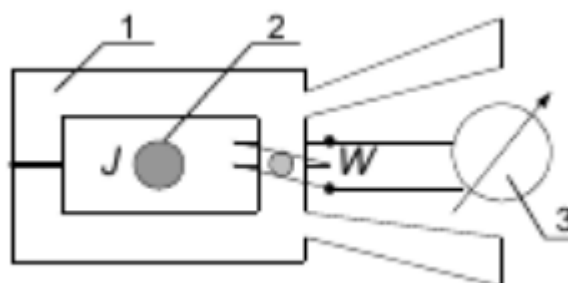


Рис. 1 - Устройство токовых клещей: 1 - токовые клещи; 2 - проводник тока; 3 - измерительный прибор

Устройство, способное снимать параметры электрической сети в требуемых точках с точностью, позволяющей уверенно говорить о наличии или отсутствии в сети точек неучтенного потребления электрической энергии [6]. Устройство представляет собой модульную конструкцию с двумя типами модулей:

- амперметр, совмещенный с тремя вольтметрами, управляющим устройством, и устройством для приема и передачи данных (управляющий модуль);

- амперметр, подключаемый к управляющему модулю посредством проводов или по каналу беспроводной связи (измерительный модуль).

Данная разработка позволяет оценить уровень коммерческих потерь в сети и при их обнаружении выполнить полный анализ на предмет определения точек неучтенного потребления и размера утечки. Для анализа сети можно установить достаточное количество устройств за короткое время, а после окончания анализа устройства могут быть демонтированы, что, в свою очередь, делает возможным много кратное использование одного и того же набора приборов для оценки различных сетей. Использование такого устройства позволит дополнительно снизить издержки, при этом сохранив высокий уровень эффективности обнаружения коммерческих потерь.

Источники

1. Гачаев А. М. Внедрение IoT-технологий в экономические системы электроснабжения промышленных предприятий / А. М. Гачаев, О. В. Воркунов, М. М. Матыгов // Экономика и предпринимательство. – 2024. – № 3(164). – С. 971-974.

2. Феоктистов, Д. И. Средства измерения числовых параметров в электроэнергетике / Д. И. Феоктистов, О. В. Воркунов // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2024. – № 10. – С. 49-51.

3. Магамадова, Т. С. Применение компьютерных сетевых технологий в информатизации предприятия / Т. С. Магамадова, О. В. Воркунов, А. И. Багаева // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 4, № 5(146). – С. 65-71.

4. Льянова А. И. и др. Использование дронов и беспилотных летательных аппаратов для выявления неисправностей на линиях электропередач // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. – СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2021. – Т. 1. – С. 72-75.

5. Казымов И. М., Компанеец Б. С. Обработка информации и принятие решений в системе контроля параметров электрической энергии в распределительной сети //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10. – №. 3. – С. 19-24.

6. Экономические перспективы разработки автоматизированной интеллектуальной системы оперативно-диспетчерского управления / О. В. Воркунов, В. В. Максимов, О. Е. Куракина, Д. И. Смирнова // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 12, № 2(155). – С. 94-100.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	
Бахмисов Д.Е., Яковкина Т.Н. Работа устройств синхронизации в условиях наличия высших гармонических составляющих.....	4
Грунтович Н.В., Грунтович Н.В. Основные причины аварийных повреждений силовых маслонаполненных трансформаторов.....	11
Гаджибалаев Н.М., Джаббарова С.М., Ширинова А.Я. Перспективы развития азербайджанских электросетей.....	19
Зарипов Д.К. Диагностирование загрязнения изоляции по тепловому излучению.....	24
Миронов Е.А., Качанов А.Н. Энергоэффективное индукционное устройство с бегущим электромагнитным полем для предварительного нагрева валков прокатных станов.....	32
Чернышов В.А., Астафьев Н.А., Коренков Д.А. Лабораторное исследование способа гальванического разделения ЛЭП 6-10 кВ с однофазным замыканием на землю и питающей ее сети посредством разделительного трансформатора.....	39
СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ	
Алиева Т.Р., Гаджибалаев Н.М. Современное состояние влияния температуры на конструкцию низкочастотного электромагнитного вибратора.....	48
Новрузова Х.И., Мамедзаде Р.К. Применение современных средств защиты энергетических объектов от предельных напряжений.....	51
Павра К.К. Enhancing energy efficiency through modern technologies: a sustainable approach for industrial and domestic electrical networks.....	53
Ахмедова Т.А. Конструктивная структура и расчет информационно-измерительного преобразователя технологического оборудования производственного модуля РТК.....	56
Белкова Д.Н., Аносов В.Н. Проблема субсинхронного резонанса в автономной электроэнергетической системе и способ его подавления.....	63
Валюк А.С., Миронова Е.А. Импортозамещение в электроэнергетике: путь к технологическому суверенитету и экономической стабильности.....	67
Вахобов О.И. Мероприятия по энергосбережению в электроприводах.....	72
Вдовин М.В., Нешина Е.Г. Применение цифровых двойников в автоматизированных системах управления элеваторного узла отопления.....	76

Газетдинова Г.Н., Николаева Л.А. Применение технологий замкнутого цикла в экотехнопарках для минимизации отходов и энергозатрат.....	79
Джураев Д.С. Влияние температуры на теплофизические свойства магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла.....	84
Джураев Д.С. Определения электропроводности магнитных жидкостей на основе трансформаторного масла.....	90
Дитятьева А.С., Сандаков В.Д. Сравнительный анализ затрат на обслуживание традиционных и микроэлектронных систем контроля в промышленном электроснабжении.....	94
Емельянов Е.А., Бельский А.А. Анализ графика электрических нагрузок поселения с автономным электроснабжением.....	101
Ермаков Н.В., Фомин И.Н., Беликов Р.П. Перспективы использования ультрафиолетовых технологий в пищевом производстве.....	106
Колбасов Д.А. Электронные компоненты, обеспечивающие надежность электроэнергетических систем.....	110
Калыев Т.А., Нешина Е. Г. Анализ влияния цен на электроэнергию на энергоемкость казахстанской экономики и устойчивое развитие.....	115
Киселев А.Ю., Васильев П.Ф. Опыт эксплуатации концевых кабельных муфт 110–220 кВ в условиях крайнего севера: анализ причин повреждений и пути повышения надежности.....	122
Коновалова Д.А., Коновалов И.А., Карамов Д. Н. Технические аспекты интеграции фотоэлектрических систем в электрические сети 110-750 кВ.....	126
Коновалова Д.А., Коновалов И.А., Карамов Д. Н. Технические аспекты интеграции фотоэлектрических систем в распределительные электрические сети 6-10 кВ	138
Кузнецов Д.А., Убодоев В.Б., Лукина Г.В. Возможности накопителей в решении проблем распределительных сетей, изолированных и удаленных энергосистемах от ВИЭ.....	145
Леушин А.О., Ларионов Д.Н., Галиев И.Ф. Прогнозирование деградации бумажно-пропитанной изоляции маслonaполненных кабельных линий распределительных сетей: частичные разряды.....	151
Лизунов Д.А., Валиуллина Д.М., Козлов В.К., Нигметзянов В.Т. Зависимость оптических характеристик трансформаторного масла от электрических пробоев.....	155
Малаева А.К., Нешина Е.Г. Повышение надежности трубопроводных систем с использованием бесконтактных методов диагностики.....	158

Мирхаликова Д.С. Информационные технологии в программах обучения инженерно - энергетических специальностей	161
Михальчук А.А., Савин Н.Ю. Энергоэффективные технологии отопления.....	167
Михеев С.А., Коренков Д.А. Модернизация вспомогательных систем кромкооблицовочного четырехстороннего станка с ЧПУ для повышения энергоэффективности производства ООО «Империял».....	172
Напойкина А.В. Тимергазизова Э.Р. Перспективные направления инвестиционной политики в сфере электроэнергетики.....	176
Овечкин И.С., Крюков А.В. Моделирование режимов плавки гололеда на грозозащитных тросах ЛЭП 220 кВ.....	181
Петров А.В., Галиев И.Ф., Гарифуллин М.Ш. Стратегия управления кабельными линиями распределительных сетей.....	187
Петров Т.И. Топологическая оптимизация электрических машин: энергосбережение и современные технологии.....	196
Рахимов О.С., Тошходжаева М.И. Критерии экономической оценки эффективности использования энергосберегающих технологий.....	199
Ретунский Д.М., Сакерин А.О. Цифровой контроль безопасности: как машинное зрение снижает риски на АЭС.....	210
Тарасов Б.П., Зарипов Д.К. Устройство для анализа состояния высоковольтных изоляторов.....	214
Черниченко А.В. Исследование основных характеристик параметров электрических цепей с помощью стенда ПРОФИ-А.....	217
Чернышов В.А., Семенихин Д.И. Оптимизация эксплуатационных затрат воздушных линий электропередачи 6-10 кВ с помощью нейросети.....	222
Чернышов В.А., Пригодский М.О. Предпосылки создания нового устройства, позволяющего оперативно идентифицировать однофазное замыкание на землю в сети 6-10 кВ	231
Чернышов В.А., Качанов А.Н., Коренков Д.А., Астафьев Н.А. Применение силовых разделительных трансформаторов как альтернативных средств ограничения перенапряжений в воздушных электрических сетях 6-10 кв.....	242
Чистяков А.В., Голубева И.Л. Сравнительный анализ твердотельного и поверхностного моделирования при проектировании оборудования электрических сетей.....	249
Шайхутдинов А.А., Валиуллина Д.М. Алгоритм автоматизированного определения показателей надежности SAIDI и SAIFI по данным системы учета.....	253
Шамсутдинов Х.Ф. Анализ электромагнитных свойств полюсопереключаемой обмотки с соотношением полюсов 3/4.....	257

Шестопалова К.Н., Сумбаева Е.С., Сердюкова Е.В. Профессиональные навыки через призму case-in: влияние соревнований на карьерное развитие.....	267
Шестопалова К.Н., Сумбаева Е.С., Сердюкова Е.В. Анализ участия студентов в case-in в лиге по электроэнергетике.....	273
Шукшина Е.В., Руткаускас Т.К. Система управления и контроля доступа на подстанции.....	277
Юсупов Р.А., Вахнина В.В. Солнечная радиация: влияние на работу силовых трансформаторов и современные методы защиты.....	280
ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ: ПЕРВЫЕ ШАГИ В НАУКЕ	
Абдуллин А.А. Предпосылки и основы цифровизации РЭС	290
Аллагузина Р.Г., Востриков Д.Ю., Сандаков В.Д. Микроэлектронные устройства мониторинга качества электроэнергии в распределительных сетях.....	296
Билалов Р.Р. Силовые трансформаторы и автотрансформаторы, применяемые на подстанциях: перспективы и новые технологии.....	302
Билалов Р.Р. Перспективы и проблемы бестопливного энергоснабжения крайнего севера России на базе ветроэнергетических установок.....	306
Будрина Е.А., Валиуллина Д.М., Валиуллина З.Р. Способы уменьшения потерь при передаче электроэнергии.....	310
Вагизов А.Р., Гиззатова И.Д. Современные частотно-регулируемые приводы: принципы работы и промышленное применение	313
Виногорова Я.А., Куракина О.Е. Системы охлаждения силовых трансформаторов.....	316
Габдрахманова С.Е., Вассунова Ю.Ю. Совершенствование интеллектуальных электросетей (smart grids) посредством внедрения возобновляемой энергетики.....	319
Галиев Р.Р., Иванова В.Р. Адаптивные светильники нового поколения: интеграция биометрии, ИИ и человекоцентричных технологий освещения.....	323
Галиев Р.Р., Иванова В.Р. Керамический радиатор в качестве охлаждающей системы любых светодиодных светильников.....	328
Демаков К.А., Сабирзянов С.И., Динуллин Д.Р., Шарафутдинова Д.Ш., Гильмуллина Э.Р., Хайртдинов И.А., Вассунова Ю.Ю. Принцип работы оптимизации умных сетей (smart grids) с интеграцией возобновляемых источников энергии.....	332
Казиханов Б.Р. Применение машинного обучения для автоматической настройки систем отопления и вентиляции.....	335

Калачева Д.А., Вассунова Ю.Ю. Передовые материалы и технологические решения в сфере создания высокопроизводительных трансформаторных устройств.....	339
Кроткова Ю.О., Сандаков В.Д. Интеллектуальные системы управления освещением на базе микроэлектроники для снижения энергопотребления в офисных зданиях.....	342
Мошкова М.Л., Востриков Д.Ю., Сандаков В.Д. Использование беспроводных микросенсоров на базе LoRaWAN для удаленного управления энергосистемами.....	349
Мухутдинов К.Р., Хамитов А.Р., Калимуллин Р.И. Роль органических полупроводников в снижении энергопотребления электронных устройств и их влияние на выбор материалов.....	355
Мухутдинов К.Р., Хамитов А.Р., Калимуллин Р.И. Нанотехнологии в разработке гибких и прозрачных накопителей энергии.....	359
Князев Б.Д., Миронова Е.А. Риски и угрозы в системе энергопроизводства ТЭЦ.....	363
Мухаметова А.Р., Гибадуллин Р.Р. Выбор сечения экрана кабельных линий для снижения наведенного напряжения.....	367
Мухлисуллина А.Р., Валиуллина Д.М. Потери мощности из-за короны.....	370
Новоселова С.В., Востриков Д.Ю., Сандаков В.Д. Использование силовых микросхем в преобразователях энергии для промышленных энергосберегающих установок.....	373
Петров В.А., Гиззатова И.Д. К вопросу о методах обнаружения гололеда на линиях электропередач.....	380
Протасов П.А., Миронова Е.А. Мониторинг электрооборудования с применением "умных технологий".....	385
Ратников Л.М., Валиуллина Д.М., Сагитова М.Р. Хроматографический анализ трансформаторного масла.....	389
Рыжов Н.С., Ковырев В.С., Писковацкий Ю.В. Анализ мирового опыта применения искусственного интеллекта в электроэнергетике....	392
Скворцов Е.А., Востриков Д.Ю., Сандаков В.Д. Разработка энергоэффективных микропроцессорных систем для IoT-устройств...	397
Титов С. Е., Миронова Е.А. Цифровизация процессов управления режимами работы станции.....	401
Халиуллина Г.И., Валиуллина Д.М. Проектирование заземляющего устройства для молниезащиты подстанции.....	405
Халиуллина Г.И., Валиуллина Д.М. Эффективные системы молниезащиты подстанции: современные подходы и технологии.....	409

Хасаншин И.С., Денисова А.Р. Применение интернет вещей в электроэнергетических системах.....	413
Хасаншин И.С., Фетисов Л.В. Интеграция ИОТ и машинного обучения в силовую проверку силовых агрегатов: повышение предусмотренности и эффективности системного управления.....	418
Хидиятов И.М., Фетисов Л.В. Современные системы автоматического контроля надежности электроснабжения.....	423
Хидиятуллин Н.М., Миронова Е.А. Технологии работ в распределительных сетях 0,4-10 кВ методом РПН.....	429
Чернов Д.В., Писковацкий Ю.В. Влияние нетрадиционных источников электроэнергии на работу противоаварийной и режимной автоматики.....	432
Шагеев Р.А., Гиззатова И.Д. О применении дугогасящих реакторов в сетях 6-35 кВ особенности их эксплуатации.....	436
Шаймарданов Т.А., Востриков Д.Ю., Сандаков В.Д. Разработка энергосберегающих микросхем для повышения надёжности распределённых энергетических ресурсов.....	441
Шайхулов Ф.Ф., Востриков Д.Ю., Сандаков В.Д. Применение микроэлектронных датчиков в системах мониторинга состояния электроэнергетических систем.....	446
Шарафеев Э.И., Наумова Я.О., Валиуллина Д.М. Высоковольтные испытания изоляции силового оборудования.....	452
Якупов Р.А., Маклецов А.М. Принцип выбора опорных изоляторов, их загрязнение и увлажнение.....	457
Янушевская Я.С. Точность измерений и снижение потерь. Интеллектуальные счетчики.....	460
Янушевская Я.С. Выявление мест несанкционированного подключения на протяженных участках магистралей ВЛ электропередачи.....	464

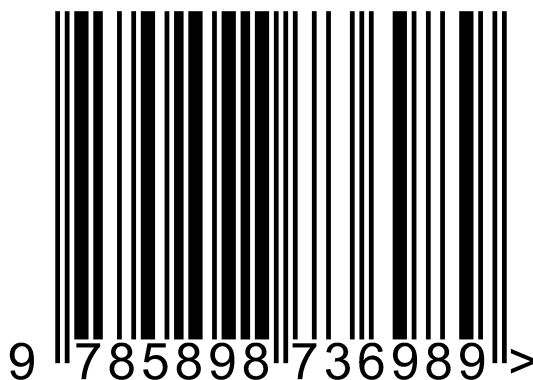
Научное издание

Международная научно-практическая конференция
«Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и
экономические аспекты»
Казань 15 мая 2025 г.

Материалы конференции

Публикуются в авторской редакции
Электронное издание

ISBN 978-5-89873-698-9



КГЭУ 420066, г. Казань, ул.
Красносельская, д. 51