



**Всероссийская научно-методическая конференция  
«Актуальные вопросы и современные тенденции развития  
электроэнергетики и электротехники», посвященная 60-летию  
образования Электротехнического факультета ВятГУ**

---

**Сборник материалов**



**Киров, 13 сентября 2023**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Вятский государственный университет»

**Актуальные вопросы и современные  
тенденции развития электроэнергетики  
и электротехники**

**Сборник материалов  
Всероссийской научно-методической конференции,  
посвященной 60-летию образования  
Электротехнического факультета ВятГУ**

*13 сентября 2023 г.*

Киров  
2023

ББК Ч215.16(082)  
А437

*Печатается по рекомендации Научного совета  
Вятского государственного университета*

**Оргкомитет конференции:**

**В. Г. Басманов**, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой электроснабжения (руководитель);  
**Н. С. Бакшаева**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры электроснабжения; **Л. В. Дерендяева**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры электроснабжения; **Е. В. Каравашева**, специалист по учебно-методической работе Отдела аспирантуры, докторантуры и НИРС, куратор СНО ВятГУ; **А. Н. Ожегов**, канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения; **С. И. Охупкин**, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок; **А. А. Фоминых**, канд. техн. наук, доц., декан Электротехнического факультета; **В. В. Черепанов**, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры электроснабжения; **А. Н. Чикишева**, канд. экон. наук, начальник Отдела аспирантуры, докторантуры и НИРС; **С. А. Цырук**, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», **Д. А. Новикова**, студент группы ЖКб-1201-02-00, член СНО ВятГУ

**Редакционная коллегия сборника:**

**А. А. Фоминых**, канд. техн. наук, доц.; **В. Г. Басманов**, канд. техн. наук, доц.; **С. И. Охупкин**, канд. техн. наук, доц.; **Д. М. Суворов**, канд. техн. наук, доц.; **А. В. Бессолицын**, канд. техн. наук; **Н. С. Бакшаева**, канд. техн. наук, доц.

**А437** Актуальные вопросы и современные тенденции развития электроэнергетики и электротехники : сб. материалов Всерос. науч.-метод. конф., посвящ. 60-летию образования Электротехнич. факультета ВятГУ, 13 сентября 2023 г. : – Киров : Вятский государственный университет, 2023. – 110 с. – URL: <http://vestnik43.ru/assets/mgr/docs/Сборники научных трудов и материалы конференций/2023/nmk-2023.pdf>. – ISBN 978-5-98228-271-2. – Текст : электронный.

ББК Ч215.16(082)

**Минимальные системные требования**

Браузер Internet Explorer и др.;  
скорость подключения к сети Интернет 1 мбит/сек и выше;  
Acrobat Reader и др.

ISBN 978-5-98228-271-2

© Вятский государственный  
университет (ВятГУ), 2023

# СОДЕРЖАНИЕ

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

<i>Воршевский Александр Алексеевич, Задорожный Михаил Евгеньевич, Яковлев Павел Сергеевич</i>	
Параметры электростатического разряда при напряжении выше 25 кВ.....	5
<i>Гришаков Евгений Сергеевич, Романов Роман Романович</i>	
Применение промышленных преобразователей частоты на судах.....	10
<i>Кулешова Галина Сергеевна, Михеев Дмитрий Владимирович, Кулешов Алексей Олегович</i>	
Компьютерное моделирование режимов работы ФКУ на основе индуктивно-емкостных элементов при изменении параметров трехфазной электрической сети .....	15
<i>Торопова Анна Константиновна</i>	
Исследование электрической нагрузки лущильного станка .....	20

## МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

<i>Аверьянова Юлия Аркадьевна, Богданова Анна Николаевна</i>	
Анализ современных тенденций в дизайне и производстве ветрогенераторов, включая вертикальные ветроэнергетические установки и прогнозирование энергетической производительности .....	24
<i>Бобрик Петр Петрович, Смирнов Роман Сергеевич</i>	
Транзит, накопители и управление спросом в условиях высокой доли возобновляемых источников энергии .....	28
<i>Клюев Роман Владимирович, Силаев Вадим Иванович</i>	
Проблемы ВИЭ в рамках Четвёртого Энергетического Перехода и новые реалии Эпохи Глобальных Кризисов .....	31
<i>Попов Максим Георгиевич, Вильнер Александр Викторович, Плешкова Татьяна Алексеевна, Зыков Владислав Евгеньевич</i>	
Анализ влияния нетрадиционных источников энергии на производство электроэнергии в энергосистеме .....	36

## ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

<i>Басманов Владислав Геннадьевич, Жаворонков Максим Александрович</i>	
Применение VR-технологий в учебном процессе при подготовке студентов-энергетиков на примере лабораторной работы по оперативным переключениям на подстанции 110/10 кВ .....	40
<i>Баширов Мусса Гумерович</i>	
Разработка учебного лабораторного комплекса для изучения интеллектуальных электроэнергетических комплексов .....	45
<i>Кузнецов Валерий Александрович, Дерендяева Людмила Витальевна</i>	
Проблемы подготовки кадров в современных условиях в энергетической отрасли .....	49
<i>Новоселова Ольга Александровна, Лекомцева Наталья Эдуардовна, Фоминых Антон Анатольевич</i>	
Опыт организации учебных практик для студентов-энергетиков .....	53

<i>Погребисский Михаил Яковлевич, Кузнецов Олег Николаевич, Цырук Сергей Александрович</i>	
Трансформация высшего образования в области электроэнергетики и электротехники в свете реализации Концепции технологического развития России .....	57
<i>Фоминых Антон Анатольевич, Лелекова Екатерина Валерьевна, Коновалова Ирина Александровна, Тимина Наталья Владимировна, Душина Елена Эдуардовна</i>	
Организация совместной проектной деятельности среди обучающихся младших курсов естественно-научных и технических направлений подготовки .....	62
<i>Хорошинина Елена Николаевна, Новоселова Ольга Александровна, Фоминых Антон Анатольевич</i>	
Машина Голдберга как формат инженерного творчества .....	67

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

<i>Басманов Владислав Геннадьевич, Бессолицын Алексей Витальевич, Вальс Роман Павлович</i>	
Погрешность определения действующего значения несинусоидального сигнала при расчетах по алгоритму первого порядка с усреднением замера .....	71
<i>Басманов Владислав Геннадьевич, Сунцов Кирилл Алексеевич</i>	
Результаты исследований состава потребителей машиностроительного предприятия для выбора потребителей-регуляторов .....	76
<i>Баширова Эльмира Муссаевна, Юсупова Ильвина Гамировна, Акчурин Дамир Шамилович</i>	
Исследование информационных параметров электромагнитно-акустического преобразования для решения задачи идентификации напряженно-деформированного состояния оборудования .....	81
<i>Ожегов Андрей Николаевич, Останина Софья Романовна</i>	
Особенности островного режима работы промышленного предприятия .....	86
<i>Репкина Наталия Геннадьевна</i>	
Определение влияния влажности среды на электропотребление .....	91
<i>Соловьева Алина Сергеевна, Дюкин Ильяс Рафаилевич, Тимшин Алексей Иванович, Демидов Дмитрий Вячеславович, Садырин Данила Ильич, Пятин Кирилл Олегович, Храмцов Кирилл Владимирович</i>	
Оптимальная конструкция фазы на линиях сверхвысокого напряжения .....	95

## **ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

<i>Коняев Андрей Юрьевич, Багин Дмитрий Николаевич, Зязев Михаил Евгеньевич</i>	
Повышение энергоэффективности электроприводов рольгангов с линейными асинхронными двигателями .....	99
<i>Куделина Дарья Васильевна, Бирюлин Владимир Иванович, Брежнев Игорь Вадимович</i>	
Применение методов искусственного интеллекта для управления энергоэффективностью промышленных предприятий .....	103
<i>Суворов Дмитрий Михайлович, Якимкин Тимофей Сергеевич</i>	
Определение энергетического эффекта при работе теплофикационных турбоустановок с уплотненными регулирующими диафрагмами по электрическому графику .....	108

# КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

## Параметры электростатического разряда при напряжении выше 25 кВ

Воршевский Александр Алексеевич<sup>a</sup>,  
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой  
Задорожный Михаил Евгеньевич<sup>b</sup>, студент  
Яковлев Павел Сергеевич<sup>c</sup>, заведующий лабораторией  
Санкт-Петербургский государственный  
морской технический университет<sup>a, b, c</sup>, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Электростатический разряд (ЭСР) может привести к сбою или к выходу из строя электронного оборудования. Напряжение воздушного разряда может превышать 25 кВ. Важно знать статистические характеристики напряжения в цепи при воздушных и поверхностных разрядах до 60 кВ. Разработанная установка позволяет измерить амплитуду и фронт возникающих при ЭСР импульсных напряжений в наносекундном диапазоне длительностей. Полученные данные о параметрах напряжений можно использовать для прогнозирования эффектов ЭСР при воздействии на оборудование.

**Ключевые слова:** электростатический разряд, воздушный разряд, импульсная помеха, электромагнитная совместимость.

**Введение.** Электростатический разряд возникает в случае, если накопленный на человеке или предмете заряд создает напряженность электрического поля, превышающую электрическую прочность воздуха. Разряд происходит на рядом расположенные металлические корпуса оборудования, вызывая импульсный ток в десятки ампер с наносекундным фронтом. Напряжение на человеке в сухом помещении при перемещении по синтетическому покрытию может достигать 25 кВ. Разряд вызывает появление наведенных напряжений в печатных платах и внешних кабелях, что может привести к сбою в работе цифровой техники или вызвать выход из строя электронных элементов [1]. Правила Российского морского регистра судоходства и стандарты по электромагнитной совместимости (ЭМС) требуют обязательной проверки устойчивости оборудования к ЭСР. Методики испытаний регламентированы стандартом ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2) [2]. Уровень испытательных напряжений ЭСР устанавливается различными стандартами от 2 до 25 кВ. Экспериментальные данные параметров тока и напряжения ЭСР, полученные при различных значениях емко-

сти корпуса оборудования, различных сопротивлений заземления для таких уровней напряжений, приведены в [3].

При загрузке сыпучих материалов и неэлектропроводящих жидкостей возможно появление более высоких напряжений. Ожидается повышение напряжений и при внедрении диэлектрических корпусов судов.

Работа посвящена экспериментальному определению параметров воздушного разряда при напряжении до 60 кВ для получения данных, необходимых для оценки влияния ЭСР на оборудование.

**Исследование изменения напряжения на мишени при воздушном разряде.** Лабораторная установка (рисунок 1) позволяет исследовать параметры процесса развития воздушного ЭСР до 60 кВ в наносекундном диапазоне длительностей. Источник высокого напряжения заряжает накопительный конденсатор  $C$  за 150 мс до требуемого напряжения  $u_3$ . Воздушный разрядник может быть различной конструкции. Осциллограф  $O$  подключается к резистору через высоковольтный делитель для наблюдения напряжения  $u$ . Наиболее опасным для оборудования является разряд во внешние связи. Разрядный резистор представляет собой цепочку резисторов с общим сопротивлением 300 Ом, что близко к волновому сопротивлению кабеля, расположенного над землей на высоте много большей его диаметра. Экспериментальное исследование изменения напряжения на разрядном резисторе при ЭСР проведено в первую очередь для конструкции разрядника с использованием стандартных электродов по ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2).

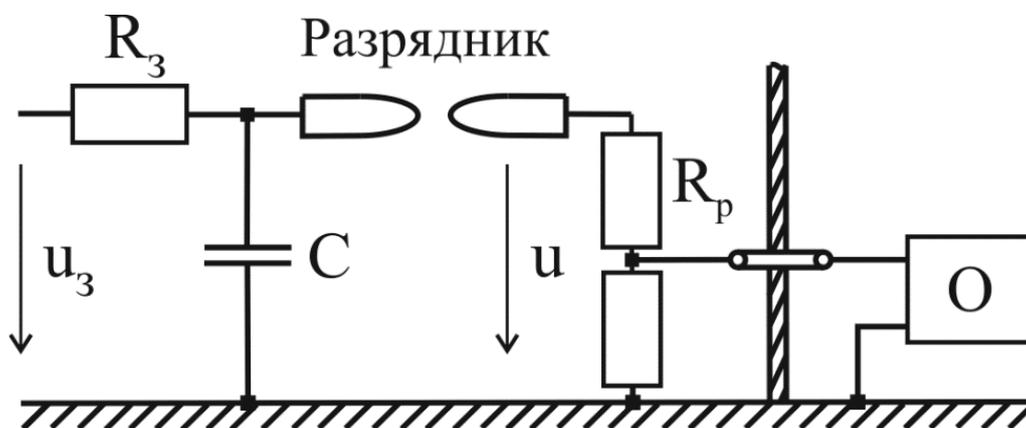


Рисунок 1. Схема установки для исследования воздушного ЭСР.

Электроды 2 имеют размеры, детально описанные в стандарте, и размещены внутри капролонового корпуса 1 (рисунок 2). Расстояние между электродами  $d$  может изменяться от 5 до 65 мм. Имеется возможность размещать между электродами различные препятствия 3 с целью определения их влияния на параметры формируемого импульса напряжения.

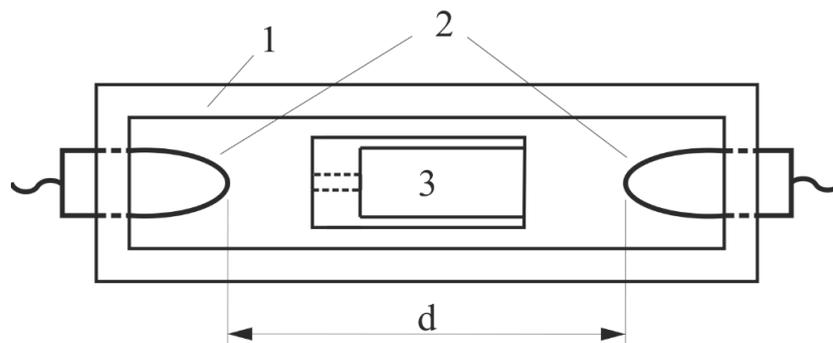


Рисунок 2. Конструкция разрядника с использованием стандартных электродов по ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2)

Примеры осциллограмм изменения напряжения на разрядном резисторе при возникновении пробоя между электродами приведены на рисунке 3.

Воздушный разряд определяется случайными факторами, вносящими существенную случайную составляющую в параметры разряда. В каждом конкретном случае разряда амплитуда напряжения, длительность фронта, измеряемая на уровнях 10–90 % могут существенно варьироваться. На рисунке 3 представлены случаи, когда длительность фронта отличается более чем на 30 % при почти одинаковом разрядном напряжении. С увеличением расстояния между электродами напряжение на разрядном резисторе при ЭСР ожидаемо возрастает.

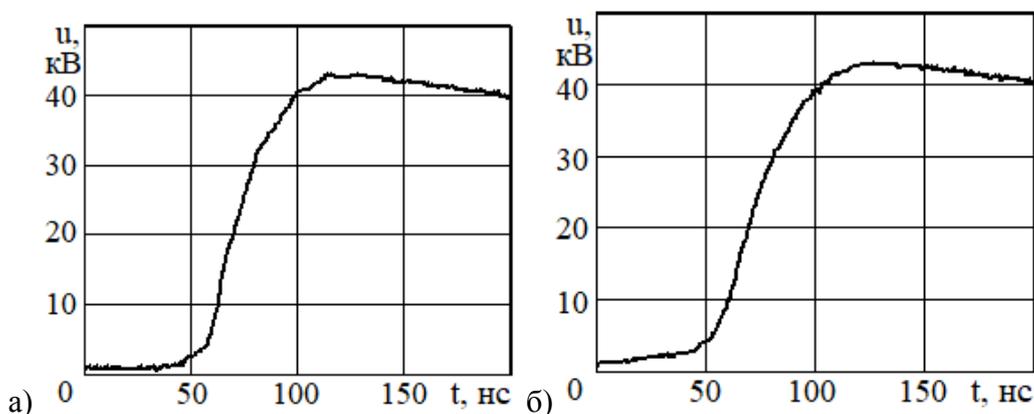


Рисунок 3. Форма напряжения на резисторе при воздушном разряде через разрядник со стандартными электродами: а) амплитуда 43,2 кВ, фронт 36 нс, б) 43 кВ, 47 нс

При достижении расстояния 58–63 мм при напряжении заряда до 60 кВ амплитуда напряжения на резисторе случайно колеблется в пределах 38–46 кВ. При расстоянии более 64 мм пробой не происходит. Длительность фронта напряжения на уровнях 10–90 % от амплитуды колеблется в пределах 32–52 нс, а на уровне 10–50 % в пределах 14–20 нс. Среднее значение фронта составляет соответственно для уровней 10–90 % 42 нс и для 10–50 % 16 нс. При проведении работ по защите оборудования от ЭСР следует учитывать возможность появления импульсов напряжения с минимальным фронтом.

Наличие диэлектрического препятствия 3 на пути развития воздушного разряда удлиняет этот путь. Поэтому разряд может возникнуть лишь при меньшей дистанции  $d$  между электродами. Так пробой происходит при наличии препятствия длиной 15 мм только при  $d < 58$  мм, а для препятствия длиной 30 мм только при  $d < 55$  мм. При наличии отверстия в перегородке (показано пунктиром) пробой развивается через отверстие. Форма напряжения на разрядном резисторе существенно не меняется и близка к приведенной на рисунке 3. Иногда фиксируется появление ступеньки на фронте. Амплитуда напряжения составляет 42 – 45кВ, а фронт разряда 34–48 нс. Можно констатировать, что рассмотренное препятствие существенно не изменяет амплитуду и длительность фронта.

Для оценки параметров импульсного напряжения, обусловленного разрядом вдоль диэлектрической поверхности, изготовлены разрядники в виде фторопластового стержня 1 с надетыми на него металлическими кольцами 2 и фторопластовой трубкой 3 поверх колец и стержня (рисунок 4).

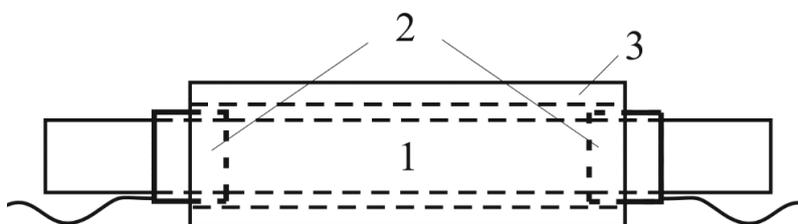


Рисунок 4. Конструкция разрядника с использованием колец на трубке

Для коаксиальной конструкции с трубками диаметром 11 и 7 мм разряд происходит при максимальном расстоянии между кольцами 50 мм. Амплитуда напряжения на резисторе 39–44кВ при фронте на уровне 10–90 % 31–41 нс и на

уровне 10–50 % 9–13 нс. Наблюдается статистически значимое укорочение длительности фронта импульсного напряжения при поверхностном разряде по сравнению с воздушным разрядом между стандартными электродами.

**Заключение.** Экспериментальная установка позволяет исследовать параметры напряжения в цепи, подвергшейся ЭСР с напряжением до 60 кВ. При воздушном разряде можно ожидать импульсные напряжения до 46 кВ с фронтом 32–52 нс, а при поверхностном разряде с фронтом 31–41 нс.

### **Библиографический список**

1. Воршевский А. А., Гальперин В. Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств / СПбГМТУ. СПб., 2010. 317 с.
2. ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний: принят 25.03.2013; действ. с 01.01.2014. М., 2020. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/54917/> (дата обращения 19.07.2023).
3. Воршевский А. А., Гришаков Е. С., Жиленков А. А. Формирование воздушного электростатического разряда и его влияние на цифровое промышленное оборудование // Электротехника. 2021. № 5. С. 47–52.

## Применение промышленных преобразователей частоты на судах

Гришаков Евгений Сергеевич<sup>a</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Романов Роман Романович<sup>b</sup>, магистрант  
Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет<sup>a,b</sup>, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Применение промышленного электронного оборудования в судостроении является серьезной задачей для разработчиков. Требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) расширены и усилены дополнительными требованиями. В работе представлены результаты измерения кондуктивных помех от частотного преобразователя (ПЧ) Mitsubishi A700 в различных режимах работы. Приводятся допустимые значения напряжения радиопомех Российского морского регистра судоходства (РС) и сравнение их с результатами измерений.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, электромагнитная совместимость, кондуктивная помеха, фильтр.

В современном мире преобразователи частоты занимают особое место в промышленности и уже становятся неотъемлемой частью судового электропривода. Основное применение ПЧ на судне – это подъемные и швартовные механизмы, а также для обеспечения электродвижения. Трудно представить включение асинхронных двигателей без частотного преобразователя, особенно если речь идет о мощности в сотни киловатт.

На сегодняшний день ПЧ выпускаются в основном для общепромышленного использования и требования различных стандартов относятся также к общепромышленному оборудованию. Требованиям таких стандартов и должны соответствовать ПЧ, но появляются некоторые проблемы, когда поставлена задача установить данный ПЧ на судно. Это прежде всего относится к испытаниям, которые предъявляет РС [1] и Российское Классификационное Общество (РКО) [2]. Одним из наиболее затруднительных требований является прохождение испытаний на ЭМС. Испытания разделяются на измерение помех от электрооборудования (ЭО) и воздействие помехами на это же оборудование. Если требования по устойчивости к внешним помехам у РС практически совпадают с требованиями ГОСТ 30804.6.2-2013 [3], и даже некоторые из них менее требовательны, то требования по измерению помех от оборудования существенно отличаются и вызывают некоторые сложности при испытаниях. Нормы для ЭО по цепям питания и сигнальных линиях по требованиям РС представлены в таблице 1 [4].

**Нормы РС по уровню электромагнитных помех  
в цепях питания и сигнальных линиях**

Оборудование, размещенное на открытой палубе и ходовом мостике E1		Оборудование, размещенное в машинных и других закрытых помещениях судна E2	
Диапазон частот	Уровень электромагнитного поля, дБмкВ/м	Диапазон частот, кГц	Уровень электромагнитного поля, дБмкВ/м
10–150 кГц	96–50	10–150 кГц	120–96
150 кГц – 350 МГц	60–50	150–500 МГц	79
350 кГц – 30 МГц	50	500–30 МГц	73

Согласно стандарту ГОСТ 30804.6.4-2013 [4] помехи от промышленного оборудования измеряются в диапазоне от 150 кГц до 30 МГц, что значительно отличается от требований РС, где измерения следует проводить от 10 кГц до 30 МГц (таблица 1). Можно сделать вывод, что разработчики ПЧ будут по возможности стараться рабочую частоту сделать до 150 кГц, так как этот участок измерять не требуется.

На судах применяются в основном ПЧ мощностью более 10 кВт и в данной работе рассматривается Mitsubishi A70 мощностью 110 кВт. В качестве нагрузки подключен асинхронный двигатель АИР100L2У3 5,5кВт. На рисунке 1 представлен результат измерений наибольших пиковых и квазипиковых значений напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемых ПЧ без вращения электродвигателя. Подключение электропитания и нагрузки к ПЧ выполнено экранированным кабелем, заземленным со стороны ПЧ.

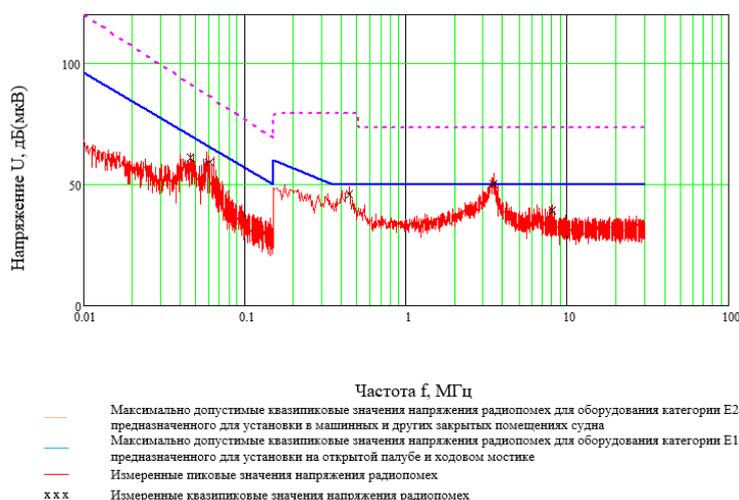


Рисунок 1. Пиковое и квазипиковое значение напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемое ПЧ Mitsubishi A700 в порту электропитания переменного тока 380 В, 50 Гц без вращения электродвигателя

По графику видно, что результат измерений удовлетворяет требованиям РС для оборудования категории E1 и E2, точка 3,45 МГц ниже на 1,5 дБ нормы для категории E1.

Результат измерений напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемых ПЧ при вращении электродвигателя представлен на рисунке 2. Измерения проводились при вращении электродвигателя на частотах 15, 25 и 50 Гц. Результат измерений отличается не более чем на 3 дБ. Изделие превышает две представленные нормы РС. Без дополнительных доработок и фильтров установка на судно не допускается. Данные помехи создает выходная часть ПЧ при работе электродвигателя. Помеха «стекает» по экрану на ГПС, относительно которой производятся измерения. В качестве эксперимента экран кабеля отключили от заземления. На рисунке 3 представлен результат измерения напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемых ПЧ при вращении электродвигателя. Экран кабеля к нагрузке не заземлен.

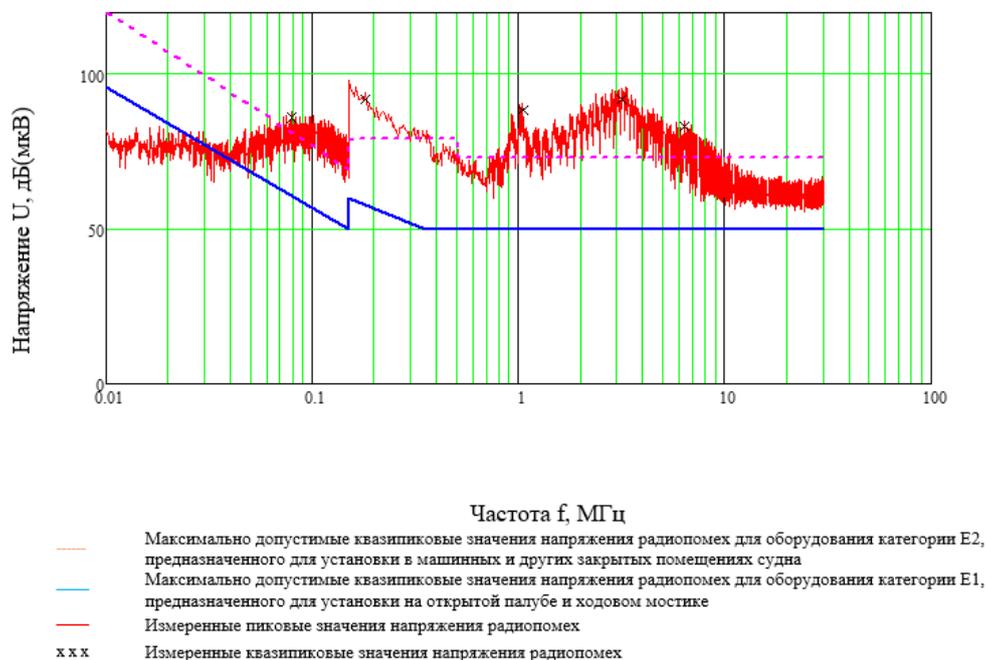


Рисунок 2. Пиковое и квазипиковое значение напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемое ПЧ Mitsubishi A700 в порту электропитания переменного тока 380 В, 50 Гц при вращении электродвигателя

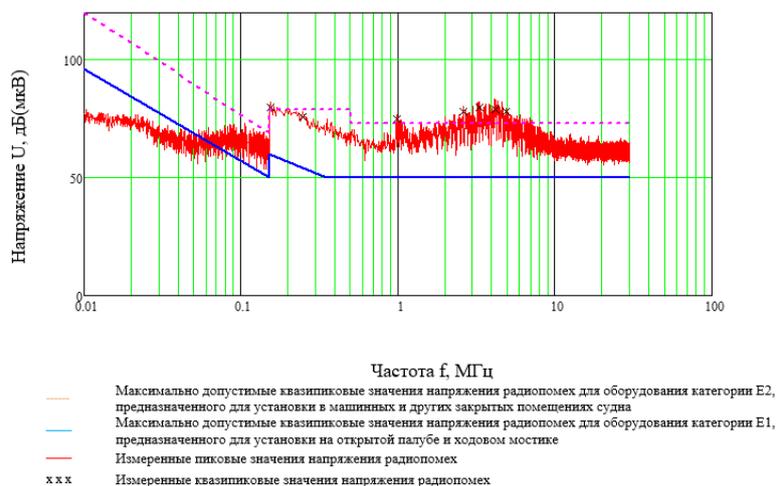


Рисунок 3. Пиковое и квазипиковое значение напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемое ПЧ Mitsubishi A700 в порту электропитания переменного тока 380 В, 50 Гц при вращении электродвигателя. Кабель нагрузки не заземлен

Значение напряжения кондуктивных помех существенно уменьшилось, но еще не соответствует требованиям РС, а кроме того, согласно руководству по эксплуатации ПЧ Mitsubishi A700 кабели должны быть экранированные и заземлены. Превышения наблюдаются в широком диапазоне, поэтому необходимо установить фильтр радиопомех, который работает от 300 кГц до 10 МГц. На рисунке 4 представлен результат измерения напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемых ПЧ при вращении электродвигателя при установленном фильтре радиопомех ФИР32 производство ООО «ЭЛЕМКОМ». Фильтр работает в диапазоне от 10 кГц до 100 МГц.

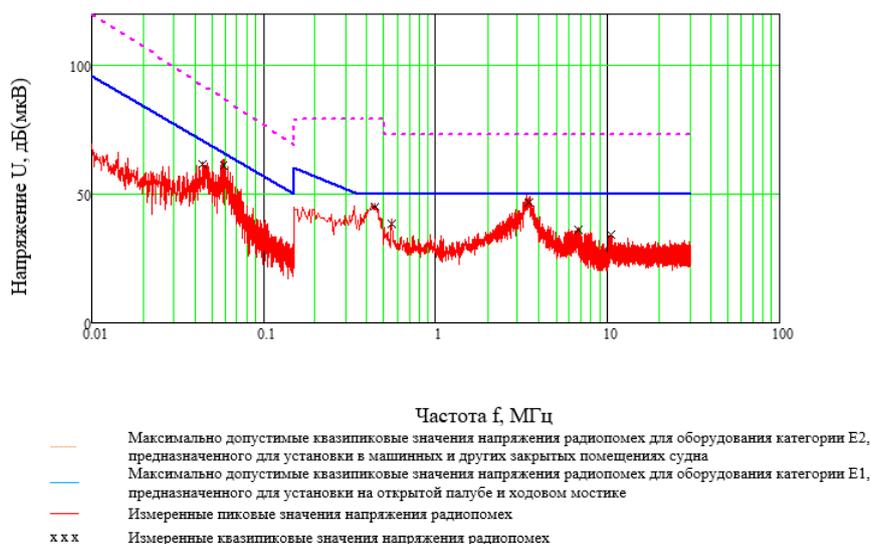


Рисунок 4. Пиковое и квазипиковое значение напряжения кондуктивных помех  $U$  в дБ(мкВ), создаваемое ПЧ Mitsubishi A700 в порту электропитания переменного тока 380 В, 50 Гц при вращении электродвигателя с установленным фильтром ФИР32

Результат удовлетворяет требованиям РС по двум категориям оборудования и данный ПЧ не имеет ограничения по месту установки на судне при установке данного фильтра в цепь питания 380 В, 50Гц. При выборе оборудования и комплектующих необходимо очень внимательно относиться к имеющимся сертификатам и протоколам испытаний. Данная рекомендация позволит избежать дополнительных расходов по доработке и способствует своевременной установки изделия на заказ.

### **Библиографический список**

1. НД № 2-020101-118 Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Часть IV Техническое наблюдение за изготовлением изделий. СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2023. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293729/4293729277.htm> (дата обращения 12.07.2023).

2. НД 2-020101-104 Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI «Электрическое оборудование» (п. 2.2 «Электромагнитная совместимость»). СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2021. URL: [https://standartgost.ru/g/pkey-14293741661/НД\\_2-020101-104](https://standartgost.ru/g/pkey-14293741661/НД_2-020101-104) (дата обращения 12.07.2023).

3. ГОСТ 30804.6.2-2013 Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах, Требования и методы испытаний: принят 07.06.2013; действ. с 01.01.2014. М., 2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103330> (дата обращения 12.07.2023).

4. ГОСТ 30804.6.4-2013 (IEC 61000-6-4:2006) Совместимость технических средств электромагнитная Электромагнитные помехи от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний принят 07.06.2013; действ. с 01.01.2014. М., 2013. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103653> (дата обращения 12.07.2023).

## **Компьютерное моделирование режимов работы ФКУ на основе индуктивно-емкостных элементов при изменении параметров трехфазной электрической сети**

Кулешова Галина Сергеевна<sup>a</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Михеев Дмитрий Владимирович<sup>b</sup>, канд. экон. наук, канд. техн. наук, доцент  
Кулешов Алексей Олегович<sup>c</sup>, канд. техн. наук, доцент  
НИУ «МЭИ»<sup>a, b, c</sup>, Москва

**Аннотация.** Автоматизация и цифровизация всех видов производственных процессов сопровождается активным использованием электроприемников на базе устройств силовой электроники, которые представляют собой нелинейную нагрузку, что приводит к возникновению в питающей сети несинусоидальных режимов (появлению высших гармоник (ВГ) напряжения и тока) и дефициту реактивной мощности. Это обуславливает проблему обеспечения электромагнитной совместимости электроприемников, получающих питание от одной распределительной электрической сети (ЭС). Для решения данной проблемы применяются различные виды фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), при этом остается актуальной потребность в создании ФКУ с улучшенными технико-экономическими показателями. Такие ФКУ могут быть реализованы на основе индуктивно-емкостных элементов.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии, фильтрокомпенсирующее устройство, индуктивно-емкостной элемент, катушка-конденсатор, каткон.

Индуктивно-емкостной элемент – каткон (катушка-конденсатор) – электротехническое устройство, в котором применяется принцип самокомпенсации реактивной мощности и одновременно объединяются функции индуктивной катушки и конденсатора [1, 2].

При построении однофазных ФКУ на основе индуктивно-емкостных элементов секции катконов (рис. 1а) размещают на магнитопроводе с немагнитными зазорами, соединяют последовательно согласно между собой и катушками коррекции и подключают к компенсируемой ЭС (рис. 1б). Такая конструкция способствует эффективному управлению магнитными потоками и изменению эквивалентных параметров уже готового устройства при изменении параметров компенсируемой ЭС [3]. Для осуществления фильтрокомпенсации в трехфазной ЭС можно использовать трехфазную группу, образованную тремя однофазными ФКУ, выводы К2 которых соединены по схеме «звезда» и заземлены или изолированы в зависимости от режима работы нейтрали этой ЭС.

Для математического и компьютерного описания процессов, происходящих в ЭС при функционировании ФКУ на основе индуктивно-емкостных эле-

ментов целесообразно использовать синтезированную относительно входных выводов Н1 и К2 схему замещения каткона (на фазу) с эквивалентными сосредоточенными параметрами для случая, когда выходные выводы (Н2 и К1) разомкнуты (рис. 1в) [4].

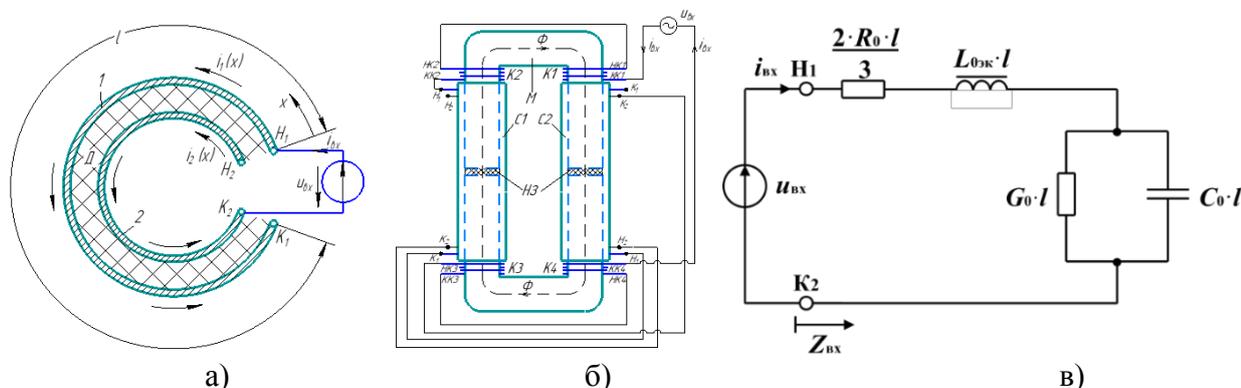


Рисунок 1. Секция индуктивно-емкостного элемента (один виток, вид сверху, выходные выводы разомкнуты) (а), функциональная схема однофазной двухсекционной модели ФКУ на базе катконов (б), схема замещения ФКУ на базе катконов с эквивалентными сосредоточенными параметрами относительно выводов Н1 и К2 при разомкнутых выводах К1 и Н2

В [5] исследована работа ФКУ на базе катконов с регулируемой эквивалентной индуктивностью в однофазной ЭС. Таким образом, в настоящей работе исследуются функционирование ФКУ на базе каткона в трехфазной ЭС с изолированной нейтралью при изменении параметров компенсируемой ЭС.

Компьютерная реализация трехфазной компенсируемой электрической сети, содержащей трехфазную симметричную линейную нагрузку и трехфазную группу ФКУ на базе катконов показана на рис. 2.

Компенсируемая трехфазная ЭС напряжением 10 кВ моделируется трехфазным несинусоидальным источником напряжения и комплексным сопротивлением  $Z_{grid}$ . Несинусоидальный источник напряжения представляется двумя источниками синусоидального напряжения в соответствии с разложением в ряд Фурье, при этом для имитации изменения гармонического состава напряжения сети переключение между гармоническими источниками осуществляется с помощью управляемых ключей (табл. 1). Линейная активно-индуктивная нагрузка моделируется комплексным сопротивлением (на фазу)  $Z_{load}=80+j2\pi \cdot k \cdot f \cdot L_{load}$  Ом, ( $L_{load}=0,5$  Гн,  $\cos\varphi=0,45$ ). Для фильтрации пятой гармоники напряжения пита-

ющей ЭС ( $k=5$ ) и компенсации реактивной мощности параллельно к нагрузке подключается трехфазная группа ФКУ на базе индуктивно-емкостных элементов со следующими эквивалентными сосредоточенными параметрами (на фазу):  $L_{ФКУ(5)}=9,4$  мГн,  $C_{ФКУ}=43$  мкФ,  $R_{ФКУ}=0,05$  Ом.

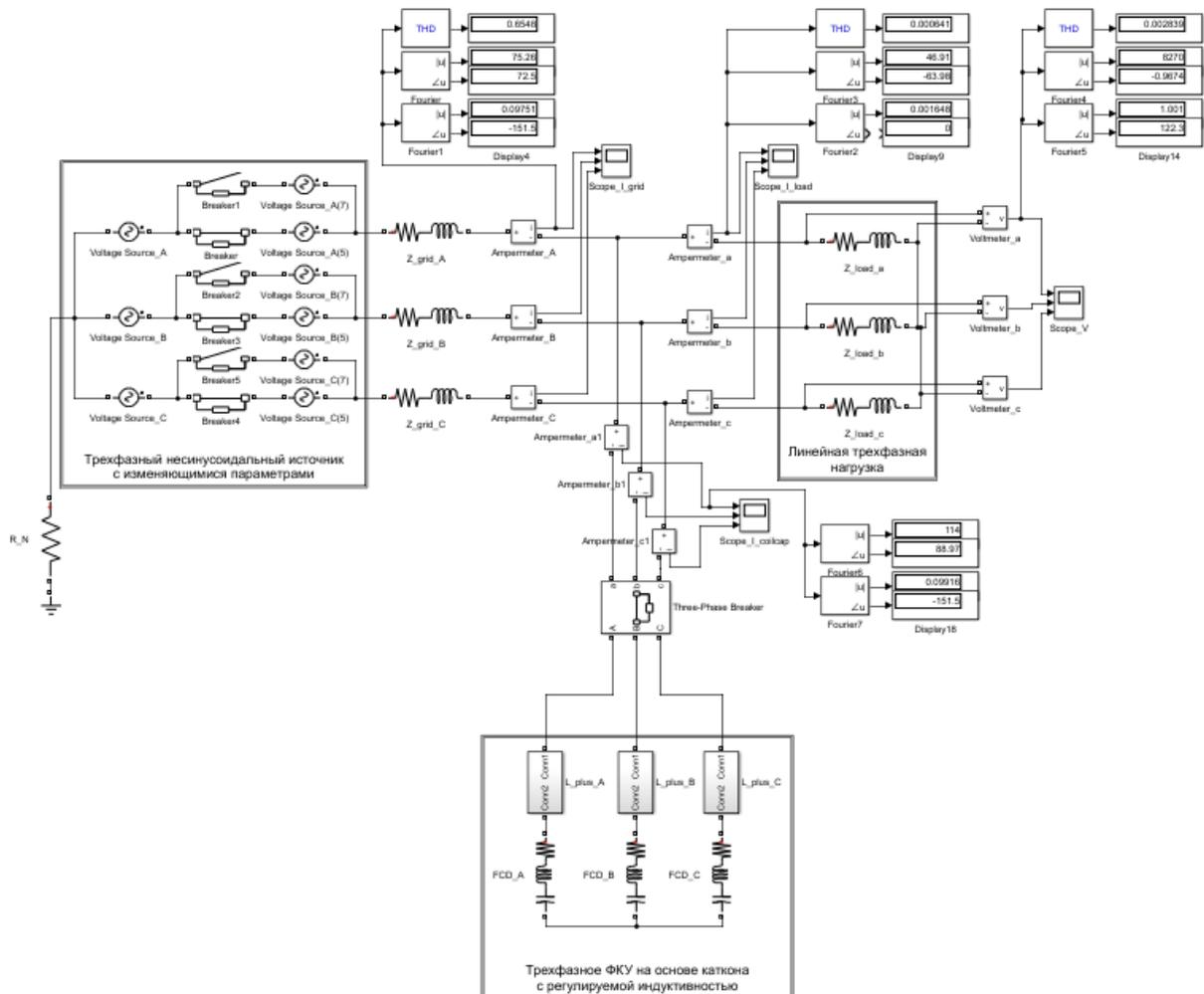


Рисунок 2. Компьютерная модель в MATLAB/Simulink для исследования установившихся и переходных режимов работы электротехнического комплекса «Трехфазная группа ФКУ на основе катконов с регулируемой эквивалентной индуктивностью – электрическая сеть с изолированной нейтралью»

Таблица 1

**Параметры компенсируемой трехфазной ЭС**

Номер ВГ	5	7
Параметры несинусоидального источника	$U_{mA(1)}=U_{mB(1)}=U_{mC(1)}=\sqrt{2} \cdot 5774$ В, $f=50$ Гц, $U_{mA(5)}=U_{mB(5)}=U_{mC(5)}=1500$ В, $k=5, f=250$ Гц, $\varphi_A=0^\circ, \varphi_B=120^\circ, \varphi_C=-120^\circ,$	$U_{mA(1)}=U_{mB(1)}=U_{mC(1)}=\sqrt{2} \cdot 5774$ В, $f=50$ Гц, $U_{mA(5)}=U_{mB(5)}=U_{mC(5)}=1000$ В, $k=7, f=350$ Гц $\varphi_A=0^\circ, \varphi_B=-120^\circ, \varphi_C=120^\circ,$
	$Z_{grid}=1+j2\pi \cdot k \cdot f \cdot L_{grid}$ Ом, $L_{grid}=8,5$ мГн	

При изменении гармонического состава напряжения сети ( $k=5 \rightarrow k=7$ ) трехфазная группа ФКУ на основе катконов отключается от компенсируемой ЭС с помощью трехфазного выключателя в момент времени  $t_1=0,1$  с, происходит перенастройка индуктивности ФКУ в каждой фазе за счет изменения длины немагнитного зазора и числа витков катушек коррекции, что реализуется в блоке  $L_{plus}$ , в результате чего уменьшается эквивалентная индуктивность ФКУ ( $L_{ФКУ(5)}=9,4$  мГн  $\rightarrow$   $L_{ФКУ(7)}=4,8$  мГн) и колебательный LC-контур настраивается в резонанс на частоту седьмой ВГ. Затем трехфазная группа ФКУ снова подключается к компенсируемой ЭС в момент времени  $t_2=0,2$  с. Изменение напряжения на нагрузке и токов в течение переходных процессов и в установившихся режимах представлены на рис. 3.

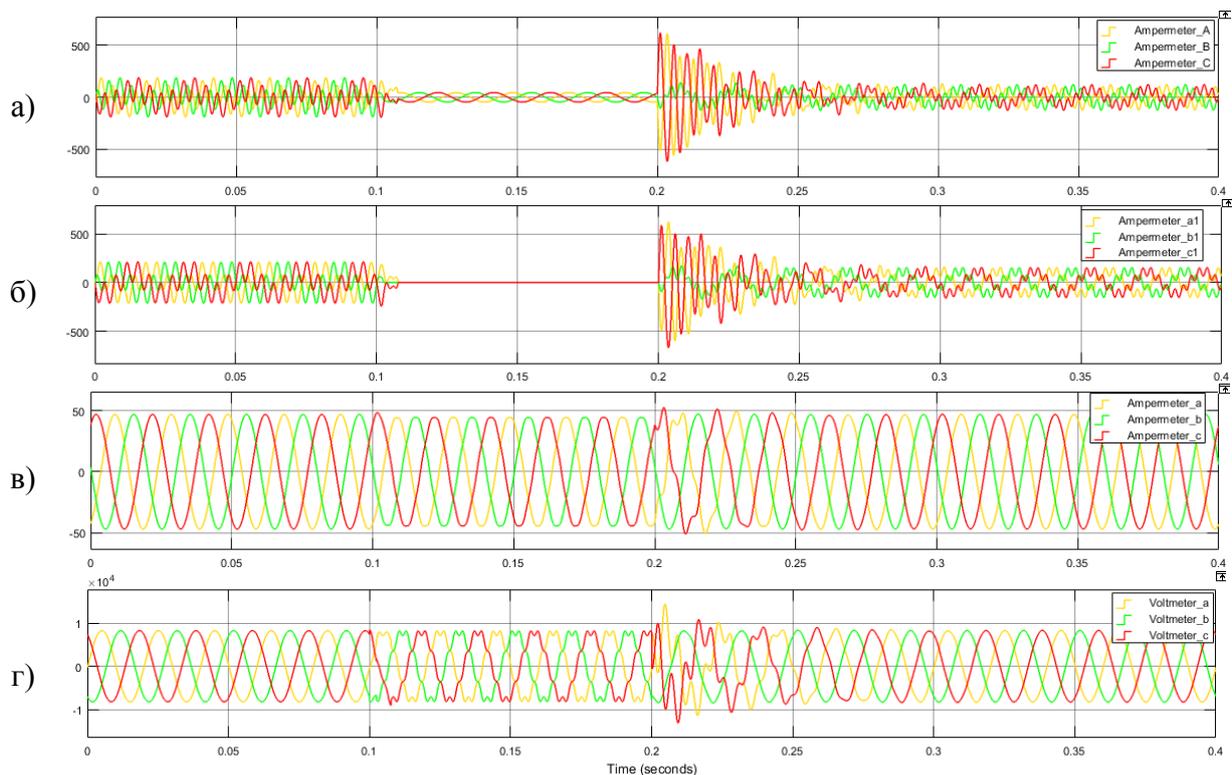


Рисунок 3. Осциллограммы токов в сети (а), в ветви ФКУ (б), в нагрузке (в), напряжения на нагрузке (г)

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

- разработана компьютерная модель и проведено имитационное компьютерное моделирование переходных процессов, вызванных изменением параметров компенсируемой трехфазной ЭС с изолированной нейтралью и параметров эквивалентной индуктивности трехфазной группы ФКУ на основе катконов;

– полученные осциллограммы токов и напряжений соответствуют математической модели для анализа переходных процессов при подключении ФКУ на основе катконов к компенсируемой ЭС [6, 7];

– при подключении трехфазного ФКУ на базе каткона к ЭС в установившемся режиме снижается степень несинусоидальности напряжения в нагрузке, корректируется коэффициент мощности, в переходных режимах при коммутациях – наблюдается режим сверхтоков в цепи ФКУ, не возникает опасных коммутационных перенапряжений в нагрузке.

Трехфазная группа ФКУ на основе катконов выполняет те же функции, что и пассивные дискретные трехфазные ФКУ, однако иной физический принцип, лежащий в основе функционирования предлагаемых устройств, позволяет улучшить технико-экономические характеристики по сравнению с аналогами [8], что особенно актуально для современных систем электроснабжения.

### **Библиографический список**

1. Reeves R. Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. Vol. 122. № 11. P. 1323–1326.
2. Butyrin P. A., Gusev G. G., Mikheev D. V., Shakirzianov F. N. Coil-Capacitor As A Basis For Creating Efficient Devices For Distribution Power Networks // Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems – NEIS 2018. Hamburg, Germany. 2018. September 20–21. P. 173–178.
3. Пат. 2714925 РФ, МПК H02J 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство / П. А. Бутырин, Г. Г. Гусев, М. В. Карпунина, А. А. Кваснюк, Д. В. Михеев, Ф. Н. Шакирзянов; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО «НИУ «МЭИ». № 2019128529; заявл. 11.09.2019, опубл. 21.02.2020. Бюл. № 6.
4. Бутырин П. А., Гусев Г. Г., Кужман В. В., Михеев Д. В. Синтез схем замещения каткона как элемента преобразовательной техники // Научно-технический журнал «Электропитание». 2014. № 2. С. 54–55.
5. Кулешова Г. С., Михеев Д. В. Моделирование режимов работы ФКУ на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента при изменении параметров электрической сети // Фёдоровские чтения – 2021 : LI междунар. науч.-практ. конф. с элементами научной школы. М. : Изд. дом МЭИ, 2021. С. 198–204.
6. Бутырин П. А., Гусев Г. Г., Шакирзянов Ф. Н., Михеев Д. В. и др. Экспериментальное исследование переходных процессов в катушке-конденсаторе при подключении к источнику синусоидального напряжения // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 11. С. 1592–1595.
7. Kuleshova G. S., Mikheev D. V. Modeling the operating modes of a FCD based on a hybrid inductive-capacitive element in power supply systems // XV International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics). Omsk, 2021.
8. Михеев Д. В., Кулешова Г. С. Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе гибридного индуктивно-емкостного элемента // Промышленная энергетика. 2020. № 12. С. 9–16.

## Исследование электрической нагрузки лущильного станка

Торопова Анна Константиновна, аспирант  
Вятский государственный университет, Киров

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию электрической нагрузки лущильных станков (ЛС) фанерного производства. Установлено, что изменение нагрузки данных электроприемников носит резкопеременный случайный характер. Это приводит к колебаниям напряжения и появлению фликера. В результате статистической обработки результатов наблюдений определены параметры электрической нагрузки на 30-минутном интервале осреднения и найдены коэффициенты, необходимые для получения расчетной электрической нагрузки. Определены параметры нагрузки на интервале осреднения 200 мс, что необходимо для оценки пиковых значений тока. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем электроснабжения фанерных производств и разработке методики расчета дозы фликера, возникающей при работе ЛС.

**Ключевые слова:** электрическая нагрузка, резкопеременная нагрузка, качество электрической энергии, колебания напряжения, фликер.

Исследование электрических нагрузок проводилось на действующем фанерном предприятии Кировской области. Объектом экспериментального исследования выступали четырехфутовый и восьмифутовый ЛС, применяемые для получения лущильного шпона. Главный привод станков – это двигатель постоянного тока с номинальной мощностью 154 кВт, работающий совместно с преобразователем.

В ходе исследования получены графики изменения электрической нагрузки ЛС (рис. 1), подтверждающие, что нагрузка ЛС носит резкопеременный характер и изменяется случайным образом. В ходе работы главный привод ЛС испытывает воздействие следующих случайных факторов: изменение плотности древесины, наличие сучков в древесине, случайные изменения скорости подачи заготовок и т. д., которые оказывают значительное влияние на нагрузку электродвигателя.

Установлено, что ЛС работает в повторно-кратковременном режиме (ПКР): рабочий период – лущение заготовки чередуется с периодом холостого хода. При нормальных условиях эксплуатации двигатель главного привода ЛС постоянно нагружен и в течение всего цикла не отключается (табл. 1).

Полученные данные свидетельствуют о том, что работа ЛС является одной из причин появления колебаний напряжения (КН) и возникновения фликера.

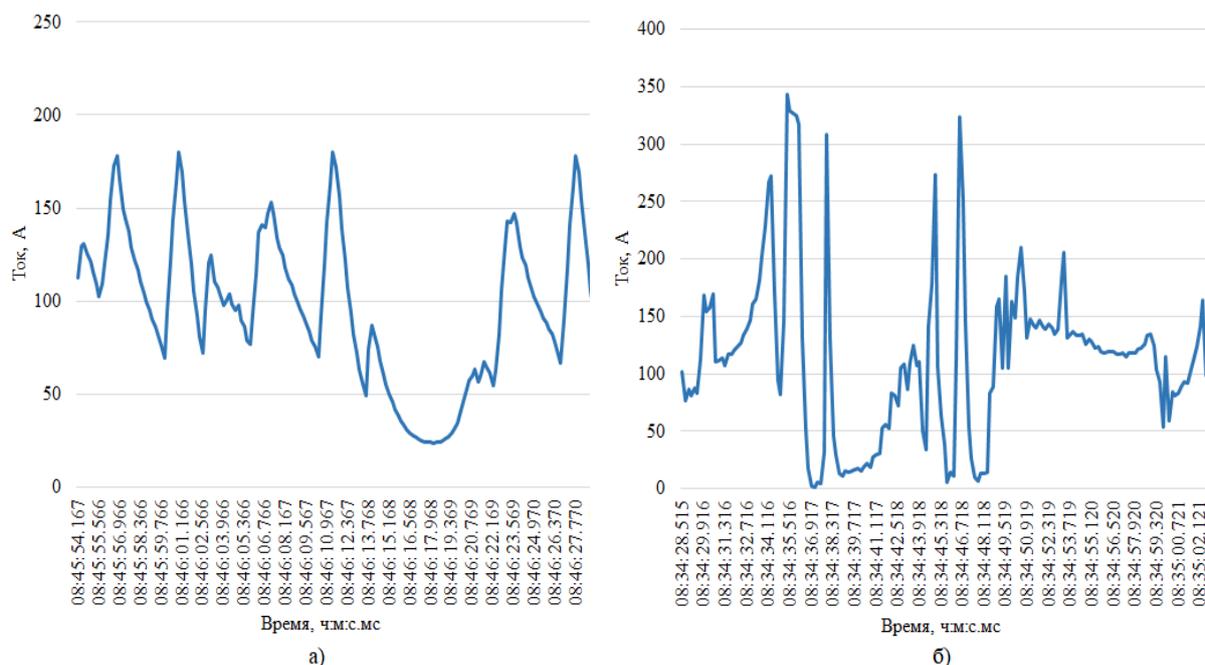


Рисунок 1. Изменение электрической нагрузки ЛС:  
а – четырехфутутовый; б – восьмифутутовый

Таблица 1

**Результаты измерений параметров статистической диаграммы**

Длительность режима, сек.			Количество колебаний		Значение импульса тока, А	
Холостой ход	Рабочий режим	Всего	За цикл	За минуту	Макс.	Мин.
Четырехфутутовый ЛС						
3	9	11	11	61	207,6	0,11
Восьмифутутовый ЛС						
4	6	10	23	136	345,2	0,04

Кратковременная доза фликера  $P_{st}$  и длительная доза фликера  $P_{lt}$  согласно ГОСТ 32144-2013 не должны превышать значения 1,38 и 1,0 соответственно в течение 100 % времени интервала в одну неделю. При работе двух ЛС  $P_{st} \geq 1,4$  и  $P_{lt} \geq 1,3$ , данный факт подтверждает, что ЛС вызывают КН, превышающие допустимые стандартом значения.

При проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий для выбора кабелей, трансформаторов и другого оборудования необходимо знать параметры нагрузки на интервале осреднения 30 минут. В таблице 2 приведены значения параметров для модуля тока, активной и реактивной мощностей на 30-минутном интервале осреднения.

**Параметры нагрузки на 30-минутном интервале осреднения**

Параметр	Модуль тока, А	Активная мощность, кВт	Реактивная мощность, квар
Четырехфазный ЛС			
Математическое ожидание	90,94	20,204	40,679
Среднеквадратичное отклонение	26,278	6,450	13,156
Максимальное значение	111,467	25,518	52,641
Восьмифазный ЛС			
Математическое ожидание	110,34	20,949	35,476
Среднеквадратичное отклонение	51,974	11,130	18,750
Максимальное значение	170,233	35,901	62,529

Для нахождения расчетной электрической нагрузки определены коэффициент использования и коэффициент формы графика.

Коэффициент использования является основным показателем для расчета нагрузки:

$$k_{и.а.} = \frac{p_c}{p_{ном}}, \quad (1)$$

где  $p_c$  – средняя активная мощность на 30-минутном интервале осреднения, кВт;

$p_{ном}$  – номинальная мощность ЛС, кВт.

По формуле (1) для четырехфазного ЛС коэффициент использования равен 0,153, для восьмифазного – 0,174.

Коэффициенты формы графика по активной и реактивной мощности:

$$k_{ф.а.} = \frac{p_{ск}}{p_c}; \quad (2)$$

$$k_{ф.р.} = \frac{q_{ск}}{q_c}; \quad (3)$$

где  $p_{ск}$ ,  $q_{ск}$  – среднеквадратическая активная и реактивная мощность соответственно на интервале осреднения 200 мс, кВт, квар;

$p_c$ ,  $q_c$  – средняя активная и реактивная мощность соответственно на интервале осреднения 200 мс, кВт;

По формулам (2) и (3) для четырехфазного ЛС коэффициенты формы равны  $k_{ф.а.} = 1,382$ ;  $k_{ф.р.} = 1,104$ ; для восьмифазного –  $k_{ф.а.} = 1,427$ ;  $k_{ф.р.} = 1,411$ .

В электрической сети при пуске электродвигателей и их работе возможно возникновение кратковременных пиковых токов различной продолжительности.

В таблице 3 представлены статистические характеристики тока первой гармоники, полученные на интервале осреднения 200 мс, благодаря которым можно определить величину пикового тока, необходимого для проверки электрической сети по условиям самозапуска электродвигателей, выбора аппаратуры защиты и другое оборудование, а также выполнения расчета колебаний напряжения сети.

Таблица 3

**Статистические характеристики тока первой гармоники**

Параметр	Модуль	Активная составляющая	Реактивная составляющая
Четырехфазовый ЛС			
Математическое ожидание, А	100,2	57,4	75,0
Среднеквадратичное отклонение, А	38,3	37,0	35,0
Коэффициент асимметрии	0,08	0,08	1,1
Коэффициент эксцесса	-0,14	-0,92	1,7
Максимальное значение, А	207,6	166,6	206,0
Восьмифазовый ЛС			
Математическое ожидание, А	109,2	69,9	79,1
Среднеквадратичное отклонение, А	101,8	70,3	78,8
Коэффициент асимметрии	0,75	0,86	1,16
Коэффициент эксцесса	-0,47	-0,16	0,75
Максимальное значение, А	345,2	278,6	319,5

**Выводы:**

1. Установлено, что главный привод ЛС работает в повторно-кратковременном режиме, нагрузка двигателей изменяется случайным образом и имеет резкопеременный характер. Рабочий цикл чередуется с циклом холостого хода, двигатель главного привода постоянно нагружен и в течение цикла не отключается.

2. Полученные сведения по размахам изменения величины и частоты электрической нагрузки двигателей будут полезны при расчете колебаний напряжения и оценке дозы фликера.

3. Найденные коэффициенты использования и формы графика рекомендуется применять при расчете электрической нагрузки на 30-минутном интервале осреднения.

# МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

**Анализ современных тенденций в дизайне и производстве ветрогенераторов, включая вертикальные ветроэнергетические установки и прогнозирование энергетической производительности**

Аверьянова Юлия Аркадьевна<sup>a</sup>, канд. техн. наук, доцент, доцент  
Богданова Анна Николаевна<sup>b</sup>, студент  
Казанский государственный энергетический университет<sup>a, b</sup>, Казань

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены современные тенденции в дизайне и производстве ветрогенераторов, включая вертикальные ветроэнергетические установки. Статья также анализирует конструктивные особенности и характеристики данных установок, а также рассматривает стоимость их внедрения. Кроме того, изучается роль прогнозирования энергетической производительности в оптимизации работы ветряных установок.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, ветрогенераторы, скорость ветра, прогнозирование, энергетическая производительность.

В современном мире, где вопросы устойчивости и экологии становятся все более актуальными, возобновляемые источники энергии играют важную роль в обеспечении энергетической потребности. Одним из наиболее быстро развивающихся направлений в данной области является ветровая энергетика. Согласно отчету Международной ассоциации ветроэнергетики (Global Wind Energy Council), объем глобально установленных мощностей ветроэнергетики составил 837 гигаватта к концу 2022 года, что демонстрирует ее значительный потенциал [1].

Традиционные горизонтальные ветровые установки, несмотря на свою эффективность, сталкиваются с ограничениями в пространственной эффективности и требованиями к высоким скоростям ветра. Это приводит к ограниченному размещению ветропарков и затрудняет интеграцию в городские среды. Однако вертикальные ветрогенераторы предлагают новое решение. Исследование, проведенное в Университете Калифорнии в Дэвисе, показало, что вертикальные ветроэнергетические установки могут эффективно использовать ветровую энергию даже при низких скоростях ветра, что делает их более подходящими для городских условий [2].

Одной из ключевых черт вертикальных ветровых установок является вертикальная ориентация вращающихся лопастей. В отличие от горизонтальных ветрогенераторов, где лопасти располагаются горизонтально и вращаются как лопасти вертолета, вертикальные ветроэнергетические установки имеют лопасти, ориентированные вертикально вокруг вертикальной оси [3]. Они часто имеют аэродинамическую форму, напоминающую крылья самолета или подковы. Эта форма способствует оптимальному захвату ветра с любого направления и повышает эффективность оборудования.

Вертикальные ветрогенераторы могут быть оборудованы механизмами ориентации, которые позволяют поворачивать лопасти для оптимального захвата ветра. Это позволяет улучшить производительность в условиях переменных направлений ветра.

В нижней части вертикальной ветровой установки располагаются генератор и механизмы управления. Кинетическая энергия, полученная от вращения лопастей, преобразуется в электрическую энергию с помощью генератора.

Вертикальные ветроэнергетические системы способны эффективно работать при изменяющихся направлениях ветра, так как они могут захватывать энергию из ветра независимо от его направления. Это делает их особенно подходящими для мест с переменными ветровыми условиями. Исследования в Университете Калифорнии в Дэвисе показали, что вертикальные ветроустановки могут начинать генерировать электричество при скоростях ветра всего 2–3 м/с [4], что делает их эффективными даже в условиях с низкими скоростями ветра.

Средняя стоимость вертикальных ветрогенераторов может значительно варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как размер, мощность, дизайн, производитель, технические характеристики и страна, в которой они будут установлены. Маломощные вертикальные ветроэнергетические установки для домашнего использования могут иметь стоимость от нескольких тысяч до десятков тысяч долларов в зависимости от их размера и мощности. Например, системы мощностью 1–5 кВт могут стоить в районе 470 000–1 900 000 рублей. Более крупное оборудование, предназначенное для коммерческой или промышленной генерации электроэнергии, может стоить значи-

тельно больше. Стоимость таких установок может начинаться от десяти миллионов рублей и варьироваться в зависимости от мощности и технических характеристик. Важно отметить, что помимо стоимости ветрогенераторов, также необходимо учитывать затраты на их установку, инфраструктуру, обслуживание и поддержание в рабочем состоянии.

Прогнозирование энергетической производительности ветряных установок, включая как горизонтальные, так и вертикальные ветроэнергетические системы, является важным аспектом обеспечения эффективной генерации возобновляемой энергии. Оно основано на сложных моделях и анализе множества факторов, влияющих на производство электроэнергии.

В современных системах прогнозирования используются данные о скорости и направлении ветра, температуре, атмосферном давлении и других метеорологических параметрах [5]. С помощью алгоритмов и моделей, таких как модели регрессии и нейронные сети, можно предсказать, какие будут скорости ветра и какое количество энергии будет генерироваться в будущем.

Согласно исследованию Национального агентства по альтернативной энергии (NREL), точность прогнозов энергетической производительности ветровых электрогенераторов может достигать более 90 % на короткие временные интервалы (несколько часов вперед). Эффективное прогнозирование позволяет операторам электросетей адаптировать баланс между производством и потреблением энергии, что способствует более надежной и стабильной работе энергосистем. Прогнозирование также помогает улучшить планирование обслуживания и ремонтных работ ветряных установок, что снижает простои и повышает эффективность. Точность прогнозов может увеличиваться с увеличением объема и качества данных, используемых для моделирования.

Современные тенденции в дизайне и производстве ветрогенераторов, включая развитие вертикальных ветроэнергетических систем и совершенствование методов прогнозирования, направлены на улучшение эффективности, устойчивости и применимости в различных условиях. Дальнейшие исследования в этой области будут способствовать развитию возобновляемой ветровой энергетики и содействовать достижению глобальных целей по снижению выбросов углерода.

### **Библиографический список**

1. Global Wind Report 2022. URL: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/> (accessed 20.08.2023).
2. Development of Mixed Vertical Axis Wind Turbine (MVAWT) for Low Wind Condition. URL: [www.scientific.net/AMM.660.811](http://www.scientific.net/AMM.660.811) (accessed 20.08.2023).
3. Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения. URL: <https://ekopower.ru/vetrogeneratoryi-s-vertikalnoy-osyu-vrashheniya-rossiyskogo-proizvodstva/?ysclid=llqxzj4t92231352022> (accessed 20.08.2023).
4. Niranjana S. J. Power Generation by Vertical Axis Wind Turbine // International Journal of Emerging Research in Management & Technology. 2015. Jul. URL: [https://www.researchgate.net/publication/341113784\\_Power\\_Generation\\_by\\_Vertical\\_Axis\\_Wind\\_Turbine](https://www.researchgate.net/publication/341113784_Power_Generation_by_Vertical_Axis_Wind_Turbine) (accessed 21.08.2023).
5. Зубакин В. Краткосрочное прогнозирование выработки ветровой электростанции // ЭП. 2022. № 8 (174). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kratkosrochnoe-prognozirovanie-vyrobotki-vetrovoy-elektrostantsii> (дата обращения: 21.08.2023).

## **Транзит, накопители и управление спросом в условиях высокой доли возобновляемых источников энергии**

Бобрик Петр Петрович<sup>а</sup>, канд. физ-мат. наук

Смирнов Роман Сергеевич<sup>б</sup>

ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН<sup>а</sup>

АО «Россети-Цифра»<sup>б</sup>, Москва

**Аннотация.** В статье исследуется, как может быть устроен рынок ЭЭ в системах с высокой долей ВИЭ и высокими ценами на энергию. В качестве одного из решений предлагается введение негарантирующих тарифов.

**Ключевые слова:** управление спросом, негарантирующие тарифы.

**Введение.** В настоящее время наметились две тенденции. Во-первых, это общее истощение нефти, и, как следствие, значительный рост стоимости энергоносителей. Во-вторых, быстрый рост доли солнечной и ветряной генерации, которые являются прерывистыми (intermittent) и не поддающейся диспетчеризации (non-dispatchable) по своему типу, т. е. порой недоступными тогда, когда на электроэнергию возникает спрос [1]. В результате для некоторых систем стали возникать угрозы нехватки ЭЭ в отдельные моменты времени. Есть примеры и крупных сетей. Так прошедшей зимой в Великобритании в числе реально возможных рассматривался вариант нехватки генерации в течении нескольких дней именно по причине высокой доли ветра в общей генерации. Для России эти проблемы пока не очень остры.

**Возможные ответы на рост цен и доли ВИЭ.** Реакция на рост цен и доли ВИЭ привела к следующим тенденциям в электрических сетях.

1. Увеличение транзита ЭЭ на постоянном токе, рост размера и усложнение сетей. Так потери ЭЭ на тысячу километров при этом не превышают процента. Но подобные системы относительно дороги и пока не получили большого распространения. Увеличение связности сети приводит к росту отказоустойчивости предложения ЭЭ от СЭС и ВЭС.

2. Увеличение числа накопителей – химических батарей, механических систем, водорода, тепла и т. д. Однако после накопителя стоимость ЭЭ возрастает в несколько раз. Так ГАЭС дает цифру около пяти раз [2]. Другие накопители (химические батареи, механические, водород, тепло и т. д.) еще больше

Понятно, что в случае массового использования подобных систем стоимость энергии для промышленности общества в целом станет неприемлемо дорогой, что повлечет за собой шок экономики и тектонические сдвиги по всей цепочке.

3. Управляемый спрос. (demand response, DR). В периоды пикового спроса и соответственно наиболее высоких цен потребителям дают различные льготы в обмен на снижение нагрузки. Хотя примеров успешного применения таких схем уже накоплено немало, но пока их доля в общем балансе по-прежнему остается невысокой – не более нескольких процентов. Но по мере роста цен на нефть его значение должно расти.

**Негарантирующие тарифы.** Ограничение спроса в пиковые моменты времени для систем со значительной долей ВИЭ является необходимым условием их функционирования. Увеличение мощностей накопителей и рост связности сети могут сделать отказы лишь более редкими и слабыми, но никак не исключить их полностью. Если, конечно, не предполагать их бесконечными. Электричество по требованию клиентов может отпускаться только такое количество, которое может быть произведено гарантированно, без учета СЭС и ВЭС.

Остальная ЭЭ должна отпускаться по тарифам, которые не гарантируют поставки в отдельные моменты времени [3]. Среди возможных вариантов можно предложить ночной, внепиковый, зимний, почасовой и другие варианты. Оператор системы имеет право ограничивать спрос в зависимости от общей ситуации в сети самостоятельно, без согласования с подписантом этого тарифа. В этом заключается принципиальное отличие. Все существующие кейсы программ управляемого спроса предполагают добровольность участия в них потребителей. Необходимость обуславливается требованием оперативности реагирования оператора на изменения в спросе – предложения в течение нескольких минут. Т.е. работоспособность системы ставится в приоритет запросам клиентов. В настоящее время такие правила разработаны только для аварийных случаев.

Цена ЭЭ по негарантирующим тарифам будет дешевле. Логичным видятся пакеты, где будет наблюдаться комбинация небольшой мощности поставки без ограничений, а остальное по негарантирующим тарифам.

**Заключение.** В настоящее время общепринятой является практика, что как только возникает дополнительный платежеспособный спрос, то сразу ставится вопрос о строительстве новых генераторов для его удовлетворения. Однако, рост мощностей за счет числа СЭС и ВЭС не приводит к нужному результату. А дублирование этих мощностей обычными генераторами становится обременительно дорогим. По экономическим соображениям становится целесообразным эксплуатировать системы, где не гарантируется обеспечение ЭЭ в полном объеме в любой момент времени. Для устойчивого функционирования таких систем значительная доля ЭЭ должна реализовываться потребителям по негарантирующим тарифам.

### **Библиографический список**

1. Твайделл Дж., Уэйер А. Возобновляемые источники энергии. М. : Энергоатомиздат, 1990.
2. Нормированная стоимость хранения энергии для твердотельной аккумулирующей электростанции оказалась ниже, чем для ГАЭС и литий-иона. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/05/18/113951> (11/06/2023)
3. Бобрик П. П., Смирнов Р. С. Электрические тарифы в системах с большой долей прерывистых источников энергии // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2022 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2022 года. СПб. : ИИТ РАН, 2022. С. 299–303.

## Проблемы ВИЭ в рамках Четвёртого Энергетического Перехода и новые реалии Эпохи Глобальных Кризисов

Клюев Роман Владимирович<sup>a</sup>, д-р техн. наук, профессор  
Силаев Вадим Иванович<sup>b</sup>, магистрант  
Северо-Кавказский горно-металлургический институт<sup>a, b</sup>, Владикавказ

**Аннотация.** Современная энергетика является основой выживания любого государства. Без развитой энергетической инфраструктуры невозможно представить функционирование гипериндустриальной экономики и всего общества. Однако энергетика в последние десятилетия столкнулась с очень важной проблемой – глобальными изменениями климата. Но вместо развития атомной энергетики и создания на её основе нового энергетического уклада в так называемых «развитых» странах Запада были проведены реформы в 2009–2010 гг., которые сделали ставку на политизацию, догматизацию энергетической сферы и навязывание своей воли другим странам мира. В 2023 г. весь мир испытывает системный упадок, вызванный энергетическим кризисом, который начался в III квартале 2021 г., и основным источником всех бед «развитых» стран являются ВИЭ.

**Ключевые слова:** эпоха глобальных кризисов, энергетический кризис, четвёртый энергетический переход, ВИЭ, ТЭК.

Основой любой современной гипериндустриальной (постиндустриальной) экономики является – энергетика. Именно от её развития зависит не только благополучие граждан, но и выживаемость всей нашей цивилизации [1]. Тотальная зависимость от доступной энергии ощущается, как никогда остро в 2023 году. Глобальные изменения климата, рецессия мировой экономики, деглобализация мира, глобальный энергетический, социальный, политический, инфляционный и продовольственный кризисы – наша новая суровая реальность Эпохи Глобальных Кризисов [2]. Все эти проблемы были предсказаны экспертным сообществом ещё в 2009–2010 гг., когда только набирала обороты «зелёная повестка» в так называемых «развитых» странах мира, которая вопреки здравому смыслу, экономической целесообразности и энергетической безопасности провозгласили, что Четвёртый Энергетический Переход будет основан сугубо на использовании Возобновляемых Источников Энергии (ВИЭ).

Ставка на ВИЭ подразумевало отказ от угольной и атомной генерации, которые согласно догматизации «зелёной повестки» являются основными источниками выбросов парниковых газов и их замещение на прерывистую, дорогую и неэффективную солнечную и ветровую генерацию. Но для покрытия выпадающих мощностей и стабилизации генерациинеобходим был относи-

тельно недорогой энергоноситель, которым стал газ [1, 3]. Именно его использование позволяло европейским государствам проводить эксперименты над собственной экономикой и энергетической сферой, сохраняя конкурентоспособность.

Первые отголоски текущего гиперкризиса были ещё заметны в 2019 году, когда все физические индикаторы показали сокращение физической экономики. Это было ещё до пандемии COVID-19, на которую списали все «грехи» своей политики западные политики. Именно отсюда можно брать отсчёт начала Эпохи Глобальных Кризисов. Вопреки заявлениям лидеров Европы, США и Японии энергетический кризис начался не 24 февраля 2022 года, когда Россия объявила о начале проведения «Специальной Военной Операции» на территории бывшей Украины, а в III квартале 2021 года [4, 5]. Об этом говорит статистика цен на газ, которая представлена на рисунке 1 и рисунке 2. Именно этот энергоноситель играет ключевую роль в энергетической безопасности Европы.

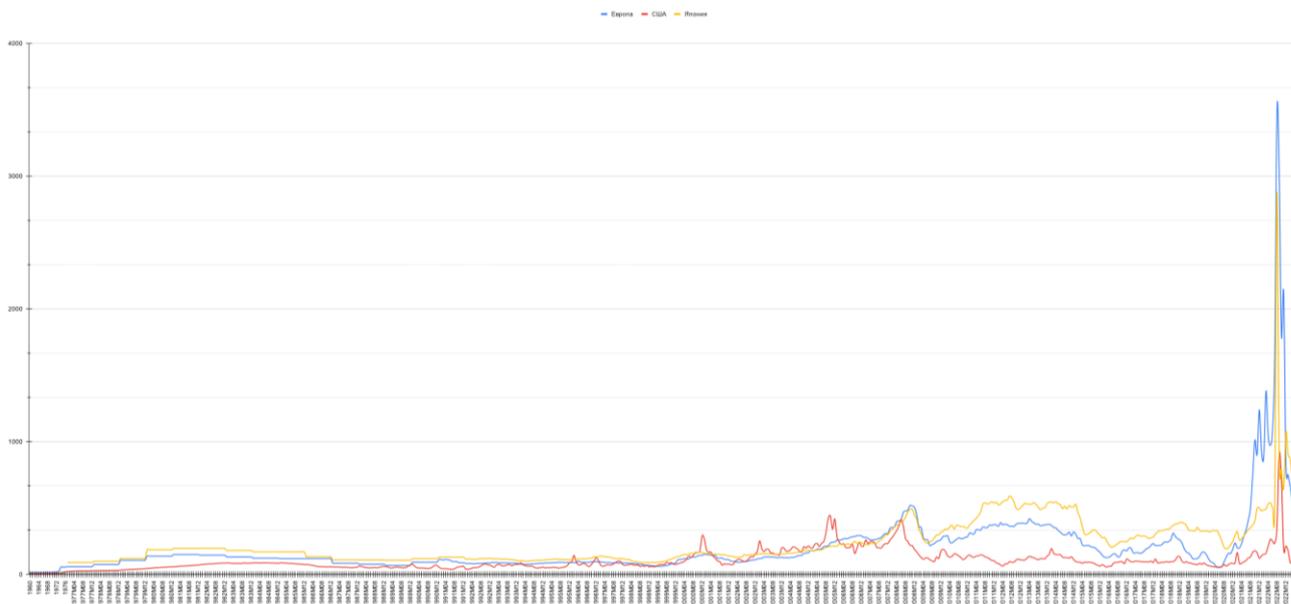


Рисунок 1. Цена за 1000 м<sup>3</sup> в долларах для Европы, США и Японии по месяцам с 1960 по 2023 г.

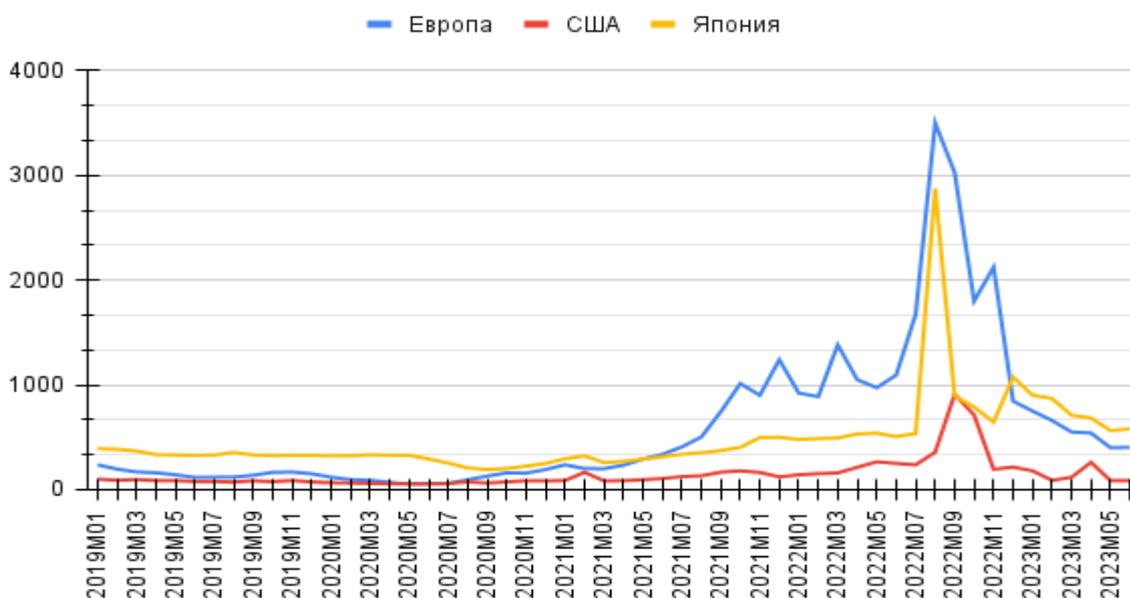


Рисунок 2. Цена за 1000 м³ в долларах для Европы, США и Японии по месяцам с 2019 по 2023 г.

После начала глобального энергетического кризиса для Европейского Союза наступило тяжёлое время, т. к. энергоёмкие производства не могут существовать при высоких ценах на электроэнергию, которая возникла из-за колоссального роста цен на газ. Потребление газа в Европе за 2022 год упало в среднем на 20 %, а в таких странах, как Германия на 13,6 %, Эстония на 18 %, Литва на 35 %, Латвия на 55 %. В Европе летом 2022 и летом 2023 года наблюдаются температурные аномалии, которые приводят к высоким температурам и снижению эффективности работы СЭС и ВЭС. При температуре выше 25 °С КПД СЭС падает на 50 % и при этом наблюдается штиль, который практически приводит к полной остановке генерации на ВЭС [2, 5, 6].

Попытки европейских политиков манипулировать данными о том, что они намеренно сокращают потребление газа выше запланированных показателей в 15 % и что европейские газовые хранилища заполнены газом на 90 % не отменяют того факта, что в Европейском Союзе наблюдается деиндустриализация [7]. Об этом говорят данные, что в «локомотиве Европы» Германии за 6 месяцев 2023 года обанкротилось свыше 50600 предприятий, что больше на 12 %, чем за весь 2022 год. Но более наглядно об этом говорят данные по промышленному производству на июль 2023 года, которые представлены на рисунке 3.

Индустриальное производство на июль 2023 года					
	В % от 2022	6 мес. среднее	В % от 2019	В % от 2007	В % от 2000
Мир в целом	100,95%	100,65%	105,20%	135,34%	167,67%
«Развитые страны»	99,37%	99,16%	100,01%	104,12%	117,00%
Китай	104,40%	103,61%	123,11%	346,69%	926,83%
Россия	106,50%	102,57%	107,77%	133,39%	199,98%
Индия	105,22%	104,73%	107,09%	176,95%	301,87%
США	99,57%	100,44%	99,76%	101,36%	111,18%
Германия	101,37%	100,46%	93,76%	97,62%	116,33%
Италия	96,42%	97,51%	96,06%	80,30%	81,16%
Франция	102,67%	100,74%	94,08%	87,05%	90,32%
Великобритания	97,74%	97,66%	105,15%	104,14%	111,63%
Япония	102,48%	99,38%	89,90%	81,60%	88,45%
Польша	99,00%	98,33%	123,29%	196,55%	315,84%

Рисунок 3. Индустриальное производство на июль 2023 г.

Кроме этого, на текущий момент физические объемы мировой торговли сокращаются 6 из 7 последних месяцев (в 2001 году – 9 месяцев, в 2008–2009 гг. – 14 месяцев, в 2020 году – 10 месяцев). Падение на июль 2023 года составило 2,42 %. Если же рассматривать торговлю в денежном эквиваленте, то сокращение составило 4,75 % (что происходит уже 4 месяца подряд). ВИЭ не смотря на постоянный рост своей установленной мощности в структуре генерации «развитых» стран, показывают крайне низкий КИУМ [1,4,6]. А угроза исчезновения течения Гольфстрим, может привести к масштабной катастрофе из-за глобальных изменений климата. И поэтому западные страны в 2022 году признали атомную и газовую генерацию «зелёной», что является попыткой переломить уже наметившиеся тенденции в энергетике и экономики. Однако время было упущено, устаревание инфраструктуры, хроническое недофинансирование традиционной энергетике, рост инфляции и миграция производств в США и Китай, оставляют Европе всё меньше ресурсов для поддержания приемлемого уровня жизни, что приводит к ещё одной проблеме – кризису жизни [4, 6]. И в этом сыграло не малую роль ставка на ВИЭ, вместо развития атомной генерации, которая могла бы поднять экономику Европы, США и Японии. В США не смотря приток европейской промышленности, наблюдается рецессия, а в Японии она уже приобретает статус «потерянного сорокалетия». И без развития атомной генерации, которая может нивелировать недостатки ВИЭ, преодолеть гиперкризис невозможно [1,6].

## Библиографический список

1. Ключев Р. В., Гаврина О. А., Силаев В. И. Климатическое влияние на энергетику Европейского союза на примере Германии вследствие провальных энергетических реформ в 2009–2010 г. и катастрофическое положение энергетики Европы в эпоху глобальных кризисов // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2022. № 2(68). С. 14–25. DOI: 10.53015/18159958\_2022\_18\_2\_14. EDN EMVCUF.
2. Силаев В. И., Ключев Р. В. ВИЭ в эпоху Глобальных Кризисов // Геоэнергетика-2022 : коллективная монография по материалам V Междунар. науч.-практ. конф. / науч. ред. С. В. Алексеенко, М. Ш. Минцаев, И. А. Керимов. Грозный : Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова, 2022. С. 406–413. DOI: 10.34708/GSTOU.2022.81.62.055. EDN YWGSEW.
3. Силаев В. И., Наниева Б. М. Перспективы энергетики в Эпоху Глобальных Кризисов // Энергостарт : материалы III Всерос. молодежной науч.-практ. конф., посвящ. актуальным вопросам развития топливно-энергетического комплекса, Кемерово, 12–14 ноября 2020 года. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2021. С. 230-1-230-5. EDN AZYNPC.
4. Силаев В. И., Лолаева Д. Т. Россия и Евразия: переход от однополярного мира к многополярному // Kant. 2023. № 1(46). С. 207–211. DOI: 10.24923/2222-243X.2023-46.37. EDN ZPFVHZ.
5. Силаев В. И., Ключев Р. В. Проблематика использования «зелёной энергетики» в Российской Федерации и в мире в Эпоху Глобальных Кризисов // Энергетика будущего – цифровая трансформация : сб. тр. III Всерос. науч.-практ. конф., Липецк, 14–15 декабря 2022 года. Липецк : Липецкий государственный технический университет, 2022. С. 243–247. EDN WJSZKR.
6. Силаев В. И., Гаврина О. А., Голоев Д. Т. Распределенная энергетика труднодоступных территорий на основе плавающих атомных энергоблоков // Электроэнергетика глазами молодежи : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Нижний Новгород, 16–19 сентября 2022 года. Ч. II. Н. Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2022. С. 162–165. EDN INCMOI.
7. Силаев В. И. Энергетический кризис – драйвер развития атомной и «зелёной» энергетики и «Ренессанс» угольной генерации в мире // Потенциал и вызовы развития возобновляемой энергетики : сб. науч. ст. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Невинномысск, 19–23 декабря 2022 года. Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2023. С. 46–57. EDN LPJOVR.

## Анализ влияния нетрадиционных источников энергии на производство электроэнергии в энергосистеме

Попов Максим Георгиевич<sup>a</sup>, д-р техн. наук, профессор  
Вильнер Александр Викторович<sup>b</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ЭЭС  
Плешкова Татьяна Алексеевна<sup>c</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Зыков Владислав Евгеньевич<sup>d</sup>, аспирант  
Вятский государственный университет<sup>a, b, c, d</sup>, Киров

**Аннотация.** Доклад содержит анализ статистических данных выработки электроэнергии и изменения состава установленной мощности энергосистем Великобритании и Японии с выявлением влияния нетрадиционных источников энергии на использование электростанциями их установленной мощности.

**Ключевые слова:** нетрадиционные источники энергии, экономическая эффективность, число часов использования установленной мощности.

В современном мире нетрадиционные источники энергии активно развиваются и внедряются в различных энергосистемах. В последние годы даже продвигается концепция замещения традиционных источников энергии, работающих за счет сжигания органического топлива, нетрадиционными возобновляемыми источниками энергии, которые считаются более экологически безопасными.

Ветряные, солнечные, приливные электростанции и другие нетрадиционные источники электроэнергии сейчас позиционируются как перспективное решение многих экономических, энергетических и экологических проблем. В такой ситуации оказывается важным изучение влияния таких источников энергии на крупные энергосистемы государственного масштаба при внедрении в них электростанций, основанных на нетрадиционных источниках энергии.

Пользуясь статистическими данными [1, 2], можно проанализировать распределение производства электрической энергии между различными источниками, а также состав установленной мощности, в энергосистемах Великобритании и Японии в период с 2005 по 2020 гг. Энергосистемы этих государств в указанный период существенно нарастили установленную мощность солнечных и ветряных электростанций.

Для традиционных и нетрадиционных источников можно определить годовое время использования установленной мощности  $T_{\text{уст.год}}$  [3, с. 314], ч:

$$T_{\text{уст.год}} = \frac{W_{\text{ЭС год}}}{P_{\text{ЭС год}}},$$

где  $W_{\text{ЭС год}}$  – фактическое кол-во электроэнергии, выработанной на электростанциях,

$P_{\text{ЭС год}}$  – суммарная установленная мощность.

Этот показатель применяется для оценки технико-экономической эффективности работы электростанций, с его помощью можно косвенно оценить изменения эффективности энергосистемы при постепенном внедрении нетрадиционных источников энергии. Гидроэлектростанции и атомные электростанции в данном случае отнесены к традиционным источникам энергии.

Рассчитанные показатели  $T_{\text{уст.год}}$  сведены в таблицу 1.

Отправной точкой служит 2005 г с показателями  $T_{\text{уст.год}} = 4835,6$  ч. для Великобритании и  $T_{\text{уст.год}} = 3990$  ч. для Японии. Относительно этого уровня оценивается изменение  $T_{\text{уст.год}}$  при внедрении нетрадиционных источников. Следует отметить, что нетрадиционные источники показывают относительно низкое  $T_{\text{уст.год}}$ : ~1000–2350ч, в зависимости от состава источников энергии (см. табл. 1).

По данным расчетов построены графики изменения  $T_{\text{уст.год}}$  с течением времени, графики приведены на рисунках 1 и 2.

Таблица 1

**Годовое число часов использования установленной мощности  
для энергосистем Великобритании и Японии**

	Доля нетрадиционных источников в составе установленной мощности	Годовое число часов использования установленной мощности, ч				
		Общее	Традиционные источники	Нетрадиционные источники	СЭС	ВЭС
<b>Великобритания</b>						
2005	1,91 %	4835,6	4894,0	1846,5	727,3	1855,6
2012	11,24 %	3792,2	4023,6	1964,9	772,4	2197,9
2017	31,34 %	3271,5	3902,9	1888,0	897,9	2534,6
2018	32,57 %	3128,1	3669,9	2006,2	970,1	2633,9
2019	36,08 %	3146,8	3761,6	2057,4	951,3	2671,3
2020	37,46 %	3070,6	3513,0	2331,8	977,4	3078,2
<b>Япония</b>						
2005	1,15 %	3990,0	3937,6	2009,1	998,6	1427,1

	Доля нетрадиционных источников в составе установленной мощности	Годовое число часов использования установленной мощности, ч				
		Общее	Традиционные источники	Нетрадиционные источники	СЭС	ВЭС
2012	3,27 %	3703,4	3706,9	1448,6	997,1	1888,4
2017	16,35 %	3158,7	3480,3	1144,0	1112,5	1863,3
2018	17,99 %	3077,3	3430,1	1163,8	1115,8	2138,7
2019	20,19 %	3003,5	3406,3	1141,6	1097,9	1928,1
2020	22,28 %	2877,8	3310,0	1155,5	1100,4	2177,7

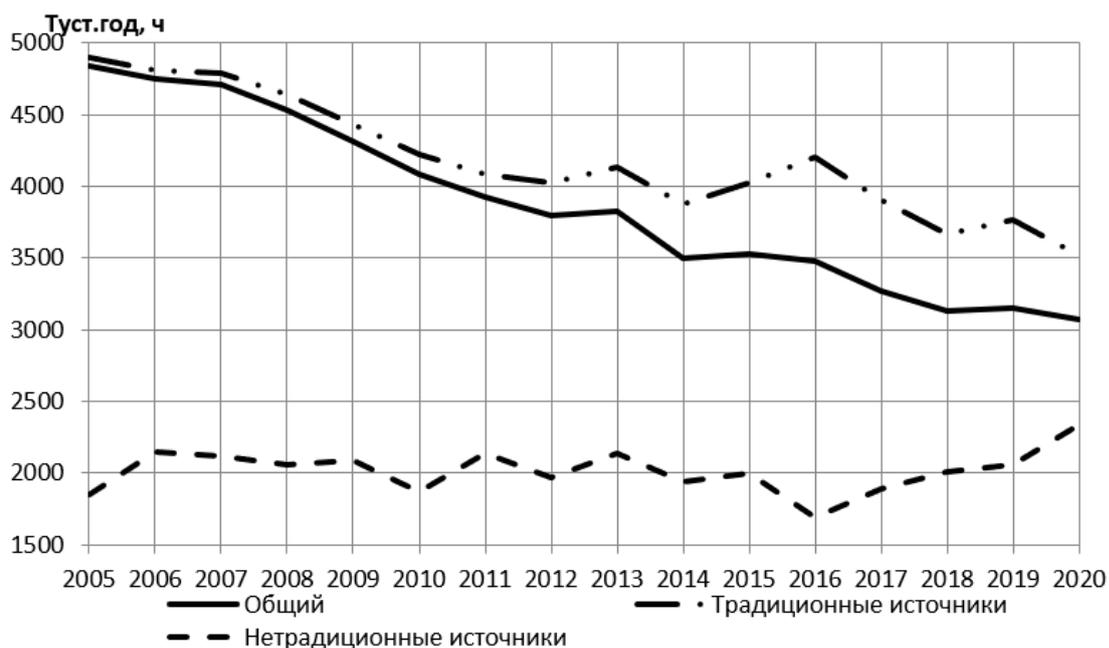


Рисунок 1. Изменения времени использования установленной мощности для энергосистемы Великобритании

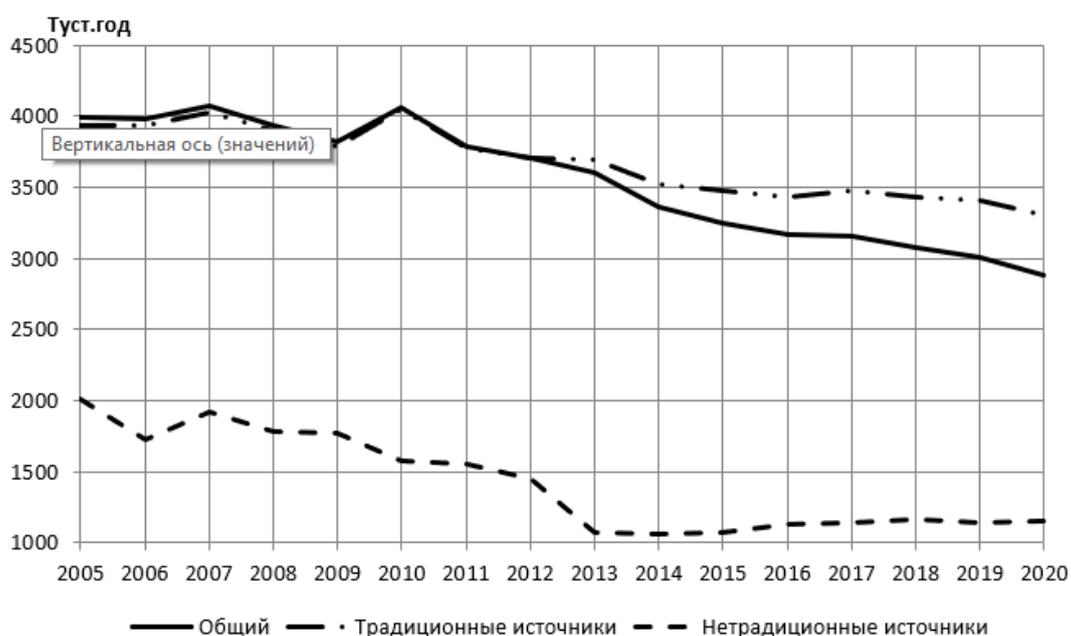


Рисунок 2. Изменения времени использования установленной мощности для энергосистемы Японии.

По данным построенных графиков и таблицы 1 можно заключить, что с увеличением установленной мощности нетрадиционных источников в системе наблюдается постепенное снижение  $T_{уст.год}$ . Важно отметить, что этот эффект затрагивает и традиционные электростанции. Нетрадиционные станции принимают на себя часть нагрузки энергосистемы, при этом обладая относительно низким  $T_{уст.год}$ , т. е. пониженной экономической эффективностью. Учитывая преимущества в области экологичности, это можно считать положительным фактором. Однако снижение  $T_{уст.год}$  традиционных станций говорит о том, что перенос нагрузки на нетрадиционные источники не сопровождается соответствующим снижением установленной мощности традиционных станций. Выработка энергии на нетрадиционных станциях зависит от внешних условий, что требует дополнительных затрат на быстродействующую систему противоаварийного управления мощностью агрегатов для обеспечения надежности энергоснабжения. Совокупно эти факторы приводят к снижению экономической эффективности традиционных станций в составе системы и энергосистемы в целом.

### **Библиографический список**

1. Тепловые электрические станции : учеб. для вузов / В. Д. Буров, Е. В. Дорохов, Д. П. Елизаров и др. ; под ред. В. М. Лавыгина, А. С. Седлова, С. В. Цанева. 3-е изд., стереотип. М. : Изд. дом МЭИ, 2009. 466 с.: ил.
2. EESEAEC. Мировая энергетика – Энергетический профиль Великобритании. URL: <https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-velikobritanii> (дата обращения: 14.08.2023).
3. EESEAEC. Мировая энергетика – Энергетический профиль Японии. URL: <https://www.eeseaec.org/energeticeskij-profil-aponii> (дата обращения: 14.08.2023)

# ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

## Применение VR-технологий в учебном процессе при подготовке студентов-энергетиков на примере лабораторной работы по оперативным переключениям на подстанции 110/10 кВ

Басманов Владислав Геннадьевич<sup>a</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой  
Жаворонков Максим Александрович<sup>b</sup>, студент группы ЭиЭб-4803-03-00  
Вятский государственный университет<sup>a, b</sup>, Киров

**Аннотация.** В данной работе рассмотрена возможность применения VR-технологий в рамках обучающего процесса на примере лабораторной работы по оперативным переключениям на подстанции 110/10 кВ. Цель статьи – разработка виртуальной лабораторной работы, повышающей эффективность получения навыков практической работы с высоковольтным электрооборудованием. Основным достоинством применения VR-технологий является безопасное проведение обучения студентов работе в действующих электроустановках. Кроме того, виртуальная реальность позволяет получить практические навыки работы с электрооборудованием в условиях близких к реальным.

**Ключевые слова:** VR-технологии, оперативные переключения, трансформаторная подстанция.

**Введение.** Для качественной подготовки специалистов энергетиков необходимо больше практических навыков работы с электрооборудованием, но из-за ограничений, связанных с необходимостью соблюдения правил по электробезопасности, в т. ч. отсутствие у большинства студентов группы по электробезопасности, необходимой для допуска к выполнению работ в электроустановках. Решить данную проблему можно с применением VR-технологий. Virtual Reality (VR) – созданный техническими средствами мир, передаваемый человеку через его ощущения: зрение, слух, осязание и другие. Виртуальная реальность имитирует как воздействие, так и реакции на воздействие. Для создания убедительного комплекса ощущений реальности компьютерный синтез свойств и реакций виртуальной реальности производится в реальном времени [1].

Объекты виртуальной реальности обычно ведут себя близко к поведению аналогичных объектов материальной реальности. Пользователь может воздействовать на эти объекты в согласии с реальными законами физики (гравитация, свойства воды, столкновение с предметами, отражение и т. п.) [1].

**Ведущий подход.** Существованием этой технологии мы обязаны устройству человеческих глаз. Благодаря бинокулярному зрению (*зрение, в котором используются два глаза*), мы можем различать не только цвета, но и глубину – так мы определяем расстояние до объектов и поэтому не врезаемся в препятствия. VR-шлемы оснащены двумя мониторами (*или одним, который разделён на две части*). Каждый из этих мониторов показывает отдельные изображения для каждого глаза. А чтобы правильно сфокусировать взгляд, используются линзы. Контроллеры помогают управлять игрой или приложением, а камеры служат дополнительным источником ввода (считывают движения игрока) и средством безопасности: вы можете отметить границы, за которые нельзя выходить, а камеры будут предупреждать вас, когда вы будете возле этих границ [1]. В данной работе используется виртуальное моделирование реальных ситуаций, возникающих при работе в действующих электроустановках на примере оперативных переключений на подстанции 110/10 кВ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать VR модель подстанции 110/10 кВ;
- произвести апробацию полученной VR модели;
- внести корректировки по результатам апробации.

**Результаты исследования.** В данной лабораторной работе с применением VR-технологий используется схема четырёхугольник с двумя параллельно работающими трансформаторами. Эта схема подстанции 110/10 кВ показана на рисунке 1, данная схема взята из [2].

С использованием данной схемы была разработана VR модель подстанции 110/10 кВ, которая по результатам многократных апробаций, претерпела существенные доработки. По итогам этих доработок была получена VR модель, работа в которой описана далее.

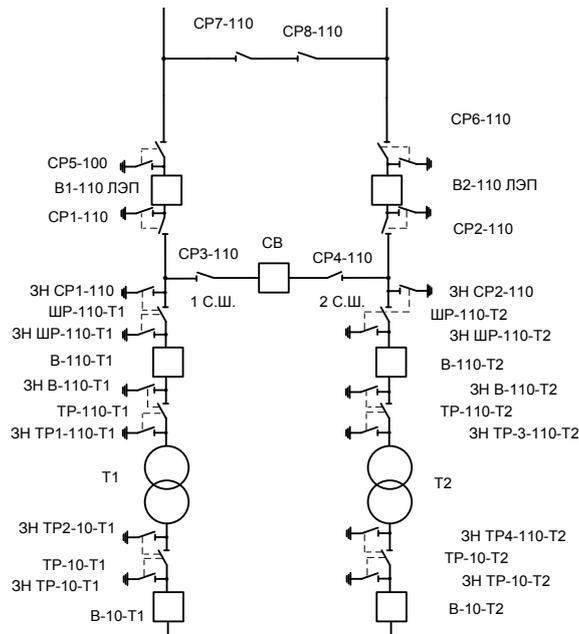


Рисунок 1. Схема подстанции 110/10 кВ

Для проведения оперативных переключений необходимо использовать стандартный бланк переключений [3, 4], пример такого бланка, предоставленный с реального объекта, показан на рисунке 2. Этот бланк взят за основу в лабораторной работе.

Утверждаю:

«    »    20    г.

Форма ЭУ-54 [ЭЭБ1818]  
Утверждена ОАО «РЖД» в 2004г.

Предприятие  
Цех

**РАЗОВЫЙ БЛАНК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ № 7**

Наименование электроустановки ПС Мухомолово ОРУ 110 кВ  
(подстанция, распределительное устройство, линия)

«    »    20    г. начало    час.    мин.  
конец    час.    мин.

Задание на переключение: **Вывести в ремонт Т1**

1. Вывести АПВ В-1-110, СВ-110
2. Отключить В-10-Т1
3. Проверить отключенное положение В-10-Т1
4. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Не включать, работают люди»
5. Отключить В-110-Т1
6. Проверить отключенное положение В-110-Т1
7. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Не включать, работают люди»
8. Снять предохранители в цепях управления В-10-Т1 на панели РУ-10кВ в шитовой
9. Снять предохранители в цепях управления В-110-Т1 на панели управления Т1,2 в шитовой
10. Проверить состояние опорной изоляции ШР-110-Т1
11. Отключить ШР-110-Т1
12. Проверить отключенное положение ШР-110-Т1
13. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Не включать, работают люди»
14. Проверить состояние опорной изоляции TP-10-Т1
15. Отключить TP-10-Т1
16. Проверить отключенное положение TP-10-Т1
17. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Не включать, работают люди»
18. Проверить состояние опорной изоляции ЗОН Т-1
19. Отключить ЗОН Т-1
20. Проверить отключенное положение ЗОН Т-1
21. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Не включать, работают люди»
22. Проверить отсутствие напряжения на ШР-110-Т1 в сторону Т1
23. Включить 3Н ШР-110-Т1 в сторону Т1
24. Проверить включенное положение 3Н ШР-110-Т1 в сторону Т1
25. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Заземлено»
26. Отключить TP1-110-Т1
27. Включить 3Н TP1-110-Т1 в сторону Т1
28. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Заземлено»
29. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Не включать, работают люди»
30. Проверить отсутствие напряжения на TP-10-Т1 в сторону Т1
31. Включить 3Н TP-10-Т1 в сторону Т1
32. Проверить включенное положение 3Н TP-10-Т1 в сторону Т1
33. Вывесить плакаты согласно ПТБ «Заземлено»
34. Оградить канатом рабочее место
35. Вывесить плакаты согласно ПТБ.

Рисунок 2. Бланк переключений

Цель этих переключений – вывод в ремонт трансформатора Т1. Процесс начинается с включения технологии и загрузки локации, активации оборудования. Надев шлем и взяв в руки контроллеры, вы оказываетесь в комнате оперативного персонала, где поступает звонок от диспетчера электросетей, что можно выводить трансформатор в ремонт. До этого согласовывается этот момент с руководством на разрешение проведения этих работ. Далее мы начинаем следовать бланку переключений, для этого смотрим на планшет, на котором указано конкретное задание.

Далее рассмотрим порядок выполнения этих работ.

1. Согласно бланку переключений нужно отключить АПВ В-1-110, СВ-110. Мы перемещаемся при помощи контроллера в небольшое закрытое распределительное устройство, отключаем АПВ при помощи кнопки «Отключить».

2. Следующим этапом нужно отключить В-10-Т1. Модуль управления выключателем расположен в закрытом распределительном устройстве и выключается также при помощи нажатия кнопки «Отключить».

3. Проверить отключенное положение В-10-Т1. Нужно посмотреть на то место, где мы отключали выключатель, соответственно мы убедимся в том, что он отключен, и мы можем дальше продолжать работу.

4. Вывесить запрещающие плакаты «Не включать работают люди». На ручные приводы выключателя вешиваются плакаты, нажатием кнопки на контроллере.

5. Отключить В-110-Т1. Из закрытого распределительного устройства перемещаемся на территорию подстанции, прямо к выключателю. Сбоку на опорной части выключателя расположен блок управления выключателем. Его отключение производим при помощи нажатия кнопки «Отключить».

6. Проверить отключенное положение В-110-Т1. Нужно удостовериться, что выключатель отключен. Для этого нужно посмотреть на кнопки, с которыми только что взаимодействовали.

На рисунке 3 представлен выключатель В-110-Т1, внешний вид которого воспроизведен с помощью VR-технологии.

Далее продолжаем следовать бланку переключений и выполняем оставшиеся пункты. На последних 34 и 35 этапах проведения оперативных переключений мы ограждаем канатом рабочее место и вывешиваем плакаты согласно [3, 4, 5], на этом оперативные переключения заканчиваются.

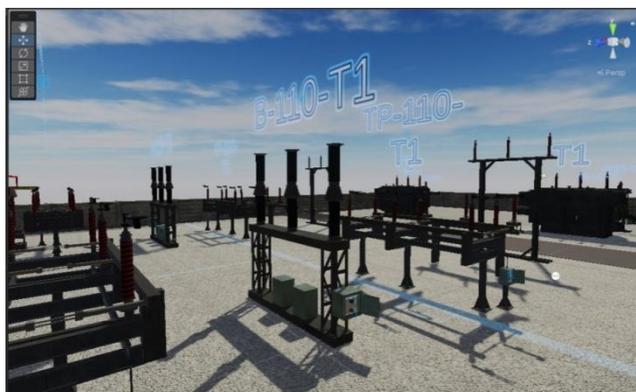


Рисунок 3. Выключатель В-110-Т1

**Выводы.** В работе была разработана VR модель подстанции 110/10 кВ. Проработаны этапы взаимодействия с электрооборудованием, соответствуя бланку оперативных переключений. Таким образом, в результате работы была произведена разработка виртуальной лабораторной работы, которая повышает эффективность получения навыков практической работы с высоковольтным электрооборудованием.

### Библиографический список

1. Что такое VR, какие VR-шлемы бывают и стоит ли их покупать. URL: [https://skil-lbox.ru/media/gamedev/chto\\_takoe\\_vr/](https://skil-lbox.ru/media/gamedev/chto_takoe_vr/) (дата обращения 19.05.2023).
2. Электрооборудование электрических станций и подстанций : учеб. для студ. учреждений сред. проф. образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. 10-е изд., стер. М. : Изд. центр «Академия», 2013. 448 с.
3. Об утверждении Правил переключений в электроустановках : приказ Минэнерго РФ от 13.09.2018 N 757. Редакция от 04.10.2022. Действует с 06.03.2023. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=446030> (дата обращения 19.05.2023).
4. ГОСТ Р 55608-2018. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Переключения в электроустановках. Общие требования: принят 09.10.2018; действ. с 01.03.2019. М., 2018. URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=231689> (дата обращения 19.05.2023).
5. Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок : приказ Минтруда РФ от 15.12.2020 N 903Н. Редакция от 29.04.2022. Действует с 01.09.2022 URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=430799> (дата обращения 19.05.2023).

## Разработка учебного лабораторного комплекса для изучения интеллектуальных электроэнергетических комплексов

Баширов Мусса Гумерович, д-р техн. наук, профессор  
Институт нефтепереработки и нефтехимии  
ФГБОУ ВО УГНТУ, Салават

**Аннотация.** В конце XX – начале XXI века началась модернизация электроэнергетических систем большинства индустриально развитых стран с использованием инновационной организационно-технологической платформы SmartGrid, представляющей собой единый энергоинформационный комплекс с интеллектуальной системой управлением и непрерывным контролем технического состояния и режима работы всех его элементов. По аналогии с концепцией SmartGrid в российской электроэнергетике создается энергосистема с интеллектуальным управлением. Для новой интеллектуальной электроэнергетики России нужны специалисты, которые, кроме электроэнергетической подготовки, имеют знания и навыки эксплуатации и обслуживания сложных технических систем с элементами искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** электроэнергетический комплекс, искусственный интеллект, активно-адаптивная электрическая сеть.

Начало 21 века совпало с началом модернизации энергетических систем большинства индустриально развитых стран с использованием инновационной организационно-технологической платформы SmartGrid, являющейся единым энергоинформационным комплексом с интеллектуальным управлением и непрерывным контролем технического состояния и режима работы всех его элементов. Помимо снижения стоимости производства и передачи электрической энергии и повышения надежности электроснабжения, результатом внедрения новой концепции является снижение технических и коммерческих потерь при транспортировке электроэнергии с 20–10 % до 3 %.

Россия тоже подключилась к этому процессу, изданы распоряжения и постановления правительства, направленные на создание интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. В настоящее время в нескольких регионах страны реализованы пилотные проекты по переходу электроэнергетики на «интеллектуальные сети». Для новой интеллектуальной электроэнергетики России нужны специалисты нового поколения, которые кроме электроэнергетической подготовки имеют знания и навыки эксплуатации и обслуживания сложных технических систем с элементами искусственного интеллекта. Все это требуют качественно нового уровня подготовки работников, переобучения действующих сотрудников, изменения подходов к обучению.

С 2022 года в Уфимском нефтяном техническом университете начата подготовка магистров по интеллектуальным средствам и системам управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов. Согласно учебному плану для реализации данной магистерской программы необходимы учебные лаборатории по спецдисциплинам, оснащенные лабораторными установками с элементами искусственного интеллекта.

В настоящее время отсутствуют учебные лабораторные установки отечественных производителей с элементами искусственного интеллекта, которые могли бы быть использованы для проведения лабораторных работ по группе спецдисциплин магистерской программы. Учитывая это, было решено, что целесообразным является разработка цифровых двойников существующих лабораторных стендов, дополнив их интеллектуальными системами управления на основе нейронных сетей [1, 2]. Планируется дополнение лабораторного комплекса промышленными приборами, оборудованием и их цифровыми двойниками с использованием технологий виртуальной и дополненной реальности. В настоящее время в Республике Башкортостан и ближайших регионах отсутствуют полноценные электроэнергетические комплексы с интеллектуальной системой управления, поэтому создание лабораторного комплекса с интеллектуальными средствами и системами управления, защиты и диагностики электроэнергетических комплексов является единственной возможностью магистрантам первого набора получить необходимые знания, умения и навыки при активном участии в реализации этого проекта, а магистранты следующих наборов получат возможность выполнения полноценных лабораторных работ по спецдисциплинам программы, проходить производственные практики в лабораториях университета.

Функционирование интеллектуальной системы управления рассмотрим например управления потерями в линии электропередачи цифрового двойника лабораторного стенда «Модель электрической системы с узлом комплексной нагрузки» (Рисунок 1, 2).

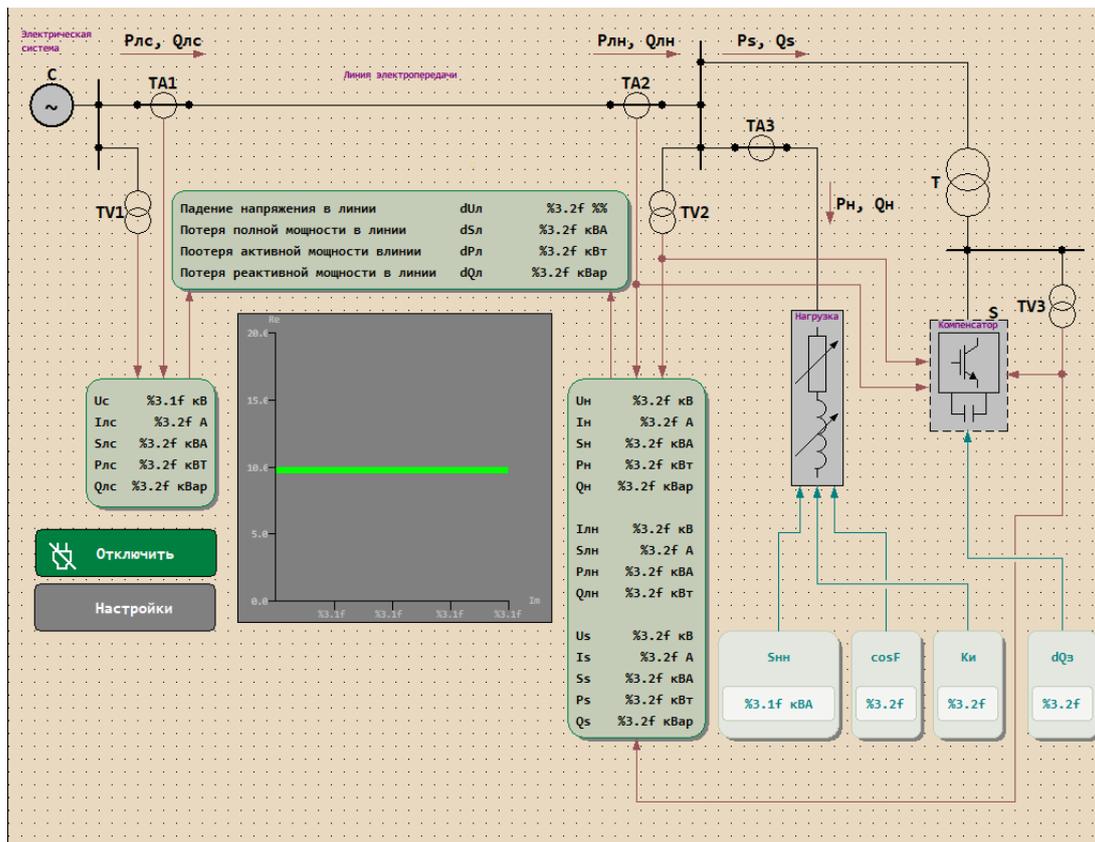


Рисунок 1. Интерфейс цифрового двойника лабораторного стенда «Модель электрической системы с узлом комплексной нагрузки»

По результатам выполнения опытов с использованием физического стенда и его цифрового двойника формируется база данных для обучения искусственной нейронной сети. Регрессионная нейронная сеть обрабатывает входные данные и выдает вероятностные значения параметров элементов продольной и поперечной компенсации, позволяющих оптимизировать потери при текущих значениях параметров комплексной нагрузки. На основании этих значений формируется сигнал в систему управления, которая корректирует параметры элементов компенсации цифрового двойника, тем самым оптимизируя величину потерь.

Работы по созданию лабораторного комплекса ведутся в соответствии с Программой развития Уфимского нефтяного технического университета в рамках реализации программы «Приоритет-2030» с использованием методических разработок по гранту Стипендиальной программы Владимира Потанина для преподавателей магистратуры 2021/2022.

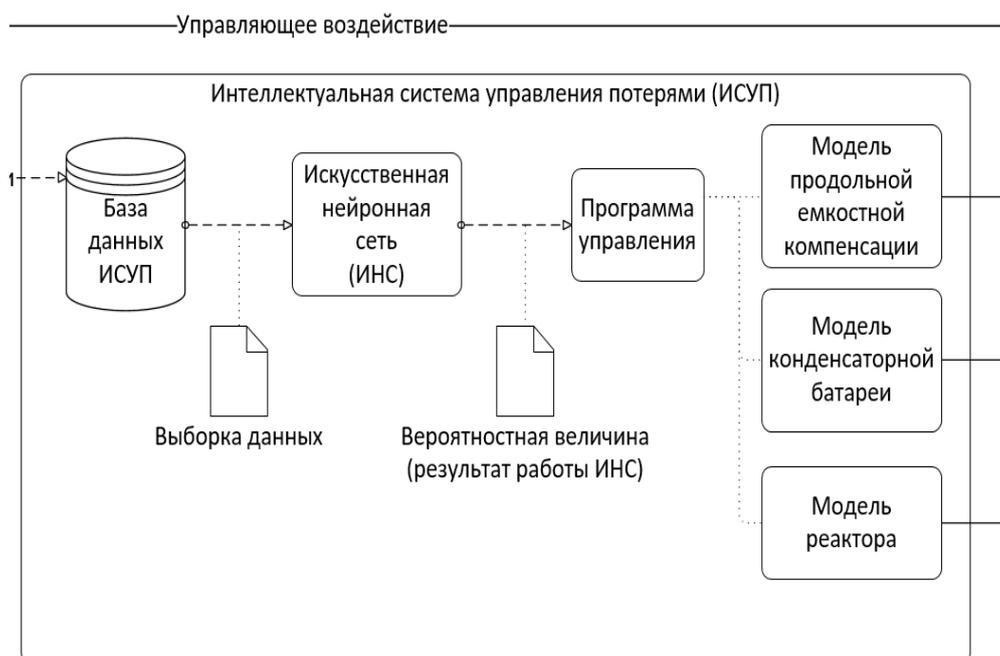


Рисунок 2. Функциональная схема интеллектуальной системы управления потерями в линии электропередачи цифрового двойника лабораторного стенда

### Библиографический список

1. Баширов М. Г., Хафизов А. М., Адельгужин Р. Р. Цифровой двойник лабораторного комплекса с регулятором на основе нечеткой логики // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3 (49). С. 108–113.
2. Баширов М. Г., Ахметшина Э. И., Хакимов А. Ф., Шван М. Ф. Разработка цифрового двойника учебного лабораторного комплекса «Интеллектуальная система энергоснабжения предприятия» // Наука. Технология. Производство – 2023 : материалы Всерос. науч.-техн. конф. Ч. 2 / редкол.: Н. Г. Евдокимова и др. Уфа : УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2023. 385 с.

## Проблемы подготовки кадров в современных условиях в энергетической отрасли

Кузнецов Валерий Александрович<sup>a</sup>, магистрант  
Дерендяева Людмила Витальевна<sup>b</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Вятский государственный университет<sup>a, b</sup>, Киров

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены проблемы подготовки кадров в современных условиях в энергетической отрасли. Проведен опрос выпускников кафедры «Электроснабжение» 2020 выпуска по трудоустройству. Описана статистика опрошенных по качеству образования на ступени бакалавриат. Также были найдены пути решения проблемы подготовки кадров в современных условиях.

**Ключевые слова:** подготовка кадров, электроэнергетика, электроснабжение.

**Введение.** Образование в энергетической сфере имеет особый интерес для экономики в России.

ЕЭС России имеет большой объем опытно-конструкторских, инженерных и научно-исследовательских работ. Поэтому, возникает вопрос о наличии квалифицированного персонала к таким видам работ. Например, по данным ЕЭС России, в 2020 году дефицит кадров в энергетике составлял ~12 %. В 2018 году, по данным интернета, дефицит проектировщиков и монтажников составлял 55 %, а руководителей проектов – 60 % [1].

Возникает проблема персонала: дефицит персонала приводит к дефициту ресурсов, далее – к повышению цен, снижению сроков поставки и, соответственно, к снижению сроков работы, а значит, к срыву сдачи объектов. Решение этой проблемы требует специального внимания высших образовательных учреждений, которые готовят специалистов по энергетике [2].

Целью статьи является исследование проблемы подготовки кадров в энергетической отрасли.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие основные задачи исследования:

- 1) раскрыть теоретический аспект подготовки кадров в современных условиях;
- 2) выявить проблемы подготовки кадров в современных условиях;
- 3) оценить статистику опрошенных выпускников кафедры «Электроснабжение» 2020 выпуска;

4) найти пути решения данной проблемы.

**Методы исследования.** Основной метод исследования – аналитический. Анализ статистики опрошенных выпускников кафедры «Электроснабжения» 2020 выпуска позволит многое сказать о трудоустройстве выпускников в целом. Кадровые составы российских предприятий энергетики свидетельствуют об отсутствии необходимого квалифицированного персонала. Во-первых, причина текущей ситуации заключается в том, что в нашей стране недостаточно специализированных образовательных учреждений, занимающихся подготовкой кадров в области энергетики, а во-вторых, идет отток кадров в другие отрасли промышленности (нефтяную, газовую, оборонную) из-за более высоких заработных плат. Таким образом, многие, кто прошел обучение и даже получил опыт работы на энергетических предприятиях, переходят в эти сферы деятельности. Отметим, что проблема с количеством кадров ухудшается ещё и в качественном компоненте. Следствие дефицита специалистов в сфере энергетики – изменение верхнего возраста претендентов. Если ранее работодатели искали специалистов в возрасте до 40 лет, то сейчас рассматриваются кандидатуры в возрасте до 50 лет [3].

Эксперты прогнозируют, что нехватка молодых специалистов в энергосистеме серьезная, и в дальнейшем эта ситуация будет ухудшаться, поскольку происходит естественное старение кадров. Тех, кто будет поступать на различные специальности электроэнергетики, необходимо убедить, что вакантные места будут всегда актуальны, а при успешной работе их ждет карьерный рост [1].

Поэтому в условиях технологической и технической индустрии потребность в квалифицированных кадрах постоянно растет и будет увеличиваться.

В настоящее время предприятия требуют от кандидатуры высокого уровня интеллекта, креатива, коммуникации, умения быстро находить решение в разных ситуациях. Значит, выпускники должны всему этому быть научены. И здесь важным является самостоятельная работа обучающихся, а точнее, обучение новыми информационными технологиями. Это имеет свою логику: если человек прекращает учиться, он останавливается в развитии и не будет востре-

бован на современном этапе работы. Поэтому требуется на регулярной основе повышать свои квалификационные навыки.

Еще одной значительной проблемой подготовки кадров является недостаточное информирование студентов работодателями.

**Результаты исследований, их обсуждение.** Результаты проведенного опроса среди выпускников кафедры «Электроснабжение» 2020 года выпуска по трудоустройству представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, что ~65 % выпускников устроились работать не по специальности. Кроме того, ~95 % студентов отметили, что во время учебного процесса преобладали лекции, 25 % не готовили собственных презентаций, а 20 % вообще никогда не участвовали в проектной работе в небольших группах. Большинство ответили, что основную информацию давал преподаватель, поэтому самостоятельный поиск информации у студентов мало распространен. Так же, ~85 % студентов отметили, что самостоятельных и серьезных проектов им очень не хватало, а ~90 % никогда не пробовали читать профильную литературу на иностранном языке.

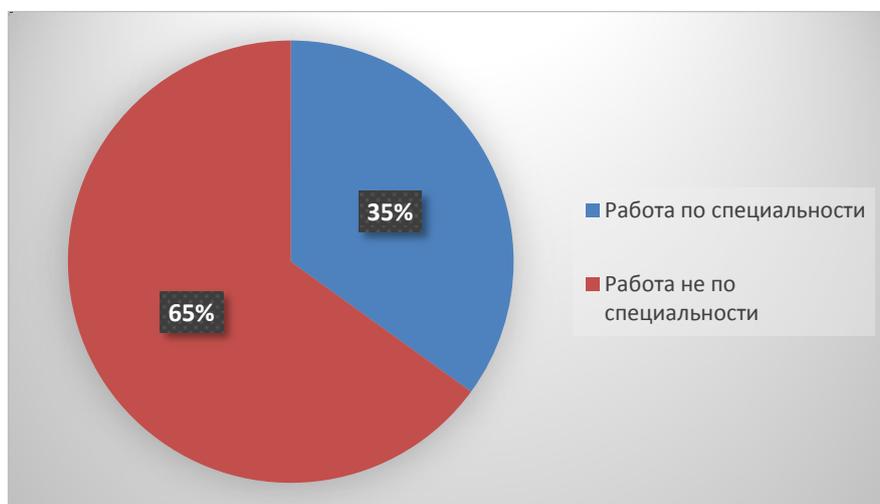


Рисунок 1. Статистика трудоустройства выпускников по выбранной специальности

Поэтому в настоящее время актуальная задача каждого вуза – это создать все условия для реализации качественного образования нового поколения.

**Выводы.** Таким образом, если комплексно работать над проблемой и следовать нижеперечисленным путям решения, то большее количество выпускников предпочтут работать по профессии, а, следовательно, «кадровый голод» в сфере энергетики будет уменьшаться.

Пути решения данной проблемы:

- 1) увеличение специализированных учебных заведений;
- 2) высокая заработная плата в энергетической сфере;
- 3) качественное обучение студентов, дающее нужные навыки и качества для дальнейшей работы. Обязательный упор на самостоятельную и креативную работу;
- 4) ежегодный мониторинг трудоустройства студентов после окончания учебного заведения (при отрицательной динамике – поменять пути решения);
- 5) постоянная модернизация лабораторного оборудования;
- 6) достаточное информирование студентов напрямую от предприятий.

### **Библиографический список**

1. Наволоцкая И. Кадровый голод в энергетике. 2020. URL: <https://transform.ru/articles/html/12reforma/ref00067.article> (дата обращения: 09.07.2023).
2. Менеджмент. Проблемы подготовки кадров для энергетической отрасли. 2021. URL: [https://knowledge.allbest.ru/management/3c0a65625a3bc79a5d43a88421216d37\\_0.html](https://knowledge.allbest.ru/management/3c0a65625a3bc79a5d43a88421216d37_0.html) (дата обращения: 09.07.2023).
3. Мирошникова О. И. К вопросу о проблемах подготовки персонала в России в новых экономических условиях // NovaInfo. 2015. № 39. URL: <https://novainfo.ru/article/3986> (дата обращения: 09.07.2023).
4. Борисова Н. И., Борисов А. В. К вопросу о подготовке и переподготовке рабочих кадров в условиях современного развития экономики России // Актуальные проблемы развития вертикальной интеграции системы образования, науки и бизнеса: экономические, правовые и социальные аспекты : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж : ВЦНТИ, 2014. Т. 2. С. 6–12.

## Опыт организации учебных практик для студентов-энергетиков

Новоселова Ольга Александровна<sup>a</sup>, старший преподаватель  
Лекомцева Наталья Эдуардовна<sup>b</sup>, старший преподаватель  
Фоминых Антон Анатольевич<sup>c</sup>, канд. техн. наук, доцент, декан ЭТФ  
Вятский государственный университет<sup>a, b, c</sup>, Киров

**Аннотация.** Федеральным образовательным стандартом высшего образования для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника предусмотрена учебная практика. Для образовательных программ, реализуемых на электротехническом факультете ВятГУ, приняты к реализации учебные практики двух типов: ознакомительная и профилирующая. В статье анализируется организация и проведение учебных практик в формате экскурсий и мастер-классов.

**Ключевые слова:** образовательная программа, учебная практика, мастер-класс, умения и навыки.

Федеральным образовательным стандартом высшего образования для обучающихся бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника предусмотрена учебная практика. Для образовательных программ, реализуемых на электротехническом факультете ВятГУ, приняты к реализации учебные практики двух типов: ознакомительная и профилирующая [1].

Ознакомительная учебная практика проводится на первом курсе и нацелена на знакомство обучающихся с организацией работы предприятий энергетики и электротехнической промышленности. Практика реализуется в соответствии с утвержденной программой в течение двух недель (108 часов, 3 з.е.), как правило, на базе университета [2]. Студенты посещают ознакомительные лекции, на которых руководители практики дают представление об организации производства электрической энергии на электростанциях различного типа, дальнейшего ее распределения на предприятиях электрических сетей, а также описывают особенности электроснабжения промышленных объектов. Обучающиеся также знакомятся с особенностями работы предприятий по проектированию и выпуску электрических машин и аппаратов, проектированию и эксплуатации систем автоматизированного электропривода. Для закрепления и визуализации полученных знаний в рамках учебной практики организуются экскурсии на предприятия энергетики: ТЭЦ, подстанции, электромашиностроительный завод и др.

По окончании практики студенты в соответствии с программой практики и индивидуальным заданием оформляют и сдают отчет.

Профилирующая учебная практика реализуется в конце второго курса и необходима для закрепления и углубления знаний, полученных обучающимися в рамках общих технических дисциплин. Кроме того, практика позволяет сформировать у студента первичные профессиональные умения и навыки в области электроэнергетики и электротехники.

В рамках учебной практики студенты получают навыки работы с оборудованием и инструментами, применяемыми в энергетике, изучают вопросы монтажа и простейшего ремонта электрооборудования.

Для получения вышеперечисленных умений обучающиеся могут быть направлены на прохождение практической подготовки на профильное предприятие [2]. Однако и на базе факультета студенты успешно осваивают базовые навыки работы с электрооборудованием.

В период учебной профилирующей практики на электротехническом факультете проводятся такие активности как мастер-классы и экскурсии на профильные предприятия. Каждая кафедра готовит мастер-класс, который нацелен на получение базовых навыков работы с оборудованием и инструментами у студентов. Общей тематикой учебной профилирующей практики в текущем году для студентов факультета являлась цифровизация в энергетике. Перечень мастер-классов и их краткое описание приведены в таблице 1.

*Таблица 1*

**Перечень мастер-классов**

Название мастер класса	Краткое описание
Проектирование и прототипирование щита АВР	Студенты получают теоретические и практические навыки проектирования электрической схемы щита АВР при помощи САПР, а также осуществляют монтаж данного оборудования
Конструирование и прототипирование электронного устройства	Студенты изучают основы САД дизайна через построение 3D модели детали, знакомятся с технологией 3D печати, собирают электросхему устройства и выполняют общий монтаж изделия (электронный замок, powerbank, автоматическая подсветка и др.)
Разработка и формализация схемы релейной защиты и автоматики	Студентам демонстрируются реально работающие схемы релейной защиты и автоматики (в лаборатории, на экскурсии), после чего они создают их цифровые двойники

Название мастер класса	Краткое описание
Монтаж схемы прямого и реверсивного пуска двигателя и элементов сопутствующей автоматики	Студенты знакомятся с азами монтажных работ в сфере электроснабжения на основе типовой схемы, используют для этого специализированный инструмент
Электронные электрозащитные средства и устройства контроля опасных факторов при обслуживании ВЛ	Студенты знакомятся с электронными устройствами, разработанными на факультете, их конструкциями, принципами работы. Пробуют на практике (в лаборатории) применять эти устройства
Современные методы пайки электронных компонентов, монтаж печатных плат	Студенты знакомятся с различными радиокомпонентами, выполняют несколько видов паек выводных и безвыводных элементов, проводов

В соответствии с заданной темой практики были проведены и экскурсии, на которых особое внимание было уделено внедрению цифровых инструментов в технологический процесс предприятий.

Для реализации практической подготовки в таком формате сотрудниками факультета заранее готовится расписание, где все активности распределяются равномерно в течение установленного срока практики в соответствии с календарным графиком. Кроме того, выделяется время для самостоятельной работы и выполнения студентами индивидуального задания.

Каждый мастер-класс проводится минимум два раза. Количество студентов-участников ограничено и, как правило, составляет 10–12 человек. Выбрать интересные для себя активности обучающиеся могут через электронные сервисы. Для получения зачета каждый второкурсник должен посетить не менее двух мастер-классов и двух экскурсий.

Проведя после прохождения практики анализ обратной связи (рис. 1), можно сказать, что студенты положительно оценили учебную практику в формате мастер-классов: более 70 % опрошенных отмечают, что на практике было интересно и увлекательно.

Проходя учебную практику в формате мастер-классов, студенты могут применить полученные в период обучения знания, оценить дефициты как в своих теоретических, так и практических навыках, а посещая экскурсии, проанализировать, как и где в реальном производстве используются полученные ими знания и умения.

## Насколько было интересно присутствовать на практике?



Рисунок 1. Анализ обратной связи от студентов после прохождения учебной практики

Кроме того, обозначая общую тему практики, проводя мастер-классы и экскурсии, связанные общей проблематикой, можно погрузить студентов в актуальную повестку, показать, какие именно навыки необходимы специалисту в энергетике сейчас и в будущем.

Однако, для успешной реализации учебной практики в таком формате важную роль играет не только ее проведение, но и подготовительный этап. Руководителям практики необходимо определить актуальную тему, подготовить программу мастер-классов и материалы для них, подобрать подходящие экскурсии.

### Библиографический список

1. Федеральный государственный образовательный высшего образования – бакалавриат по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, утвержденный приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 28 февраля 2018 г. № 144.
2. Приказ Министерства науки и высшего образования РФ и Министерства просвещения РФ от 5 августа 2020 г. № 885/390 «О практической подготовке обучающихся».

# Трансформация высшего образования в области электроэнергетики и электротехники в свете реализации Концепции технологического развития России

Погребисский Михаил Яковлевич<sup>a</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, директор Института электротехники и электрификации  
Кузнецов Олег Николаевич<sup>b</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Цырук Сергей Александрович<sup>c</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ЭППЭ  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»<sup>a, b, c</sup>, Москва

**Аннотация.** Рассматриваются задачи и пути развития высшего образования в области электроэнергетики и электротехники в России в современных условиях. Рассказывается о внедрении цифровых компетенций в образовательные программы НИУ «МЭИ». Приводятся соображения о переходе к новой системе высшего образования (базовое высшее вместо бакалавриата и специалитета) применительно к области электроэнергетики и электротехники.

**Ключевые слова:** высшее образование, электроэнергетика и электротехника, цифровые компетенции, новая система, квалификация.

В мае 2023 года в России принята Концепция технологического развития до 2030 года. Этот программный документ направлен на достижение технологического суверенитета страны, что стало особенно важно в условиях международных санкций. Значительная роль в реализации концепции отведена образованию, которое должно, в том числе, восполнить потребность в научных и квалифицированных инженерных кадрах [1].

Энергетика и электротехника являются стратегическими и наукоемкими отраслями, предъявляющими высокие требования к качеству подготовки кадров. Специфика подготовки кадров для электроэнергетики и электротехники на современном этапе обусловлена цифровизацией отраслей, быстрым увеличением объемов необходимых специалистам знаний, необходимостью отказа в ряде случаев от узкой специализации, необходимостью подготовки к командной проектной деятельности. В связи с этим возрастает значимость базовых дисциплин, требуется развитие «гибких навыков» (*Soft skills*), необходимо междисциплинарное обучение с обязательным включением информационных технологий.

На сегодняшний день работодатели электроэнергетической и электротехнической отраслей требуют, чтобы у выпускников высшей школы были сформированы цифровые компетенции (ЦК), под которыми понимается ком-

плекс компетенций по работе в цифровой среде и с цифровыми продуктами, включая активность по созданию и сбору данных, их обработке и анализу, а также по автоматизации процессов с помощью компьютерных технологий [2].

Три института в составе НИУ «МЭИ», осуществляющие подготовку бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (институт электротехники и электрификации, институт электроэнергетики, институт гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии), на протяжении ряда лет внедряют в образовательные программы по всем профилям дисциплины, модули, разделы дисциплин, связанные с использованием цифровых средств автоматического управления техническими объектами, математического моделирования, автоматизации расчетов и проектирования. При этом упор делается на обучение практическому использованию программных продуктов, цифровых средств автоматизации. Ведущие работодатели положительно оценивают опыт развития цифровых компетенций обучающихся в НИУ «МЭИ».

Следующим этапом развития IT-составляющей образовательных программ является внедрение компетенций в области сквозных цифровых технологий. Под сквозными цифровыми технологиями понимают технологии, применяемые для сбора, хранения, обработки, поиска, передачи и представления данных в электронном виде, в основе функционирования которых лежат программные и аппаратные средства и системы, востребованные во всех секторах экономики, создающие новые рынки и изменяющие бизнес-процессы. К сквозным цифровым технологиям принято относить технологии больших данных (*Big Data*), нейротехнологии и искусственный интеллект, системы распределенного реестра (блокчейн), квантовые технологии, промышленный интернет, компоненты робототехники и сенсорику, технологии беспроводной связи, технологии виртуальной и дополненной реальности и др.

С 2022/2023 учебного года в образовательные программы бакалавриата НИУ «МЭИ» по всем профилям направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника внедрена профессиональная компетенция «Способен решать задачи цифровизации в электроэнергетике и электротехнике», предполагающая,

в том числе, готовность использовать технологии больших данных для решения задач электротехники и электроэнергетики. Назначены следующие индикаторы достижения компетенции:

ИД-1 Демонстрирует понимание принципов построения и использования баз данных;

ИД-2 Осуществляет поиск и выбор цифровых технологий и методов в соответствии с поставленной задачей;

ИД-3 Демонстрирует умение применять технологии больших данных к решению задач электротехники и электроэнергетики.

Компетенция формируется дисциплинами Информатика (индикатор ИД-1), Теоретические основы электротехники (ИД-2, ИД-3), Электрические машины (ИД-2). Объем дисциплины Информатика, читаемой на первом курсе, в связи с внедрением новой компетенции увеличен с 5 до 7 з.е.

Помимо основных образовательных программ, формирование цифровых компетенций происходит при освоении программ дополнительного профессионального образования, в том числе в рамках Цифровой кафедры. В 2022/2023 учебном году программами Цифровой кафедры с присвоением второй квалификации в области информационных технологий охвачены на безвозмездной основе более 70 % студентов 4 курса бакалавриата и 1 курса магистратуры НИУ «МЭИ», обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

Важнейшей задачей профессионального сообщества является переход к новой системе высшего образования, призванной заменить так называемую болонскую систему. Как известно, предполагаются уровень базового высшего образования и уровень магистратуры. Одним из ключевых является вопрос об объемах и сроках получения базового высшего образования и присваиваемых квалификациях.

Анализ рынка труда и опыта подготовки показывает, что, с одной стороны, востребованы, прежде всего, организациями электросетевого и, отчасти, генерирующего комплекса, выпускники практико-ориентированных программ бакалавриата с 4-летним сроком обучения, готовящих к эксплуатационной дея-

тельности. С другой стороны, имеется значительная потребность в выпускниках, ориентированных на проектный, конструкторский, технологический, научно-исследовательский типы задач профессиональной деятельности, для которых 4-летний срок обучения явно недостаточен. В связи с этим представляется целесообразным, если образовательные организации получают право реализовывать в рамках одного направления подготовки базового высшего образования программы с различным сроком освоения (от 4 до 6 лет) с присвоением различных квалификаций (табл. 1). Следует отметить, что такая возможность следует из текста Поручения Президента РФ о переходе к новой системе высшего образования от 16 марта 2023 г.

Необходимо отметить, что, несмотря на наличие единого направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» с едиными общепрофессиональными компетенциями, имеются и различия в подходах к определению структуры и содержания образовательных программ электроэнергетической и электротехнической направленностей. Эти различия связаны как со спецификой объектов, так и с набором типов задач профессиональной деятельности, к которым готовятся выпускники (так, программы электротехнической направленности, помимо других типов задач, могут готовить к конструкторской деятельности). В связи с этим представляется, что квалификации, присваиваемые выпускникам электротехнического и электроэнергетического профилей, должны различаться – например, «инженер-электротехник» и «инженер-электроэнергетик».

*Таблица 1*

**Предлагаемые сроки освоения программ и квалификации базового высшего образования по направлению Электроэнергетика и электротехника**

Срок обучения, лет	Типы задач профессиональной деятельности	Квалификация	Примечание
4	Эксплуатационный	Электроэнергетик; Электротехник	Аналог бакалавриата (практико-ориентированные программы)
5	Проектный; конструкторский; технологический; наладочный	Инженер-электроэнергетик; Инженер-электротехник	Аналог специалитета
6	Научно-исследовательский; педагогический	Инженер-исследователь	Аналог «интегрированной магистратуры»

Программы магистратуры сроком освоения 1 или 2 года, по-видимому, необходимо ориентировать на подготовку к организационно-управленческой, научно-исследовательской, педагогической (в организациях среднего специального и высшего образования) деятельности на основе базового высшего образования.

Предлагаемый подход позволяет реализовать различные образовательные траектории (длительностью от 4 до 7–8 лет) и удовлетворить потребности экономики в специалистах, подготовленных к различным типам задач профессиональной деятельности.

### **Библиографический список**

1. URL: <https://iz.ru/1538253/olga-vladimirova/vysshie-dostizheniia-kak-budet-prokhorodit-transformatsiia-vuzov> (дата обращения 13.07.2023 г.).
2. Концепция развития цифровых компетенций студентов НИУ ВШЭ. М. : НИУ ВШЭ, Факультет компьютерных наук, 2020.

## **Организация совместной проектной деятельности среди обучающихся младших курсов естественно-научных и технических направлений подготовки**

Фоминых Антон Анатольевич<sup>a</sup>, канд. техн. наук, декан факультета, доцент

Лелекова Екатерина Валерьевна<sup>b</sup>, канд. биол. наук,  
руководитель НОЦ "Ботанический сад"

Коновалова Ирина Александровна<sup>c</sup>, канд. биол. наук, младший научный сотрудник

Тими́на Наталья Владимировна<sup>d</sup>, доцент

Душина Елена Эдуардовна<sup>e</sup>, младший научный сотрудник, аспирант  
Вятский государственный университет<sup>a, b, c, d, e</sup>, Киров

**Аннотация.** Доклад посвящен описанию опыта организации проектной деятельности студентов второго курса технических и естественно-научных направлений. Авторами был проведен анализ работы, выявлены достоинства и недостатки междисциплинарного подхода к проектной работе.

**Ключевые слова:** учебная проектная деятельность, междисциплинарное взаимодействие, анализ, коммуникация.

В настоящее время в образовательном процессе КирПИ ВятГУ активно используются технологии проектного обучения. Цель данного обучения заключается в:

- привлечении внимания и вовлечении студентов к инженерно-творческой деятельности на начальном этапе обучения;
- помощи в освоении студентами организационной культуры и способов реализации проектов;
- закреплении интереса у обучающихся к проектированию; критическому мышлению;
- приобретении опыта командной междисциплинарной работы;
- развитию личностных качеств (ответственность перед другими участниками команды за реализацию поставленных задач, навыки самопрезентации, взаимопонимание, уверенность в себе, стремление к достижению результата и пр.) [1].

В 2022/2023 учебном году на ЭТФ совместно с ИББТ был организован банк проектов, заказчиком которых выступил ботанический сад ВятГУ, а реализовывали проекты студенты второго курса, обучающиеся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 13.03.01 «Теплотехника и теплотехника» совместно со студента-

ми направления 06.03.01 «Биология». Также у обучающихся была возможность предложить свой инициативный проект, при условии, что результаты этого проекта можно будет использовать в ботаническом саду. Такие студенты заполняли специальную форму, где описывали свои идею, сроки, ожидаемый результат. Представители заказчика рассматривали заявку, и, после получения одобрения, проект вносился в общую базу.

Среди предложенных тем проектов были такие, как: автоматическая поворотная подставка для растений; умная подсветка; создание зоны релаксации; умная кормушка для домашних животных; станция зарядки гаджетов; контроллер теплицы; студенческий сервисный центр; альтернативное озеленение и многое др.

В качестве инициативных проектов были предложены темы, связанные с созданием 3D моделей пространств ботанического сада, прототипов изделий (механический таймер полива, интеллектуальная поворотная подставка растений и др.).

Организационно работа команд выглядела следующим образом. В течение семестра с обучающимися было проведено несколько совместных встреч. На первой встрече представитель заказчика анонсировал темы предложенных проектов, обозначил проблемы, которые должны быть решены в ходе их реализации, дал пояснения по возникающим вопросам и озвучил свои ожидания, после чего студенты поделились на команды. В каждую команду в обязательном порядке входили обучающиеся с технических направлений подготовки и по 1–2 обучающихся с биологического направления. В каждой команде был назначен руководитель проекта (наставник) из числа ППС или обучающихся. Также у каждой команды была возможность получать у ППС по мере необходимости необходимые консультации как технического, так и биологического характера. Команды установили свой график коммуникаций и приступили к работе над проектом.

Вторая встреча предполагала демонстрацию командами промежуточных результатов работы. Для этого были приглашены эксперты из числа ППС, команды подготовили презентации по проектам, в которой были отражены следующие вопросы: проблема, цель проекта, состав и роли участников команды,

рабочая гипотеза, смета проекта, промежуточные результаты, трудности в создании продукта. Представитель команды делал доклад, затем эксперты задавали всем участникам команды вопросы и давали рекомендации по улучшению проекта.

На третьей встрече осуществлялась защита проектов где заказчику демонстрировался финальный продукт. Защита проходила в два этапа: в учебной аудитории перед экспертами и непосредственно в ботаническом саду, то есть на месте использования готового продукта. В результате было выбрано 5 лучших проектов, которые были рекомендованы к участию на закрытии XI сезона проектной деятельности Политехнического института ВятГУ, где в роли экспертов выступили приглашенные представители различных предприятий. Два проекта «Станция зарядки гаджетов» и «Контроллер теплицы» получили дипломы победителей в двух номинациях.

Среди достоинств проведенного эксперимента можно отметить:

1. Получение обучающимися навыков работы в команде, осознание своей роли и ответственности за свой и общий результат работы, что в дальнейшем позволит им быстрее влиться в рабочий коллектив, адаптироваться в нем и быстрее перейти в стадию эффективной работы.

2. Возможность поработать с новыми незнакомыми технологиями в новых ранее не изучаемых областях, протестировать свои уже имеющиеся навыки и наработки в реальном проекте.

3. Возможность дополнить своё резюме/портфолио в случае успешной реализации проекта и его практического внедрения.

4. Возможность проявить свои лидерские навыки, раскрыть свои таланты, продемонстрировать свои способности перед одногруппниками и преподавателями.

5. Знакомство и взаимодействие с новыми людьми («технарей» с «гуманитариями», экспертами (узкими специалистами у своей предметной области), представителями пресс-служб, потенциальными работодателями и т. д.).

В качестве недостатков можно выделить:

1. Большое количество обучающихся на направлениях «Электроэнергетика и электротехника», «Теплотехника и гидравлика», «Мехатроника и робото-

техника» предполагает необходимость либо большого числа проектов (трудно найти наставников, консультантов, финансовые затраты, трудности в контроле работы всех команд), либо большое количество членов в каждой команде проекта (часто это бывает неэффективно, так как некоторые обучающиеся только числятся в команде, а не работают).

2. Из-за большой степени неопределенности проектной деятельности, ограничения срока реализации (до конца учебного семестра) и сложностей в финансировании не все проекты удается довести до создания конкретного продукта.

3. Сложности в коммуникациях между студентами, обучающимися на разных направлениях. Возникают сложности с организацией встреч в связи с проведением занятий в разных кампусах университета, разным расписанием учебным групп. Не все участники команд смогли договориться между собой о продукте, потратили много времени на уточнение требований к нему, что сказалось на итоговых результатах.

4. Включение обучающихся в проектную деятельность не гарантирует освоения ими методов работы над проектами на высоком уровне.

Таким образом, проведя анализ совместной проектной работы среди студентов второго курса технических и естественнонаучных дисциплин можно сделать следующие выводы:

1. Исследовательский и межпредметный характер проектной деятельности, приближенность к специфике будущей профессиональной деятельности – это одно из её преимуществ, которое позволяет повысить интерес и мотивацию в обучении. Студенты-биологи в ходе работы проводили настоящие исследования, какие растения подойдут для выращивания в созданных студентами-электротехниками гидропонных установках, выбранном освещении, условиях полива и т. д. А студенты-энергетики получили практические навыки по созданию действующих прототипов установок, непосредственно связанных с технической реализацией выбранных решений.

2. Наблюдаются определенные сложности одновременного осуществления проектной деятельности студентами младших курсов разных направлений

подготовки, поскольку для результативной работы над проектом требуется глубокое освоение материала различных, не смежных дисциплин, эффективное развитие межличностных коммуникаций, непрерывное повышение уровня собственной квалификации.

3. Для повышения эффективности проектной деятельности необходимо активное привлечение спонсоров и консультантов.

4. Проектная деятельность способствует повышению соответствия профессионально-квалификационных характеристик выпускника современным требованиям рынка труда.

5. В ходе проектной деятельности возможно возникновение инновационных продуктов, возникновение новых междисциплинарных связей, а также связей обучающихся с потенциальными заказчиками и работодателями.

#### **Библиографический список**

1. Кудинова О. С., Скульмовская Л. Г. Проектная деятельность в ВУЗе как основа инноваций // Современные проблемы науки и образования. 2018. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=27928> (дата обращения: 26.06.2023).

## Машина Голдберга как формат инженерного творчества

Хорошина Елена Николаевна<sup>a</sup>, старший преподаватель  
Новоселова Ольга Александровна<sup>b</sup>, старший преподаватель  
Фоминых Антон Анатольевич<sup>c</sup>, канд. техн. наук, доцент, декан ЭТФ  
Вятский государственный университет<sup>a, b, c</sup>, Киров

**Аннотация.** В последние годы возникает острая потребность в развитии промышленности России с целью импортозамещения, вследствие чего существует проблема нехватки высококвалифицированных инженерных кадров, способных решать сложные технические задачи. К тому же не все выпускники имеют представление о профессиональной деятельности в своей будущей профессии. Для решения этих проблем необходимо популяризировать инженерные направления, внедрять тесную взаимосвязь студентов с производством и создавать условия для формирования у них основ инженерной культуры. В данной статье идет речь об организации проектной деятельности у первокурсников на электротехническом факультете Политехнического института в Вятском государственном университете в формате создания машин Голдберга в рамках «погружения» в профессию.

**Ключевые слова:** инженерное образование, машина Голдберга, инженерное творчество, проектная деятельность, командная работа.

В последние годы возникла острая необходимость в развитии российской промышленности с целью импортозамещения. Еще в 2014 году [1] был обозначен государственный вектор развития в том, что качество инженерных кадров становится одним из ключевых факторов конкурентоспособности государства и основой для его технологической и экономической независимости. В настоящее время ощущается нехватка высококвалифицированных инженеров, способных решать сложные технические задачи. Кроме того, студенты технических специальностей не очень хорошо представляют себе свою последующую профессиональную деятельность. Поэтому возникает необходимость в модернизации инженерного образования и качестве подготовки таких специалистов. Таким образом, университет должен стать образовательным пространством, где происходит обучение, творчество, эксперимент и продуктивное общение в целях подготовки современного инженера, отвечающего требованиям технического прогресса [2].

Для решения этих проблем необходимо популяризировать инженерные направления, внедрять тесную взаимосвязь студентов с производством и создавать условия для формирования у них основ инженерной культуры. Все это видится в сотрудничестве науки и промышленности при использовании новых

инструментов и технологий обучения на основе междисциплинарного подхода и внедрении проектной деятельности в обучении.

Рассмотрим, как решаются озвученные выше проблемы и организуется обучение на электротехническом факультете Политехнического института в Вятском государственном университете.

В первом семестре вводится дисциплина «Введение в профессию», где студенты первокурсники по направлению «Электроэнергетика и электротехника» начинают знакомиться с основами своей будущей профессиональной деятельности. В рамках данной дисциплины студенты посещают электроэнергетические предприятия, где от первого лица ребятам рассказывают и показывают технологический процесс производства и распределения электроэнергии, а также разработку электромеханических преобразователей энергии. Далее, уже в вузе, студенты проходят профессиональные пробы, где они осуществляют какой-либо вид профессиональной деятельности, и, тем самым, примеряют на себя будущие профессиональные навыки. Наряду с этим дисциплина «Введение в профессию» решает проблему инженерного творчества и работу в командных проектах, так как современная инженерная деятельность – это работа в командах, умение договариваться, творить, брать на себя ответственность. И таким учебным проектом у студентов первокурсников является конструирование машины Голдберга.

Так, начиная с 2017 года в Политехническом институте Вятского государственного университета каждый год в рамках проектной деятельности студентов в учебном процессе проходят турниры по созданию машин Голдберга.

Машина Голдберга – это абсурдное устройство, выполняющее очень простое действие чрезвычайно сложным образом – как правило, посредством длинной последовательности взаимодействий по «принципу домино»[3]. При этом машина Голдберга это не только «сухой» механизм, но еще она должна иметь историю, которая рассказывается механическим языком. Данные механизмы только недавно стали популярны в России, в то время как за рубежом такое техническое творчество уже давно активно используется как дополни-

тельная занятость у школьников и студентов, в том числе как альтернативные варианты проведения уроков физики, химии и математики.

Благодаря созданию данного устройства, студенты изучают простейшие физические явления, математические расчеты, учатся разрабатывать дизайн вещей, конструировать, моделировать, в т. ч. и в VR-пространстве, выполнять экономические расчеты и работать в команде. Все эти навыки при конструировании машин Голдберга способствуют развитию у студентов инженерного, научного, творческого и проектного мышления и дают возможность осуществить первые шаги к будущей профессии.

Турниры по конструированию машин Голдберга проходят в рамках учебной программы как профессиональный и творческий конкурс, результаты которого влияют на оценки студентов за первый семестр. Для участия в турнире формируются команды студентов на факультетах Политехнического института, куда входят факультет технологий, инжиниринга и дизайна, электротехнический факультет и факультет строительства и архитектуры, так же возможны межфакультетные команды. В процессе подготовки к турниру, студенты разрабатывают концепцию машины Голдберга, то есть сценарий работы машины, который можно рассказать механическим языком. Далее они моделируют машину, проводят экономические расчеты, подготавливают материалы, иногда используют подручные средства и собирают свою машину Голдберга в финале турнира. В этот момент на площадке турнира царит атмосфера творчества, сплоченности, соперничества и стремления к победе. Результатами проведенного мероприятия являются десятки удивительных устройств, в которых воплотились знания, командный дух, смекалка и креативность. Проекты получаются разнообразными и выполняют уникальные задачи: поливают цветы, зажигают гирлянды на ёлке, готовят хлопья с молоком или поднимают флаг. Среди представленных машин нашлась даже такая, что создана в помощь преподавателю: она может сама поставить зачет. При этом, не менее важной является необходимость грамотно презентовать свои машины, что очень значимо для современного профессионала, так как наука – это творчество и соответственно машины Голдберга развивают инженерное творчество у студентов.

Таким образом, можно сделать выводы, что внедрение в учебный процесс студентов конструирования машин Голдберга приводит к следующим моментам:

1. Популяризация профессии инженера, «погружение» в профессию.
2. Развитие технического и творческого потенциала у студентов.
3. Развитие навыков коммуникации и социализации осуществляется в процессе командной работы.
4. Изучение технических дисциплин наиболее эффективно через эксперимент и собственный проект.

### **Библиографический список**

1. Заседание Совета при Президенте РФ по науке и образованию 23 июня 2014 г. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/deliberations/45962> (дата обращения 10.08.2023).
2. Оплетина Н. В. Инженерное образование в контексте новой технологической парадигмы общественного развития // Научно-технические исследования : научный журнал. М., 2022. № 2. С. 55–70.
3. Машина Голдберга // Википедия. Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Машина\\_Голдберга](https://ru.wikipedia.org/wiki/Машина_Голдберга) (дата обращения: 10.08.2023).

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

## Погрешность определения действующего значения несинусоидального сигнала при расчетах по алгоритму первого порядка с усреднением замера

Басманов Владислав Геннадьевич<sup>a</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой ЭПП  
Бессолицын Алексей Витальевич<sup>b</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Вальс Роман Павлович<sup>c</sup>, аспирант группы ЭЭа-1801-01-00  
Вятский государственный университет<sup>a, b, c</sup>, Киров

**Аннотация.** В представленной работе проводится оценка погрешности определения параметров синусоидального сигнала цифровым устройством, выполняющим измерения путем программной обработки данных, выдаваемых АЦП, по простому алгоритму первого порядка с усреднением замера. Оценивается погрешность определения действующего значения синусоидального сигнала при наличии в нем четных и нечетных гармоник. Полученные результаты предназначены для использования в учебном процессе.

**Ключевые слова:** аналогово-цифровое преобразование, алгоритм первого порядка с усреднением замера, цифровой измерительный орган, гармонические составляющие.

**Введение.** Общемировой тенденцией в развитии электроэнергетики является модернизация элементной базы, на которой построены средства измерения, защиты и автоматики. В ходе данного процесса аналоговые устройства постепенно замещаются цифровыми. Вследствие этого при подготовке современных инженеров электроэнергетической отрасли особое внимание нужно уделить изучению цифровых устройств. Обучающиеся должны приобрести знания о принципе работы, а также получить навыки конструирования, эксплуатации и настройки элементов микропроцессорных комплексов, применение которых стало типичным для энергетики. Для реализации этой задачи в образовательный процесс ВятГУ введена дисциплина «Проектная деятельность», в ходе которой студенты осуществляют полный цикл ОКР по разработке цифровых средств измерения и автоматизации, основанных на схемной и программной реализации цифровых измерительных органов (ЦИО).

Сложность ЦИО и их программной части варьируется в широких пределах. Ввиду отсутствия у студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» углубленных знаний и навыков в области программирования микро-

контроллеров, целесообразно использовать наиболее простые алгоритмы обработки данных АЦП. При этом следует учитывать ограниченную точность любого алгоритма ЦИО, что требует определения пределов возможности использования выбираемых алгоритмов при различных условиях.

В работах [1] и [2] предлагается использовать для учебных целей алгоритм первого порядка с усреднением замера и проводится оценка амплитудной и фазовой погрешности этого алгоритма при различных условиях. В настоящей работе проводится оценка погрешности вычисления исходных параметров сигнала по вышеупомянутому алгоритму для случая наличия высших гармонических составляющих.

При выполнении численных экспериментов принималось, что разрешающая способность АЦП рассматриваемого цифрового измерительного органа составляет 8 бит; за время, соответствующее периоду промышленной частоты, берется 12 выборок сигнала.

**Методы исследования.** Для сигнала, содержащего высшие гармонические составляющие, функция зависимости от времени имеет следующий вид:

$$u_a(t) = U_m \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_0) + k_n \cdot U_m \cdot \sin(n \cdot 2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_n) + \dots, \quad (1)$$

где  $U_m$  – амплитудное значение основной гармоники сигнала,

$f$  – частота основной гармоники сигнала,

$\varphi_0$  – фаза сигнала в нулевой момент времени,

$n$  – порядок гармонической составляющей,

$\varphi_n$  – начальная фаза гармоники порядка  $n$ ,

$k_n$  – коэффициент гармонической составляющей для гармоники порядка  $n$

Для описания величины несинусоидального сигнала в большинстве случаев целесообразно использовать его действующее значение. При определении погрешности работы рассматриваемого алгоритма ЦИО его расчетные результаты сравнивались с действующим значением исходного сигнала  $U_{уст}$ , вычисленного путем численного интегрирования в программной среде MATLAB.

По алгоритму первого порядка с усреднением замера комплексный вектор, описывающий измеряемый сигнал, вычисляется по выражению [3]:

$$\underline{U}(nT_D) = \frac{1}{2} \left( \frac{N}{\pi} + j \right) \cdot u(nT_D) + \frac{1}{2} \left( j - \frac{N}{\pi} \right) \cdot u((n-1)T_D), \quad (2)$$

где  $N$  – количество взятых за период выборок,

$u(nT_D)$  – значение кода АЦП в момент времени  $t = nT_D$ ,

$u[(n-1)T_D]$  – значение кода АЦП в момент времени  $t = (n-1)T_D$ .

Рассматриваемый алгоритм реализует вычисление амплитуды измеряемого сигнала, поэтому для оценки отклонения результатов замера от истинных необходимо найти величину действующего значения по формуле:

$$U_{расч} = \frac{|\underline{U}(nT_D)|}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Относительная погрешность в процентах вычисляется по выражению:

$$\delta = \frac{U_{расч} - U_{ист}}{U_{ист}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

**Результаты исследований, их обсуждение.** ЦИО, разрабатываемые студентами в рамках проектной деятельности, как правило, предназначены для обработки сигналов, источником которых является бытовая сеть 220/380 В. Согласно ГОСТ 32144-2013 [4], допустимые значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих в сетях напряжением 380 В для второй и третьей гармоник составляют два и пять процентов соответственно. В связи с этим при проведении численных экспериментов рассматривались три формы сигнала:

- синусоидальная форма с двойной амплитудой в 90 % от диапазона АЦП;
- на основную гармонику с двойной амплитудой в 90 % от диапазона АЦП наложена вторая гармоника с амплитудой в 2 % или 5 % от основной;
- на основную гармонику с двойной амплитудой в 90 % от диапазона АЦП наложена третья гармоника с амплитудой в 2 % или 5 % от основной.

Результаты расчета погрешности определения действующего значения исходного сигнала приведены на Рис. 1. Принимая во внимание тот факт, что начальная фаза сигнала может принимать любое значение, в программной среде MATLAB был проведен численный эксперимент для  $10^6$  вариантов начальной фазы, значение которой генерировалось случайным образом на отрезке  $[-\pi; \pi]$ .

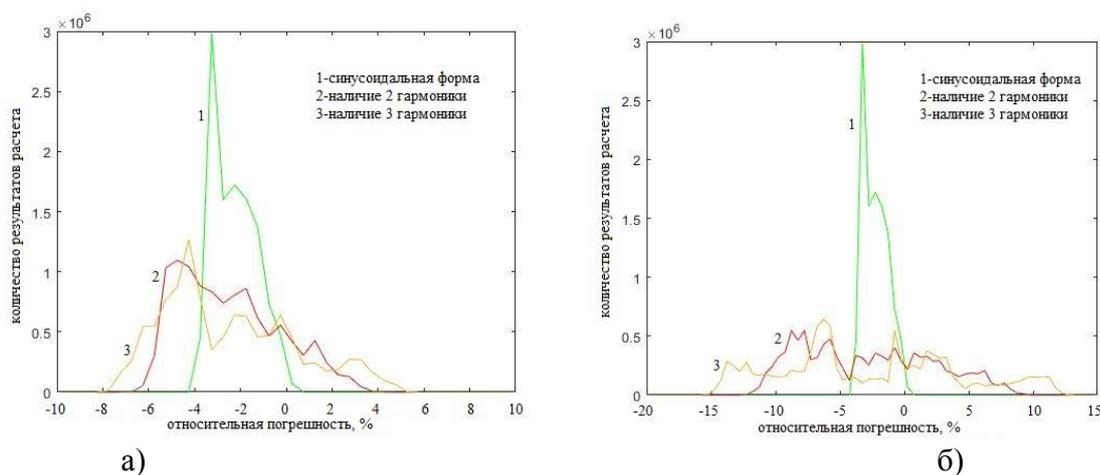


Рисунок 1. Результаты расчета погрешности определения действующего значения при коэффициенте гармонической составляющей, равном: а) 2 %; б) 5 %

Как видно из Рис. 1, при синусоидальном сигнале погрешность не превышает пяти процентов. При значении коэффициентов второй и третьей гармоник, равном 2 процента, в ряде случаев погрешность повышается до восьми процентов. Увеличение коэффициента напряжения третьей гармоники до допустимого уровня 5 процентов делает возможным достижение погрешностью уровня 15 процентов, что свидетельствует о необходимости выбора другого алгоритма ЦИО для данных условий.

**Выводы.** Алгоритм первого порядка с усреднением замера предназначен для определения параметров сигнала, изменяющегося по синусоидальному закону. Наличие в сигнале высших гармоник приводит к существенному искажению результатов замера. При значениях коэффициентов гармонических составляющих, допустимых ГОСТ [4], уровень погрешности может достичь пятнадцати процентов, что неприемлемо даже для ЦИО, используемого в учебных целях. Однако рассматриваемый алгоритм может быть использован в учебном проектировании цифровых измерительных устройств при условии применения в качестве входного источника лабораторных генераторов чистого синусоидального сигнала.

### Библиографический список

1. Бессолицын А. В., Вальс Р. П. Оценка погрешности определения амплитуды синусоидального сигнала по данным восьмибитного АЦП // Общество. Наука. Инновации (НПК-2021) : сб. ст. XXI Всерос. науч.-практ. конф. Т. 2. Киров : Вятский государственный университет, 2021 С. 354–358

2. Басманов В. Г., Бессолицын А. В., Вальс Р. П. Фазовая погрешность цифрового измерительного органа, реализующего алгоритм первого порядка с усреднением замера // Общество. Наука. Инновации (НПК-2023) : сб. ст. XXIII Всерос. науч.-практ. конф. Киров : Вятский государственный университет, 2021.

3. Никитин А. А. Цифровая релейная защита. Основы синтеза измерительной части микропроцессорных реле. Чебоксары, 2014. 241 с.

4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: принят 22.07.2013; действ. с 01.07.2014. М., 2014. URL: [https://ikgefest.ru/document/ГОСТ %2032144-2013.pdf](https://ikgefest.ru/document/ГОСТ%2032144-2013.pdf) (дата обращения 19.06.2023).

## **Результаты исследований состава потребителей машиностроительного предприятия для выбора потребителей-регуляторов**

Басманов Владислав Геннадьевич<sup>a</sup>,  
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой  
Сунцов Кирилл Алексеевич<sup>b</sup>, аспирант  
Вятский государственный университет<sup>a, b</sup>, Киров

**Аннотация.** Статья посвящена обзору состава потребителей машиностроительного предприятия, рассмотрена структура предприятия.

Цель работы – анализ состава потребителей машиностроительного предприятия для выбора потребителей-регуляторов, которые позволят регулировать график нагрузки в часы пик. По результатам исследования наиболее влиятельными потребителями стали: технологический привод, оборудование цехов гальваники и потребители литейного цеха. Результаты данного исследования могут быть применены при проектировании электрической сети машиностроительных предприятий.

**Ключевые слова:** потребитель, цех, электрические двигатели, плавильные печи, электролизные установки.

**Введение.** Современные машиностроительные предприятия используют различное оборудование: литейное, сварочное, штамповочное, металлообрабатывающее, транспортное, насосное и вентиляционное. При работе над оптимизацией энергопотребления предприятия необходимо уделить внимание каждой группе потребителей [1].

Для решения поставленной цели необходимо:

- изучить и провести анализ типового состава потребителей машиностроительного предприятия, описанный в литературе;
- произвести анализ состава потребителей на объекте исследования и выбрать потребители-регуляторы.

**Методы исследований.** Объектом исследования является электрическая сеть машиностроительного предприятия. Предметом исследования являются потребители электрической энергии. Исследование проводилось путём анализа состава потребителей электрической энергии реального объекта – машиностроительного предприятия.

**Результаты исследования.** Структура машиностроительного предприятия приведена на рисунке 1[1]. Она соответствует структуре рассматриваемого объекта.

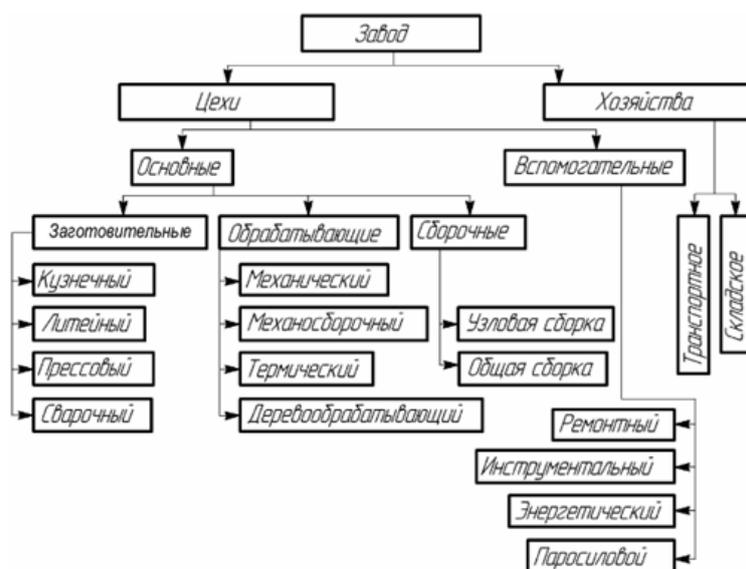


Рисунок 1. Состав машиностроительного предприятия

Литейное производство занимается созданием заготовок, это крайне энергоёмкий процесс. На рассматриваемом машиностроительном предприятии плавка стали ведётся в дуговых и индукционных печах.

Для плавки цветных металлов используются однофазные дуговые электропечи. Такие печи работают на напряжении 6 кВ и имеют мощность 6000 кВА.

Индукционные электропечи высокой частоты. Такие печи подключаются через трансформаторы к источникам переменного напряжения 6–330 кВ. Канальные, имеют мощность 125–2000 кВА, 50 Гц, тигельные 50, 500–2400 Гц. Использование дуговых электропечей носит резкопеременный характер нагрузки [2].

Кузнечно-штамповочные машины – обязательный потребитель кузнечных цехов. В качестве привода таких установок применяются асинхронные и синхронные двигатели [2]. Они составляют ощутимую часть суммарной мощности энергопотребления рассматриваемого предприятия.

Согласно данным, полученным от объекта исследования, суммарное ежемесячное энергопотребление литейного цеха 677,5 МВА.

Сварочный участок. Контактная электросварка производится сварочным оборудованием, которое питается переменным и постоянным током. Использование постоянного тока позволяет распределять сварочную нагрузку по трём фазам питающей сети равномерно[3]. Электросварочные установки переменного тока выполнены однофазными.

Цех термической обработки потребляет огромное количество электроэнергии. Основное оборудование данного цеха – нагревательные печи, ванны и закалочные баки [3].

Для низкотемпературного отпуска стальных деталей на рассматриваемом машиностроительном предприятии применяются печи, установленной мощностью 100 кВт. Для среднетемпературного – 115 кВт. Высокотемпературные используются для закалки и нормализации их мощность – 270 кВт.

Термическая обработка деталей из алюминиевых сплавов осуществляется в печах мощностью 230 кВт. Длительность операции составляет от 3 до 6 часов.

Суммарное среднее ежемесячное энергопотребление цеха термической обработки и сварочного участка составляет 368,6 МВА.

Цех гальванопокрытий. Электрохимические и электролизные установки используют для работы постоянный ток, получаемый от преобразовательных подстанций, выпрямляющих трёхфазный переменный ток [3].

Цех порошковой покраски применяет установки электростатического поля большой мощности. Питание таких установок осуществляется от сети с напряжением 0,4 кВ, с последующим его повышением внутри установки.

Согласно данным, полученным от рассматриваемого машиностроительного предприятия, суммарное среднее ежемесячное энергопотребление цеха гальванопокрытий и порошковой окраски 456,4 МВА.

Цеха, занимающиеся токарными, шлифовальными, фрезерными работами используют станки, приводами которых являются электродвигатели всех типов и номинальной мощностью от сотых киловатта до сотен киловатт. Режим работы таких электродвигателей – продолжительный.

Приводами крупных насосов, компрессоров и вентиляторов преимущественно являются синхронные электродвигатели.

Суммарное среднее ежемесячное энергопотребление цехов, занимающихся механической обработкой, составляет 403,7 МВА.

Состав основных потребителей электрической энергии машиностроительного предприятия, приведён на рисунке 2.

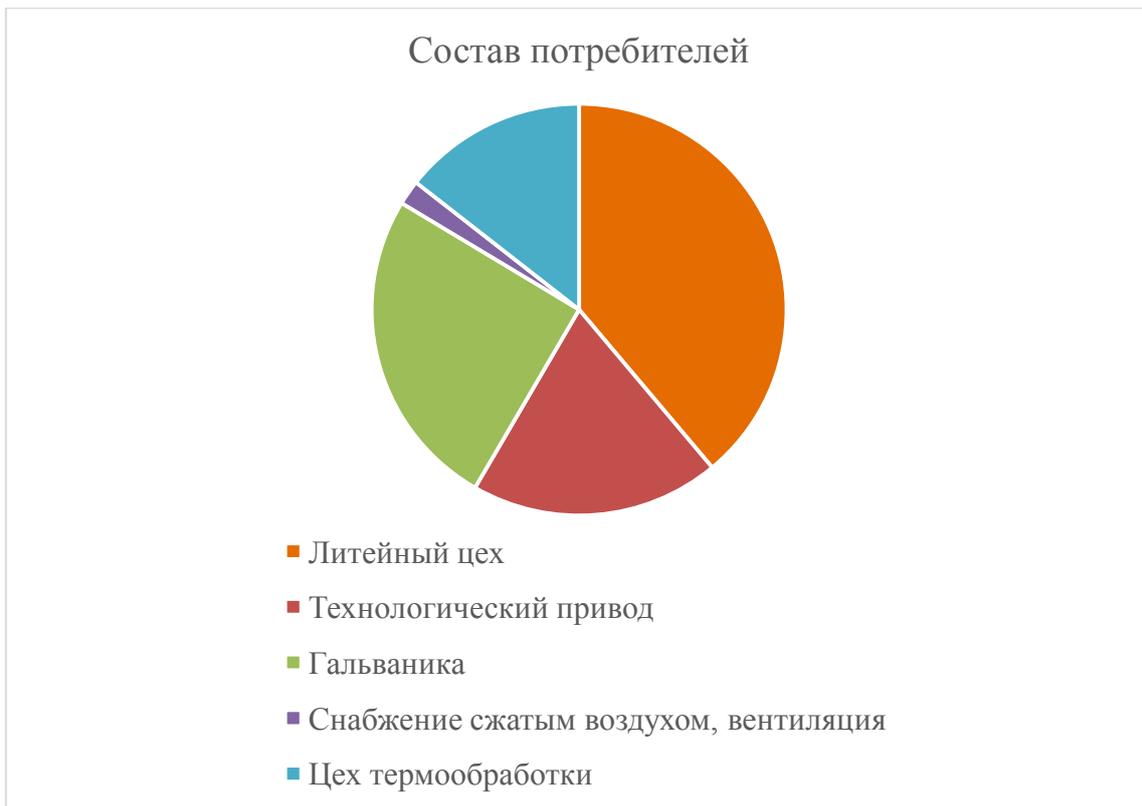


Рисунок 2. Структура потребителей электрической энергии машиностроительного предприятия

**Выводы.** Типовой состав электропотребителей машиностроительного предприятия согласно литературным источникам: электрические печи, асинхронные и синхронные электродвигатели, сварочные аппараты, электрохимические и электролизные установки.

Лидером потребления электроэнергии на рассматриваемом машиностроительном предприятии является литейный цех. Его основные потребители – электрические печи и приводы штамповочных машин. В приводах применяются как синхронные, так и асинхронные электродвигатели.

Цех гальванопокрытий также занимает лидирующие позиции по потреблению и влиянию на сеть. Прежде всего большое энергопотребление обусловлено использованием электролизных ванн.

Замыкает тройку лидеров технологический привод механообрабатывающих цехов. В качестве приводов выступают синхронные и асинхронные электродвигатели.

Наиболее широко используемым потребителем стал технологический привод. Использование синхронных и асинхронных электродвигателей в его составе

способно менять баланс реактивной мощности в сети. За счёт этого, именно технологический привод обладает ярко выраженным регулирующим эффектом нагрузки, а значит, он может стать потребителем-регулятором, оказывающим необходимое влияние на сеть, помогая добиваться требуемых значений.

### **Библиографический список**

1. Проектирование машиностроительного производства. Технологические решения : учеб. пособие / Б. Н. Хватов, А. А. Родина. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ГГТУ», 2013. 144 с.
2. Бурдуковкий В. Г., Инатович Ю. В. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Кривошипные машины : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. 168 с.
3. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. для студ. высш. учеб. завед. / Б. И. Кудрин. М. : Интермет Инжиниринг, 2005. 672 с.

## **Исследование информационных параметров электромагнитно-акустического преобразования для решения задачи идентификации напряженно-деформированного состояния оборудования**

Баширова Эльмира Муссаевна<sup>a</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Юсупова Ильвина Гамировна<sup>b</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Акчурин Дамир Шамилович<sup>c</sup>, аспирант  
Институт нефтепереработки и нефтехимии  
ФГБОУ ВО УГНТУ<sup>a, b, c</sup>, Салават

**Аннотация.** Причинами крупных аварий на объектах электроэнергетики могут стать разрушения оборудования из-за превышения допустимых нагрузок в местах концентрации механических напряжений, ослабленных различными повреждениями. Для предотвращения аварий из-за разрушения оборудования необходимы средства неразрушающего контроля и диагностики, позволяющие оперативно определять фактическое напряженно-деформированное состояние элементов оборудования. Эта задача может быть решена использованием высокопроизводительных бесконтактных электромагнитно-акустических (ЭМА) средств диагностики. Основным сдерживающим фактором их применения для решения этой задачи является их недостаточная чувствительность, обусловленная низкой эффективностью двойного преобразования электромагнитных и акустических волн, и использование при этом информационных параметров только акустической составляющей ЭМА преобразования. Цель данной работы – проведение экспериментальных исследований, направленных на выявление новых информативных параметров ЭМА преобразования для повышения чувствительности и информативности средств диагностики.

**Ключевые слова:** авария, разрушение, статистика, электромагнитно-акустическое преобразование, напряженно-деформированное состояние.

Современное предприятие по производству электрической энергии представляет собой сложную технологическую систему, состоящую из объектов производственного и вспомогательного назначения, соединенных между собой инженерными и транспортными коммуникациями. Несмотря на применяемые меры по обеспечению промышленной и пожарной безопасности, на объектах электроэнергетики периодически возникают крупные аварии, которые часто являются причинами пожаров, разрушения зданий и сооружений.

Анализ причин аварий на энергоустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора, за 2021 год показывает [1], что «отмечается значительный рост общего количества аварий на 47 % (10 аварий) по сравнению с аналогичным периодом 2020 года». Одними из основных технических причин аварий на субъектах электроэнергетики явились: «износ оборудования в процессе длительной эксплуатации; производственные дефекты оборудования, приводящие к механическим повреждениям, разрушениям оборудования и возможному возгоранию».

Разрушение оборудования происходит из-за превышения допустимых нагрузок в местах концентрации механических напряжений, ослабленных износом, коррозионным и другими повреждениями. Для раннего выявления элементов оборудования, наиболее предрасположенных к повреждениям, необходимо знать их фактическое напряженно-деформированное состояние. Для решения этой задачи могут быть использованы ЭМА средства диагностики, позволяющие бесконтактно выявлять дефекты металлов и контролировать напряженно-деформированное состояние конструкций. Но существующие ЭМА средства диагностики существенно уступают традиционным акустическим средствам в чувствительности и точности, поэтому непригодны для контроля превышения допустимых механических напряжений и выявления микродефектов металлических конструкций.

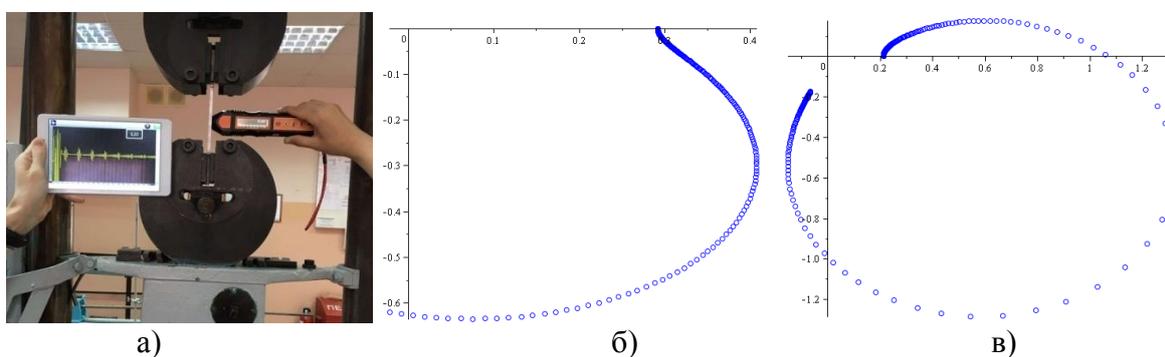
За последние 10–15 лет отечественными и зарубежными учеными опубликовано много работ с результатами теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение чувствительности и информативности методов и средств контроля, основанных на использовании ЭМА преобразования [2–4]. Литературный обзор основных направлений исследований отечественных и зарубежных ученых по совершенствованию ЭМА метода контроля показывает, что они в основном направлены на совершенствование конструкции ЭМА преобразователей для генерирования в объекте контроля акустических волн с заданными параметрами и разработку различных способов выделения и обработки информации, содержащейся в изменении параметров акустических волн. При этом информативный потенциал электромагнитной составляющей ЭМА преобразования не был исследован.

В работах [5–6] предложен новый подход к совершенствованию ЭМА метода контроля, основанный на использовании в качестве интегрального параметра, характеризующего напряженно-деформированное состояние и поврежденность металла оборудования, передаточную функцию – динамическую математическую модель в оперативной форме  $W(p)$ . Оценка напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла оборудования в зоне кон-

троля осуществляется графоаналитическим методом на комплексной плоскости с использованием координат корней знаменателя интегрального параметра  $W(p)$ . Этот метод является наглядным, но обладает значительной трудоемкостью и не исключает влияние человеческого фактора на результаты оценки технического состояния диагностируемого оборудования.

Целью данной работы является экспериментальное выявление новых информативных параметров ЭМА преобразования для формирования новых показателей для идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла электрооборудования.

Исследования по схеме одноосного статического растяжения образцов из стали марок СтЗсп, 09Г2С и 12Х18Н10Т по ГОСТ 1497-84 проводились с использованием испытательной машины УММ-5 (рисунок 1а) в лаборатории диагностики электрооборудования ИНН ФГБОУ ВО УГНТУ в г. Салавате. При проведении исследований использовался ЭМА прибор EM4000.



а – испытательная машина УММ-5; б – без нагрузки; в – при растяжения 320 МПа  
Рисунок 1. Исследование частотных характеристик (АФЧХ) образца стали СтЗсп при растяжении

Результаты исследований показали, что с изменением напряженно-деформированного состояния и поврежденности структуры образцов металла происходит изменение параметров спектра гармонических составляющих сигнала ЭМА преобразователя (рисунок 1). Как отмечалось ранее, непосредственное использование передаточной функции для идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности металла связано с определенными трудностями, поэтому предлагается использовать для этой цели частотную модель, формируемую гармоническими составляющими сигнала ЭМА

преобразователя. Преимуществом применения частотной модели является возможность применения эффективного метода спектрального анализа, упростить процесс идентификации и повысить её достоверность.

Графическим изображением частотной модели на комплексной плоскости является амплитудно-фазовая частотная характеристика. Если рассматривать диаграмму растяжения металла, то каждой точке этой кривой будет соответствовать своя частотная модель, формируемая совокупностью гармонических составляющих сигнала ЭМА преобразователя, поэтому по значениям параметров гармонических составляющих сигнала можно решить обратную задачу – идентифицировать текущее напряженно-деформированное состояние образца металла. На рисунке 1а и рисунке 1б изображены амплитудно-фазовые частотные характеристики образцов стали СтЗсп, по которым визуально видно изменение параметров частотных моделей образцов с изменением статической нагрузки. Полученные результаты наглядно свидетельствуют о возможности применения частотных моделей для однозначной идентификации уровня напряженно-деформированного состояния и поврежденности испытываемых образцов стали.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ, проект № 22-29-00327 – «Исследование взаимосвязанных изменений механических, электрофизических и акустических свойств металлов для реализации интеллектуальной электромагнитно-акустической системы идентификации напряженно-деформированного состояния и поврежденности нефтегазового оборудования».

### **Библиографический список**

1. Анализ причин аварий на энергоустановках, подконтрольных органам Ростехнадзора за 2021 год. Министерство энергетики Российской Федерации. URL: [http://szap.gosnadzor.ru/activity/energonadzor/nesc\\_sluch/](http://szap.gosnadzor.ru/activity/energonadzor/nesc_sluch/) (дата обращения 07.08.2023).
2. О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03Н17К10В10МТ / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, А. Л. Бычков, М. О. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 3–1.
3. Real-time imaging of microcracks on metallic surface using total focusing method and plane wave imaging with Rayleigh waves / M. Ducousso, F. Reverdy // NDT E Int. 2020. Vol. 116. P. 102311.
4. New Design to Rayleigh Wave EMAT Based on Spatial Pulse Compression / C. Jiang, Z. Li, Z. Zhang, S. Wang // Sensors (Basel). 2023. Apr 13. 23(8). P. 3943.
5. Хуснутдинова И. Г. Разработка метода оценки ресурса безопасной эксплуатации технологических трубопроводов на основе электромагнитно-акустического эффекта : дис. канд. техн. наук: 05.26.03. Уфа, 2019. 159 с.

6. The dynamic identification of the technical condition of pipelines on the basis of the analysis of the temporal characteristics of electromagnetic-acoustic signal / M. G. Bashirov, E. M. Bashirova, I. G. Khusnutdinova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 12042.

## Особенности островного режима работы промышленного предприятия

Ожегов Андрей Николаевич<sup>a</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Останина Софья Романовна<sup>b</sup>,  
студент группы ЭиЭм-1801-01-00  
Вятский государственный университет<sup>a, b</sup>, Киров

**Аннотация.** Вся электрическая система меняется с огромной скоростью с момента ее создания. Традиционная модель однонаправленного потока электроэнергии склоняется в сторону разнонаправленных потоков. Промышленные предприятия стремятся к установке собственной генерации электроэнергии (в том числе на основе возобновляемых источников), а также накопителей электроэнергии. Наличие собственной генерации делает возможным островной режим работы предприятия. В этом случае предприятие отключается от питающей сети, а энергетические потребности предприятия удовлетворяются за счет собственной генерации. В данной статье рассматриваются особенности островного режима работы, выделены критерии перехода в островной режим и обратно к параллельному режиму работы с сетью; особенности, связанные с управлением островным режимом, функции интеллектуальных счетчиков и особенности релейной защиты в островном режиме.

**Ключевые слова:** электроснабжение промышленных предприятий, автоматизированное управление, качество электроэнергии, островной режим работы.

**Введение.** В настоящее время электроснабжение промышленных предприятий претерпевает ряд существенных изменений. В первую очередь наблюдается увеличение собственной генерации электроэнергии на предприятии, что связано, прежде всего, с экономическими факторами. Все чаще на предприятиях используются различные возобновляемые источники электроэнергии, появляются накопители электроэнергии, мощность которых уже выходит на промышленный уровень.

Для удовлетворения растущего потребительского спроса разработана [1] новая энергетическая модель (рис. 1), поддерживающая внутреннюю генерацию (в том числе за счет возобновляемых источников энергии), накопление энергии и выдачу ее в сеть.

Главным преимуществом новой энергетической модели является распределенная система выработки энергии. Эта система позволяет предприятиям и частным лицам генерировать энергию на микроуровне и подключаться к национальной энергосистеме [1], что значительно снижает потери, вызванные транспортировкой энергии.



Рисунок 1. Новая энергетическая модель

Сеть предприятия обычно работает параллельно с инженерной сетью, однако, при сбоях в питающей сети ее можно быстро отделить от инженерной сети и эксплуатировать независимо как островную сеть. В этом случае потребность предприятия полностью удовлетворяется за счет собственной генерации. Островная сеть гораздо более чувствительна к изменению параметров режима, и успешная работа на острове требует быстрого, точного и стабильного управления.

В этой связи заслуживает особого внимания концепция электрической сети, то есть «интеллектуальная сеть». Базовое определение «интеллектуальных сетей» может соответствовать «электрическим сетям, которые разумно интегрируют поведение и действия всех подключенных к ним субъектов для обеспечения безопасного, экономичного и устойчивого электроснабжения» [2]. В таких сетях в процессе электроснабжения на всех уровнях используются продвинутое интегрированные системы. Функция этих интегрированных систем заключается в защите компонентов электрической системы, управлении потоком электроэнергии и мониторинге технологического процесса [3].

Целью данной статьи является рассмотрение особенностей островного режима работы сети (части сети) промышленного предприятия.

Отключение части сети предприятия от централизованного электроснабжения и перехода на электроснабжение от собственной генерации (режим острова) возможно при понижении напряжения со стороны энергосистемы (в случае аварийного прекращения централизованного электроснабжения), критиче-

ские ухудшения других показателей качества поступающей от энергосистемы электроэнергии. Таким образом, переход в режим «острова» связан с измерением показателей качества электроэнергии в точке подключения. Критическое ухудшение качества электроэнергии наносит предприятию значительный ущерб, который можно минимизировать переходом электроснабжения предприятия в островной режим.

Вышесказанное возможно после автоматизации следующих трех процессов управления операцией распределения [4]. Этими процессами управления являются: (1) обработка данных практически в режиме реального времени, (2) принятие оптимальных решений и (3) координация со службами различных систем генерации и распределения для управления операциями распределения.

Таким образом, на предприятии должны в реальном времени автоматически выполняться следующие процессы: измерение качества электроэнергии в точке общего присоединения и у наиболее чувствительных к изменению качества электроприемников; расчет ущерба от ухудшения качества электроэнергии; измерение, прогнозирование и управление нагрузкой цехов предприятия; измерение и управление внутренней генерацией, принятие оптимальных решений на основании заданных критериев. Одним из таких решений может быть решение о переходе в островной режим работы и обратный переход к параллельному с сетью режиму работы (в случае восстановления показателей качества электроэнергии на источнике питания до приемлемых).

В этом случае нужно учитывать, что источниками ухудшения качества электроэнергии может являться не только внешняя сеть, но и потребители самого предприятия, например, по несимметрии и несинусоидальности напряжения. Переход в островной режим в этом случае приведет только к ухудшению положения.

В целом, эксплуатация и управление сетью в режиме «острова» является сложной проблемой, поскольку существует ряд факторов, которые по-разному влияют на поведение сети. Островная сеть гораздо более чувствительна к резким изменениям режима, и успешная работа на острове требует быстрого, точного и стабильного управления.

Кроме того, защита островной сети также является сложной задачей. Обычная защита в распределительных сетях предназначена для работы при высоких уровнях тока короткого замыкания в радиальных сетях, но при автономной работе сети большие токи короткого замыкания от электросети общего назначения отсутствуют. Таким образом, токовая защита должна адаптироваться под изменение режима. В любом случае становится сложным или невозможным применение простых защит, например, плавких предохранителей.

При разработке новой схемы защиты сетей низкого напряжения необходимо учитывать множество факторов, включая количество зон защиты, требования к скорости защиты в различных режимах работы и конфигурациях, а также принципы защиты для параллельной и изолированной работы сети.

Система учета электроэнергии на основе интеллектуальных счетчиков сможет выполнять сбор данных, а также проверку и исправление согласованности этих данных [5]. Данные, передаваемые интеллектуальными счетчиками, помогают эффективно управлять нагрузкой. Величина потребляемой энергии, передаваемая от счетчиков, является основным решающим фактором для управления подключением или отключением источников генерации и нагрузок. Это подключение или отключение может осуществляться автоматически с помощью интеллектуальных контроллеров.

Желаемой функциональностью интеллектуальных счетчиков могла бы быть двунаправленная связь с автоматизированной системой управления электроснабжением предприятия. Другое возможное применение интеллектуального счетчика – это сигналы тревоги, связанные с качеством электроснабжения [6]. Эти возможности связи и мониторинга должны быть расширены до всех точек измерения и оборудования в электрической инфраструктуре.

**Выводы.** Современные системы электроснабжения промышленных предприятий с учетом наличия собственной генерации хорошо описываются новой энергетической моделью. Наличие собственной генерации делает возможным островной режим работы. Критерием перехода в островной режим работы является критическое ухудшение показателей качества электроэнергии,

поставляемой из энергосистемы. Выделены процессы, которые должны выполняться автоматически и в реальном времени. Для работы в островном режиме требуется быстрое, точное и стабильное управление режимом. Снижение уровня токов короткого замыкания накладывает особые требования к построению релейной защиты. Систему учета электроэнергии предлагается построить на основе использования интеллектуальных счетчиков, описана желаемая функциональность таких приборов.

### **Библиографический список**

1. Hu J., Vasilakos A. V. Energy Big Data Analytics and Security: Challenges and Opportunities // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. Vol. 7. No. 5. P. 2423–2436. DOI: 10.1109/TSG.2016.2563461.
2. Salvadori F., Gehrke C. S., Hartmann L. V., de Freitas I. S. et al. Design and implementation of a flexible intelligent electronic device for smart grid applications // 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Cincinnati, OH, USA. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101776.
3. Fu Q., Chen J. Design of experiment platform for digital substation based on IEC 61850 // 2016 5th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT). Changchun, China. 2016. P. 4–8. DOI: 10.1109/ICCSNT.2016.8069368.
4. Meng W., Ma R., Chen H.-H. Smart grid neighborhood area networks: a survey // *IEEE Network*. 2014. Vol. 28. No. 1. P. 24–32. DOI: 10.1109/MNET.2014.6724103.
5. Mortaji H., Ow S. H., Moghavvemi M., Almurib H. A. F. Load Shedding and Smart-Direct Load Control Using Internet of Things in Smart Grid Demand Response Management // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53. No. 6. P. 5155–5163. DOI: 10.1109/TIA.2017.2740832.
6. CRO "Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". *Choice Reviews Online*. URL: <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/> (дата обращения 20.06.2023).

## Определение влияния влажности среды на электропотребление

Репкина Наталия Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент  
Вятский государственный университет, Киров

**Аннотация.** Современные высокоавтоматизированные системы управления позволяют значительно повысить точность расчета балансов электропотребления, учитывая при прогнозе нагрузки изменения климатических условий. Используемые сейчас программные комплексы корректируют расчеты прогноза с учетом изменения температуры, ветра, освещения. Достаточно значимыми факторами являются также изменение влажности, географическое расположение объектов потребления, глобальное изменение климата, изменение характера потребления и другое. Они требуют подтверждения своей значимости для прогноза и определения математических обоснований. Работа посвящена исследованию влияния влажности на значение нагрузки электропотребления.

**Ключевые слова:** прогнозирование нагрузки электропотребления, климатические условия, корреляционный анализ.

Прогнозирование с минимальной погрешностью нагрузки электропотребления позволяет обеспечить баланс генерации и потребления электроэнергии в энергосистеме, необходимый для соблюдения требований качества электроэнергии и эффективной работы оборудования. Точность прогноза является также необходимым условием при минимизации затрат на покупку электроэнергии и мощности на оптовом рынке. Все современные методы прогнозирования базируются на свойстве инерционности электропотребления и исходными данными для расчетов принимаются почасовые средние значения нагрузок в прошедшие однотипные сутки [1, 2, 3]. При этом в качестве основных внешних факторов, существенно влияющих на точность прогноза, принимаются температура наружного воздуха, освещенность и скорость ветра. Их влияние для краткосрочного прогноза обычно учитывается по эмпирическим формулам [4]. Данная работа посвящена определению значимости и оценке количественного влияния на точность прогноза влажности воздуха.

Для исследования влияния влажности на величину нагрузки энергосистемы были взяты данные о величинах суточных нагрузок электропотребления, температур, влажности для Кировской области за летний период 2015 года, для которого были характерны сравнительно низкие температуры и высокая влажность воздуха. Для исследования были выбраны пары рядом стоящих дней, один из которых был ясным, другой – пасмурным и дождливым.

Для проверки гипотезы о значимости связи между величиной энергопотребления и значениями влажности использованы приемы корреляционного анализа [5]: 1) построение корреляционного поля и составление корреляционных таблиц; 2) вычисление выборочного коэффициента корреляции или корреляционного отношения; 3) проверка статистической гипотезы значимости связи. Корреляционное поле и корреляционная таблица используются при анализе выборочных данных. Значения коэффициентов корреляции могут лежать в пределах от -1 до +1. При коэффициенте корреляции -1 наблюдается полная отрицательная корреляция, т. е. наблюдается тенденция нарастания одной величины при снижении другой. При коэффициенте корреляции +1 наблюдается полная положительная корреляция, т. е. наблюдается нарастание одной величины при уменьшении другой. Коэффициент корреляции, близкий к нулю, говорит о том, что между рассматриваемыми величинами нет связи.

В работе для анализа приняты летние сутки с аналогичными температурными условиями и близкими значениями по ветровому воздействию. Всего принято к рассмотрению 30 суток. Здесь приведены результаты для 10 из них. Рассмотрены пасмурные (24.06.2015, 29.06.2015, 08.07.2015, 10.07.2015, 13.07.2015) и безоблачные ясные дни (23.06.2015, 28.06.2015, 07.07.2015, 09.07.2015, 14.07.2015). Помимо оценки взаимосвязи влажности и нагрузки, оценивались также зависимости нагрузки от температуры и температуры от влажности. Результаты расчета коэффициентов корреляции приведены в таблице 1, построены также диаграммы рассеяния.

*Таблица 1*

**Коэффициенты корреляции рассматриваемых параметров**

Календарные сутки	Характер суток	Коэффициент корреляции		
		Нагрузка – Температура	Нагрузка – Влажность	Влажность – Температура
23.06.2015	Ясно	0,874173	-0,84571	-0,9789
24.06.2015	Пасмурно	0,83285	-0,80521	-0,96716
28.06.2015	Ясно	0,902917	-0,89403	-0,96786
29.06.2015	Пасмурно	-0,48591	0,3825	-0,28751
07.07.2015	Ясно	0,73654	-0,87844	-0,95826
08.07.2015	Пасмурно	0,514716	0,519182	-0,34634
09.07.2015	Ясно	0,81297	-0,82097	-0,92655

Календарные сутки	Характер суток	Коэффициент корреляции		
		Нагрузка – Температура	Нагрузка – Влажность	Влажность – Температура
10.07.2015	Пасмурно	0,868014	-0,77445	-0,92111
14.07.2015	Ясно	0,921372	-0,89813	-0,87292
13.07.2015	Пасмурно	0,428422	0,110289	-0,64342

Анализ результатов указывают на наличие корреляционной связи между нагрузкой и влажностью воздуха. Проверка выдвинутой гипотезы о значимости выборочного коэффициента корреляции, подтверждающего наличие этой корреляционной зависимости, выполняется методами статистического анализа [5, 6].

Для этого для каждой выборки – рассматриваемых суток построены корреляционная таблица влажности и температуры по исходным данным, а также составлена корреляционная таблица в условных вариантах и рассчитан выборочный коэффициент корреляции и наблюдаемое значение критерия согласия.

В соответствии с проверкой гипотезы по критерию Стьюдента [6] для двусторонней критической области и уровню значимости, равном 0,05, при числе степеней свободы, равном 22, определена точка оценочного значения критерия согласия двусторонней критической области. Если ее значение меньше модуля наблюдаемого значения критерия согласия, то нулевая гипотеза о равенстве нулю генерального коэффициента корреляции отвергается. То есть, если в исследуемой выборке коэффициент корреляции значимо отличается от нуля, то можно утверждать, что температура и влажность для этих суток действительно коррелированы. Окончательные результаты расчета для 10 суток представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Результаты корреляционного анализа взаимосвязи нагрузки и влажности

День	Выборочный коэффициент корреляции	Наблюдаемое значение критерия согласия	Оценочное значение критерия согласия	Знак сравнения
23.06.2015	-0,973	19,687	2,07	>
24.06.2015	-0,951	14,35	2,07	>
28.06.2015	-0,954	14,853	2,07	>
29.06.2015	-0,265	1,29	2,07	<
07.07.2015	-0,913	10,474	2,07	>
08.07.2015	-0,318	1,571	2,07	<

День	Выборочный коэффициент корреляции	Наблюдаемое значение критерия согласия	Оценочное значение критерия согласия	Знак сравнения
09.07.2015	-0,919	10,919	2,07	>
10.07.2015	-0,919	10,918	2,07	>
13.07.2015	-0,575	3,292	2,07	>
14.07.2015	-0,8	10,42	2,07	>

Анализ результатов расчета показывает, что для восьми из десяти расчётов подтверждается наличие корреляции между температурой и влажностью. Для дней 29.06.2015 и 08.07.2015 различие между оценочным и наблюдаемым значениями критерия согласия несущественны. В эти дни наблюдалась высокая влажность – около 90 %, плотная облачность и сравнительно невысокие температуры воздуха. Из таблицы 1 видно, что именно для этих суток прослеживается положительная корреляционная зависимость между нагрузкой и влажностью. Анализ результатов, представленных в таблице 2, показывает также, что именно для дней 29.06.15 и 08.07.15 коэффициенты корреляции между нагрузкой и температурой имеют минимальные значения. Расчеты для остальных исследуемых суток аналогичны.

Таким образом, можно утверждать, что в летнее время года не только температура, но и влажность окружающей среды оказывает влияние на значение мощности электропотребления. Причем при повышенных температурах превалирует температурное влияние, а более прохладные дни для повышения точности прогноза следует учитывать влияние влажности воздуха.

### Библиографический список

1. Бэнн Д. Ф., Фармер Е. Д., Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки энергосистем. М. : Энергоатомиздат, 1987. 200 с.
2. Козлов Г. А. Роль прогнозирования энергопотребления в современной энергетике России // Научный журнал Олимп (Иваново). 2017. № 5(18). С. 29–30.
3. Малоклюев Б. И. Анализ и планирование электропотребления. М. : Энергоатомиздат, 2008. 296 с.
4. Русина А. Г., Тувшин О., Матренин П. В. Прогнозирование суточного графика электропотребления рабочих дней с учетом метеофакторов для центральной энергосистемы Монголии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. 24(2). С. 98–107.
5. Фастовец Н. О., Попов М. А. Математическая статистика. Примеры, задачи и типовые решения. М. : РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2012. 96 с.
6. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике : учеб. пособие для студ. вузов. 9-е изд. М. : Высш. шк., 2004. 404 с.

## Оптимальная конструкция фазы на линиях сверхвысокого напряжения

Соловьева Алина Сергеевна<sup>a</sup>, старший преподаватель  
Дюкин Ильяс Рафаилович<sup>b</sup>, студент  
Тимшин Алексей Иванович<sup>c</sup>, студент  
Демидов Дмитрий Вячеславович<sup>d</sup>, студент  
Садырин Данила Ильич<sup>e</sup>, студент  
Пятин Кирилл Олегович<sup>f</sup>, студент  
Храмцов Кирилл Владимирович<sup>g</sup>, студент  
Вятский государственный университет<sup>a, b, c, d, e, f</sup>, Киров  
Университет ИТМО<sup>g</sup>, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Основной целью определения расстояния между проводами является достижение баланса между эффективностью передачи электроэнергии и минимизацией электрических полей, помех и короны.

**Ключевые слова:** конструкция фазы, общая корона, начальная напряженность.

Под термином «конструкция фазы» понимается набор характеристик, таких как количество проводов в фазе, их сечения (диаметры) и взаимное расположение. Выбор конструкции фазы является сложной задачей, так как он определяет основные характеристики линии, включая пропускную способность и затраты на строительство и эксплуатацию [1]. Использование расщепленных фаз на линиях сверхвысокого напряжения обусловлено двумя причинами. Во-первых, это связано с передачей больших мощностей и, следовательно, высоких токов в фазе. Во-вторых, это связано с желанием снизить высокие значения электрического поля на поверхности провода и предотвратить образование общей короны. Изготовление одиночных проводов с такими большими сечениями связано с технологическими сложностями на заводе, трудностями транспортировки на место установки и последующим монтажом. Поэтому достигаемое сечение провода достигается путем использования нескольких проводов меньших сечений. При этом провода не объединяются в один пучок, а располагаются в определенном порядке по всей длине линии [2].

Задача заключается в определении оптимальных расстояний между соседними проводами в расщепленной фазе при различном количестве проводов. Возможные варианты по числу и маркам проводов представлены в таблице 1.

Различные варианты по числу и маркам проводов

Число и марка проводов	2хАС 750/93	3хАС 500/64	4хАС 400/51	5хАС 300/39	6хАС 240/32
Суммарная площадь алюминия, мм <sup>2</sup>	1496	1470	1576	1505	1464
Диаметр провода, мм	37,7	30,6	27,5	24	21,6
Число и диаметр проволок внешнего повива	34	24	24	15	15
Коэффициент гладкости $m^*$	3,15	3,4	3,05	4	3,6

Коэффициент гладкости  $m$  характеризует снижение начальной напряженности общего коронирования витого провода по сравнению с проводом того же диаметра, имеющего гладкую поверхность [3, 4]. Указанные значения этого коэффициента являются теоретическими, т. е. соответствуют отсутствию повреждений и загрязнений на поверхности провода.

Оптимальное расстояние между проводами («шаг» расщепления) выявляется путем сравнения амплитудных значений максимальной напряженности поля на поверхности проводов средней фазы при варьировании величины «шага». Оптимальному расстоянию соответствует наименьшая максимальная напряженность:

$$E_{max}^c = k_y \cdot E_{cp}^c = k_y \cdot C_{\Gamma}^c \cdot U_{ном} / n \cdot r, \quad (1)$$

где  $k_y = 1 + (n - 1) \cdot r / R$  – коэффициент, учитывающий усиление напряженности поля вследствие влияния зарядов соседних проводов расщепленной фазы;

$n$  – число проводов в фазе;

$r$  – радиус провода;

$R = \frac{a}{2 \cdot \sin(\pi/n)}$  – радиус расщепления ( $a$  – «шаг» расщепления);

$C_{\Gamma}^c$  – геометрическая (рабочая) емкость проводов средней фазы;

$U_{ном}$  – номинальное (междуфазное) напряжение.

Геометрическая емкость проводов средней фазы превышает емкости проводов крайних фаз в среднем на 5 %:

$$C_{\Gamma}^c = 1,05 \cdot C_{\Gamma}^k = 0,0253 \cdot \lg(D_{cp} / r_{эк}), \quad (2)$$

Здесь эквивалентный радиус пучка проводов расщепленной фазы

$$r_{эк} = r_{эк} \cdot \sqrt[n]{r \cdot n / R}, \quad (3)$$

Варьируя «шаг» расщепления через 10 см в пределах 10–80 см, рассчитывается  $E_{max}^c$  для провода 3хАС 500/64. Результаты расчетов показаны на рисунке 1.

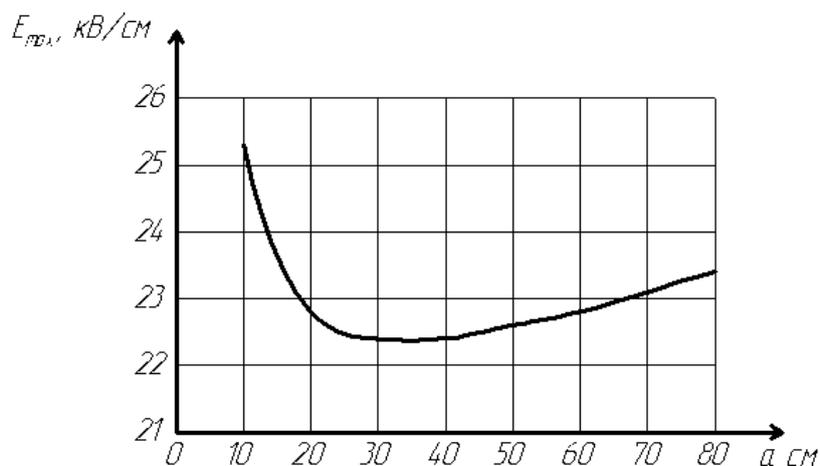


Рисунок 1. Зависимость максимальной напряженности электрического поля для проводов средней фазы от расстояния между проводами

Анализ полученных результатов показывает, что изменение  $k_y$  и  $E_{cp}^c \equiv C_{\Gamma}^c$  в зависимости от «шага» расщепления  $a$  имеет монотонный, но противоположный характер, в результате чего их произведение  $k_y \cdot E_{cp}^c \equiv E_{max}^c$  становится минимальным при  $a_{opt} = 34$  см.

Подобным образом могут быть выявлены оптимальные значения «шага» расщепления для остальных вариантов конструктивного выполнения фазы. Рассчитанные значения  $E_{max}^c$  представлены на рисунке 2.

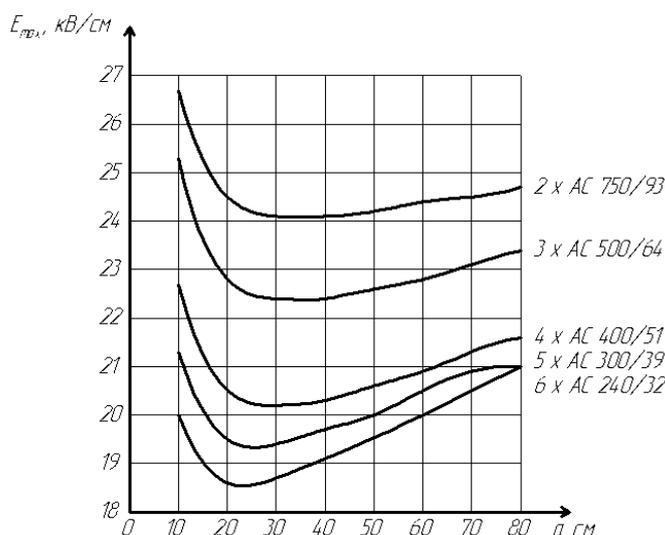


Рисунок 2. Изменение минимальных значений максимальной напряженности электрического поля в зависимости от расстояния между проводами при различном числе проводов в расщепленной фазе

Из рисунка 2 видно, что с увеличением числа проводов минимальные значения напряженности  $E_{max}^c$  снижаются, экстремальные точки все заметнее смещаются в сторону меньших значений «шага» расщепления, а сами зависимости становятся более выраженными, менее пологими. С увеличением  $a$  для 4, 5 и 6 проводов зависимости сближаются, так что при  $a = 80$  см отличие значений  $E_{max}^c$  составляет только 1,4 %. Координаты точек минимума, найденные графическим способом, приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Оптимальное  $a$  для различных проводов**

Марка проводов	2хАС 750/93	3хАС 500/64	4хАС 400/51	5хАС 300/39	6хАС 240/32
$a_{opt}$ , см.	35	34	30	26,5	22,5
$E_{max}^c$ , кВ/см	24,0	22,3	20,2	19,4	18,5

Таким образом, для выбора конструкции фазы при проектировании линий сверхвысокого напряжения, требуется определить оптимальный шаг расщепления, что приводит к исключению общего коронирования проводов и уменьшением тем самым потерь на корону, снижением уровня радиопомех, излучаемых короной до допустимого значения.

**Библиографический список**

1. Современные проблемы энергетики / А. А. Бесчинский, Д. Б. Вольфберг, В. И. Доброхотов и др. ; под ред. Д. Г. Жимерина. М. : Энергоатомиздат, 1984. 232 с.
2. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил и др. 5-е изд., перераб. М. : Энергоатомиздат, 1989. 530 с.
3. Электрические системы. Электрические сети : учеб. для электроэнергетических специальностей вузов / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков и др. ; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. 2-е изд. М. : Высш. шк., 1998. 511 с.
4. Дальние электропередачи 500 кВ : сб. ст. / под общ. ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна. М. : Энергия, 1964. 390 с.
5. Дальние электропередачи 750 кВ : в 2 ч / под общ. ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна. М. : Энергия, 1974. 223 с.
6. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. 320 с.
7. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич, А. Н. Зейлигер, Г. А. Илларионов и др. ; под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоатомиздат, 1985. 352 с.

# ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ И КОММУНАЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

## Повышение энергоэффективности электроприводов рольгангов с линейными асинхронными двигателями

Коняев Андрей Юрьевич<sup>a</sup>, д-р техн. наук, профессор  
Багин Дмитрий Николаевич<sup>b</sup>, канд. техн. наук, доцент, профессор  
Зязев Михаил Евгеньевич<sup>c</sup>, аспирант  
Уральский федеральный университет<sup>a, b, c</sup>, Екатеринбург

**Аннотация.** Приведены примеры целесообразного применения электроприводов рольгангов на основе линейных асинхронных двигателей. Обоснована целесообразность применения модульного исполнения линейных индукторов. Показана эффективность такого решения на примере реальных линейных электроприводов рольгангов.

**Ключевые слова:** линейные асинхронные двигатели, электроприводы рольгангов, модульное исполнение, повышение энергоэффективности.

В прокатных цехах с поточным технологическим процессом обработки проката транспортные и рабочие рольганги являются одними из наиболее распространенных механизмов, от которых во многом зависят производительность и надежность работы. Чаще всего для индивидуального привода роликов рольгангов используются асинхронные двигатели серий АР или АРМ. Основные недостатки рольгангов с приводными роликами связаны с тем, что тяговое усилие к перемещаемым изделиям передается за счет сил трения. При этом в реальных условиях не все ролики взаимодействуют с прокатом, часть из них может вращаться вхолостую. Это приводит к завышению мощности двигателей, коэффициент использования которых снижается. От сцепления роликов с поверхностью проката зависят и динамические возможности рольгангов. Например, для случая сталь по стали при холодном металле коэффициент сцепления равен 0,15. При этом ускорения прокатных изделий при разгоне и торможении не могут превышать  $1,5 \text{ м/с}^2$ . Это обуславливает увеличение длины участков разгона и торможения. С другой стороны возможна пробуксовка роликов, приводящая к повреждению поверхности проката. Указанные недостатки могут быть преодолены при использовании в электроприводах рольгангов линейных асинхронных двигателей (ЛАД), в которых тяговое усилие передается прокатным изделиям бесконтактно, а ролики лишь поддерживают прокат [1–6].

Пример рольганга с линейным электроприводом для перемещения листового проката показан на рис. 1. В случае перемещения алюминиевых листов полезно используется сила отталкивания, создаваемая индукторами. При этом листы перемещаются во взвешенном состоянии, не взаимодействуя с роликами (левитационный транспортер). Применение левитационных транспортеров целесообразно при обработке прокатных изделий к поверхности которых предъявляются повышенные требования.

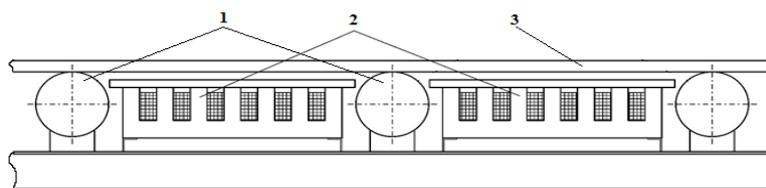


Рисунок 1. Индукционный рольганг:  
1 – ролики рольганга; 2 – индукторы ЛАД; 3 – транспортируемый лист

При перемещении стальных прокатных изделий может полезно использоваться сила притяжения ЛАД. Такая сила позволяет перемещать стальные листы в подвешенном к роликам состоянии, как показано на рис. 2.

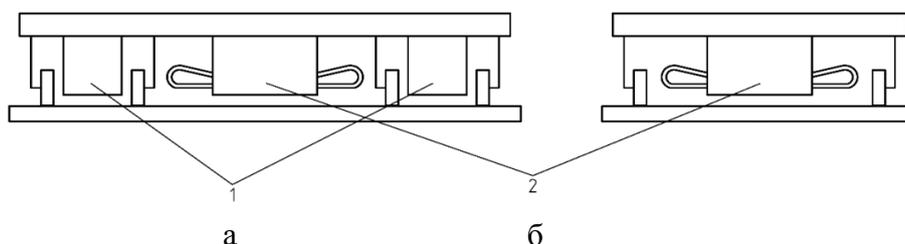


Рисунок 2. Загрузочно-подающие устройства на основе ЛАД для обработки стальных листов толщиной более 6 мм (а) и от 1,5 до 6 мм (б): 1 – подъемные электромагниты, 2 – ЛАД

Конструкция индукторов ЛАД может видоизменяться в зависимости от вида прокатных изделий и конструкции рольгангов. Примеры разных исполнений линейных индукторов показаны на рис. 3.

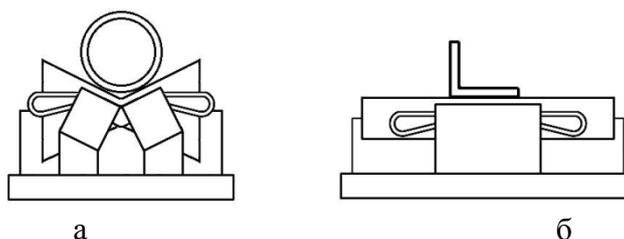


Рисунок 3. Линейные двигатели для перемещения стальных труб (а) и сортового проката (б)

Приведенные примеры показывают целесообразность использования рольгангов с линейными электроприводами для дополнения или замены традиционных рольгангов. Разработка и создание таких электроприводов в содружестве с рядом предприятий ведется в Уральском федеральном университете [4–6]. Опыт разработки и эксплуатации рольганговых ЛАД подтвердил указанные выше достоинства линейных электроприводов. В то же время выявлены некоторые недостатки таких электроприводов: низкий коэффициент мощности ( $\cos\varphi = 0,2–0,6$ ), обусловленный большими немагнитными зазорами между индуктором и прокатом; существенная несимметрия фазных токов линейных индукторов, связанная с наличием продольных краевых эффектов. Указанные особенности ЛАД обуславливают повышенные потери в системе электроснабжения и снижение энергоэффективности самих двигателей.

Одним из способов преодоления указанных недостатков применительно к линейным электроприводам рольгангов является использование модульного исполнения линейных индукторов. Идея предлагаемого технического решения иллюстрируется на рис. 4. На перемещаемое прокатное изделие, выполняющее роль вторичного элемента ЛАД, действует сразу несколько линейных индукторов, которые целесообразно рассматривать как модули единого двигателя. При наличии трех таких модулей может быть выполнена транспозиция фаз обмоток (как показано на рис. 4), обеспечивающая симметрирование фазных токов электропривода.

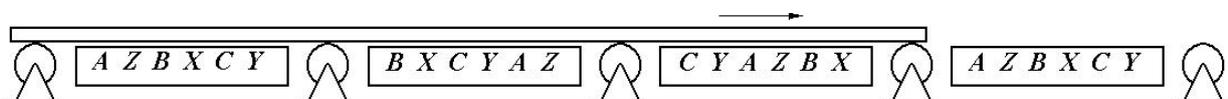


Рисунок 4. Модульное построение линейного электропривода рольгангов с транспозицией фаз отдельных модулей

Возможности улучшения показателей линейного электропривода рольгангов исследовались на примере двигателя ДАЛРУ-40/120 (двигатель асинхронный, линейный, рольганговый, с V-образным индуктором, для труб диаметром 40–120 мм). Серия таких двигателей предназначалась для перемещения стальных труб на различных операциях трубопрокатного стана 40/120. Выполнены испытания двигателей в лаборатории университета. Пример электрических параметров двигателя при

питании их от стандартной сети (380 В, 50 Гц) для случая перемещения трубы диаметром 42 мм при зазоре между трубой и индуктором 6 мм представлен в таблице.

### Электрические параметры линейного двигателя ДАЛРУ-40/120

$U_{л}, В$	Фаза	$U_{\phi}, В$	$P, Вт$	$I_{\phi}, А$	$\delta I, \%$
380,0	А	231,0	647,2	7,1	11,3
380,0	В	227,5	-12,9	6,9	8,6
380,0	С	199,1	194,2	5,1	-19,9

Как видно из таблицы, наблюдается существенная несимметрия фаз индуктора. Относительное отклонение тока в фазе С от среднего значения достигает почти 20 %. Подобная несимметрия фаз приводит к увеличению потерь активной мощности в системе электроснабжения на 2 % по сравнению со случаем симметричных токов. Как уже отмечалось, использование трех модулей линейного индуктора и транспозиция фаз позволяют устранить несимметрию токов и дополнительные потери мощности. При этом для уже эксплуатируемых электроприводов можно рекомендовать подобную транспозицию фаз трех модулей ЛАД при их параллельном включении. При проектировании новых электроприводов рольгангов с ЛАД целесообразно использовать последовательное включение трех модулей и транспозицию фаз их обмоток. При этом выравниваются токи не только в системе электроснабжения, но и в индукторе ЛАД. Это позволяет уменьшить электрические потери в двигателе и повысить тяговое электромагнитное усилие. Для двигателя ДАЛРУ-40/120 увеличение усилия составило 4,3 %.

### Библиографический список

1. Laitwait E. R. Applications of linear motors in the steel metal industry // Sheet Metal Industry. 1982. Vol. 59. Is. 8. P. 612, 615–617.
2. Blease J., Bhatia R., Pal R. M. Applying linear motors in material handling // Machine Design. 1989. P. 91–96.
3. Кузьменко А. Г., Грачев В. Г., Солодовник Ф. С. Электромагнитные механизмы металлургических машин. Металлургия. М., 1996. 508 с.
4. Коняев А. Ю. Опыт разработки и исследования рольганговых линейных двигателей. Взрывозащищенные линейные асинхронные двигатели : сб. науч. тр. ВНИИВЭ. Донецк, 1984. С. 81–86.
5. Вспомогательные устройства электромагнитного типа для линий обработки стальных листов / А. Ю. Коняев, В. С. Проскураков, М. В. Юрченко и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 1993. № 11. С. 23–25.
6. Коняев А. Ю., Пегашкин М. В. Исследование ЛАД для торможения и натяжения проката // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Вестник УГТУ-УПИ : в 2 ч. Ч. 2. Екатеринбург, 2003. С. 37–43.

## **Применение методов искусственного интеллекта для управления энергоэффективностью промышленных предприятий**

Куделина Дарья Васильевна<sup>a</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Бирюлин Владимир Иванович<sup>b</sup>, канд. техн. наук, доцент  
Брежнев Игорь Вадимович<sup>c</sup>, магистрант  
Юго-Западный государственный университет<sup>a, b, c</sup>, Курск

**Аннотация.** Предложено для оценки эффективности потребления электроэнергии использовать модель, основанную на методах искусственного интеллекта. Показано, что системы, основанные на математическом аппарате нечётких множеств, обеспечивают также использование знаний экспертов и входных данных, имеющих неполноту или неопределенность. Однако данные системы не могут автоматически генерировать новые знания, что не позволяет преодолевать субъективность знаний экспертов. Представлена модернизированная структура гибридной (адаптивной) нейронной сети, позволяющая снижать трудоемкость составления правил базы знаний для этой сети.

**Ключевые слова:** электроэнергия, математическая модель, нечёткая логика, энергетическая эффективность, нейронная сеть.

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-5109.2022.4 “Разработка автоматизированной системы выявления объектов, оказывающих негативное влияние на качество электроэнергии”.

Получение обоснованной оценки эффективности энергопотребления на том или ином предприятии является сложной задачей, так как энергетическое хозяйство более или менее крупного промышленного предприятия представляет собой чрезвычайно сложную систему с многочисленными и разнообразными по своему характеру взаимными связями и большим числом факторов внешней и внутренней природы, влияющих на общую эффективность использования электроэнергии [1, 2]. Из-за перечисленных особенностей процессов потребления энергоресурсов получение обоснованной оценки эффективности работы технологического и вспомогательного оборудования предприятий как потребителей электроэнергии, является задачей, для решения которой лучше всего использовать методы системного анализа и искусственного интеллекта.

Основные сложности при построении математических моделей, изучающих различные процессы потребления энергетических ресурсов в ходе производства продукции на промышленных предприятиях, возникают из-за применения больших объемов исходных данных [3, 4], имеющих к тому же частич-

ные неопределенность и неполноту. Чтобы исключить негативное влияние перечисленных проблем необходимо применять математический аппарат нечётких систем или нечёткой логики.

Выводы, получаемые в системах, реализованных на нечёткой логике, имеют простое и наглядное объяснение, но у этих систем имеется следующий недостаток – они не позволяют реализовать автоматическое формирование новых знаний с целью применения их в дальнейших исследованиях. Дополнительно следует отметить, что набор нечётких правил формулируется экспертом и поэтому может оказаться недостаточно полным для рассматриваемой сложной системы или даже с противоречиями между отдельными правилами в этом наборе.

Указанные недостатки могут серьезно повлиять на обоснованность получаемой информации в системах, использующих нечёткую логику. Для преодоления, даже и в частичном виде, этих недостатков необходимо использовать другой математический аппарат – нечёткие нейронные сети. Данные сети создаются на основе нейронных сетей [5] и в своей работе применяют нечёткую логику. Самое главное достоинство применения гибридных сетей – автоматическая генерация новых знаний, что позволяет находить ранее неизвестные взаимные зависимости для более полного изучения рассматриваемого энергетического хозяйства предприятия.

Для решения поставленной задачи была выбрана гибридная сеть, функционально наиболее близкая к системам нечёткого вывода. Эти сети по своей архитектуре относятся к сетям типа ANFIS (*Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*, или же адаптивная сеть нечёткого вывода). Используя её структуру, можно создавать систему нечёткого логического вывода, применяющую для своей работы алгоритм Сугено. Для этой цели применяем пятислойную нейронную сеть с прямым распространением обрабатываемого сигнала. Примерная архитектура данной сети показана на рис. 1.

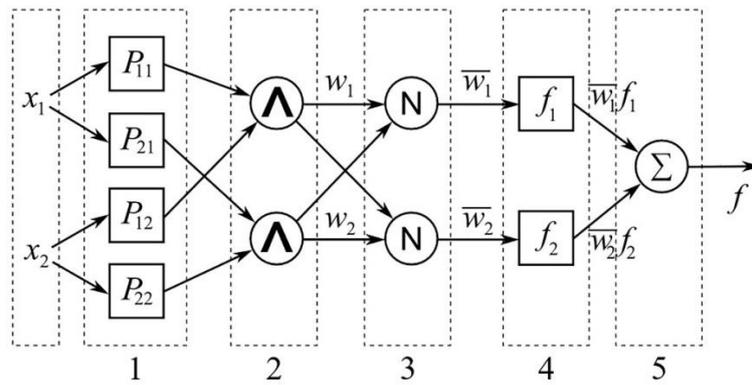


Рисунок 1. Структурная схема сети ANFIS

Как видно из приведенной на рис. 1 структуры сети ANFIS, в слое 2 степени истинности предпосылок каждого правила базы знаний системы рассчитываются как произведение входов, для чего выполняются соответствующие действия со всеми входными переменными. Реализация такого слоя требует составления базы правил, в которой должны быть представлены все входные переменные. Данный подход при достаточно большом количестве входных переменных несколько затрудняет составление базы знаний, так как приходится составлять достаточно сложные правила со сложным определением результата действия каждого из этих правил.

Для преодоления этих сложностей следует использовать двухступенчатые правила для базы правил или знаний. Первая ступень базы знаний в этом случае будет являться промежуточной и быть основой для разработки правил в границах действия групп входных факторов. Вторая ступень предназначена для обработки результатов промежуточного вывода. Таким образом, в рассматриваемой сети должны применяться четыре базы правил промежуточного вывода (первая ступень) и одна база окончательного вывода.

С учетом этого, в структуру сети ANFIS, приведенную на рис. 1, следует внести следующие изменения, приведенные на рис. 2. Слой 2, обеспечивающий вычисления степени истинности предпосылок каждого правила, в измененной структуре будет содержать два подслоя, каждый из которых соответствует своей ступени правил. Работа такого слоя будет производиться следующим образом – сначала вычисляются степени истинности предпосылок каждого правила первой ступени, отражающей влияние факторов первой, второй, третьей групп

на выходные значения промежуточного вывода по отдельности. Затем на основе полученных результатов в первом подслое производится расчет степеней истинности второй ступени базы знаний.

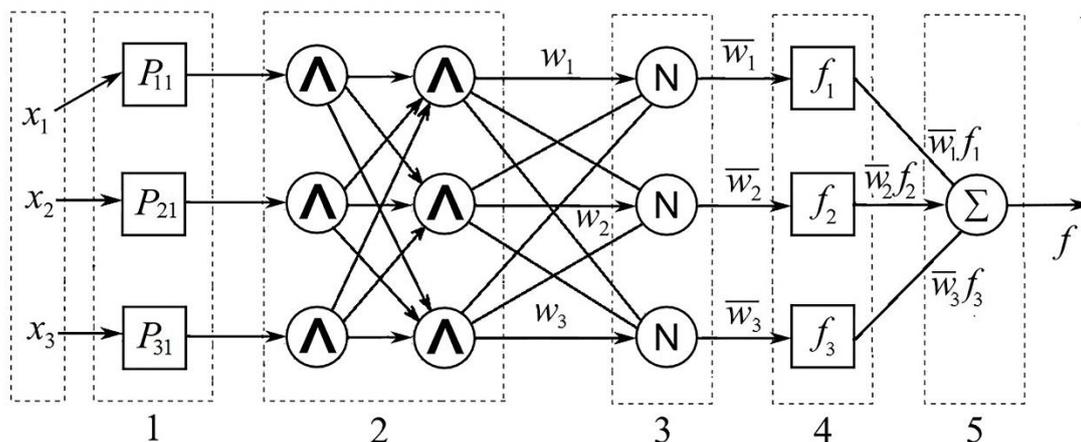


Рисунок 2. Предлагаемая структура сети ANFIS

Такая модификация позволяет формировать на основе большого количества экспериментальных данных, полученных при исследованиях контролируемой системы, действительно важные правила, применение которых обеспечивает повышение достоверности получаемых при работе гибридной сети оценок эффективности потребления электроэнергии на рассматриваемом предприятии. Предложенные изменения в стандартной структуре гибридной сети типа ANFIS позволяют снизить трудоемкость и повысить достоверность разрабатываемых правил для базы знаний данной сети. Это объясняется тем, что выполнение предварительного разделение факторов, влияющих на эффективность потребления электроэнергии, позволяет более обоснованно составлять применяемые в этой сети правила и подготавливать обучающие выборки.

### Библиографический список

1. Кокшаров В. А. Совершенствование методического инструментария оценки энергоэффективности промышленного предприятия // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». 2016. № 3(30). С. 168–181. DOI: 10.17072/1994–9960–2016–3–168–181.
2. Ермолаев К. А. Влияние процессов энергосбережения и повышения энергоэффективности на инновационное развитие национальных экономик // Экономический анализ: теория и практика. 2017. Т. 16. Вып. 1. С. 82–92. DOI: 10.24891/ea.16.1.82.
3. Кокшаров В. А. Методический подход оценки приоритетов энергетической политики промышленного предприятия // Статистика и Экономика. 2015. № 2. С. 72–77. DOI: 10.21686/2500-3925-2015-2-72-77.

4. Криворотов В. В., Калина А. В., Савельева А. И. Оценка энергоэффективности компаний медной промышленности: теория и практика // Известия Уральского государственного экономического университета. 2018. Т. 19. № 4. С. 107–116. DOI: 10.29141/2073-1019-2018-19-5-8.
5. Electric Load Forecasting in Smart Grid Using Long-Short-Term-Memory based Recurrent Neural Network / J. Zheng, C. Xu, Z. Zhang, X. Li // 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems, USA, 22–24 March 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7926112> (accessed 16.06.2023).

## Определение энергетического эффекта при работе теплофикационных турбоустановок с уплотненными регулирующими диафрагмами по электрическому графику

Суворов Дмитрий Михайлович<sup>a</sup>, канд. техн. наук,  
доцент, заведующий кафедрой  
Якимкин Тимофей Сергеевич<sup>b</sup>, студент группы ТиТм-1801-01-00  
Вятский государственный университет<sup>a, b</sup>, Киров

**Аннотация.** Разработана методика расчётных исследований по определению энергетического эффекта при работе теплофикационных турбоустановок с уплотнёнными регулирующими диафрагмами части низкого давления (РД ЧНД) по электрическому графику. Определены режимы, в которых при работе нескольких однотипных турбин на ТЭЦ их работа будет эффективна при закрытой РД ЧНД. Произведена оценка энергетического эффекта вариантов с уплотненными РД ЧНД в сравнении с вариантами загрузки турбин при неуплотненных РД ЧНД.

**Ключевые слова:** регулирующая диафрагма, часть низкого давления, энергетический эффект, ТЭЦ, турбоустановка.

**Введение.** Для теплофикационных турбин характерен широкий спектр режимов работы в зависимости от расхода свежего пара, тепловой нагрузки, давлений в регулируемых отборах, расхода и начальной температуры подогреваемой сетевой воды, условий охлаждения конденсатора. В зависимости от режима существенно меняется экономичность таких турбин [1]. Когда ТЭЦ работает по электрическому графику, задаётся при некоторой тепловой нагрузке определённая электрическая мощность. Существует мнение, что уплотнение РД ЧНД даёт энергетический эффект только при работе турбин ТЭЦ по тепловому графику, когда на всех турбоустановках регулирующие диафрагмы полностью закрыты. Однако если хотя бы на одной из турбин РД ЧНД может быть закрыта, уплотнение диафрагм позволяет получить экономию теплоты топлива и при работе ТЭЦ по электрическому графику [2, 3].

Для получения расчетной оценки этого предлагается рассматривать ТЭЦ, состоящую из двух однотипных теплофикационных турбоустановок. В качестве базового выбирается режим с полностью закрытыми неуплотненными диафрагмами на двух турбоустановках с одинаковым распределением расхода свежего пара.

**Ведущий подход.** Расчётные исследования проводятся с использованием математической модели турбоустановки Т-50-12.8, разработанной на кафедре

теплотехники и гидравлики ВятГУ [4], с использованием метода энергетических балансов, при обеспечении сопоставимости сравниваемых вариантов по нагрузкам. Расчеты выполняются поочередно для каждой из двух однотипных турбоустановок ТЭЦ. В качестве независимых задаваемых параметров выбраны следующие: расход свежего пара на турбоустановку 70 кг/с; температура обратной сетевой воды 50 °С; расход сетевой воды 600 кг/с (все эти параметры близки к их номинальным значениям); положение регулирующей диафрагмы от 0 до 100 %.

Теплофикационная нагрузка всей ТЭЦ определяется как сумма нагрузок турбин с закрытой РД ЧНД. Во втором и последующих режимах расход свежего пара на каждую турбоустановку остаётся постоянным (70 кг/с). При этом отдельно считается два режима с равномерным открытием РД и с последовательным открытием в каждой турбоустановке.

Эти же расчёты повторяются и для уплотнённой РДЧНД, причём электрическая мощность и теплофикационная нагрузка остаются постоянными, а меняется расход свежего пара на турбину с приоткрытой РД ЧНД, за счет чего и происходит экономия теплоты энергетических котлов.

Диапазон режимов был выбран таким образом, чтобы хотя бы одна РД ЧНД была закрыта. В этом случае ожидаемо снижение удельных затрат при уплотнении РД, которое и оценивалось численно.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Основные результаты проведённых в соответствии с разработанной методикой расчётов представлены на рис. 1. Приведена величина экономии теплоты топлива  $dQ_0$  в зависимости от прироста электрической нагрузки двух агрегатов ТЭЦ  $dN$  по сравнению с базовым режимом, когда РД ЧНД была закрыта на обеих турбинах с неуплотнённой регулирующей диафрагмой (в этом случае при приведенных выше параметрах электрическая мощность ТЭЦ составляет 109,7 МВт). Верхний предел суммарной мощности, приведенной на рисунке 1 (с приростом в 4,3 МВт), соответствует полному открытию РД ЧНД на турбине с уплотнённой РД ЧНД, после достижения которого дальнейший прирост мощности достигается путем открытия РД ЧНД на второй турбине, и при этом наличие уплотнения РД ЧНД уже не приводит к экономии.

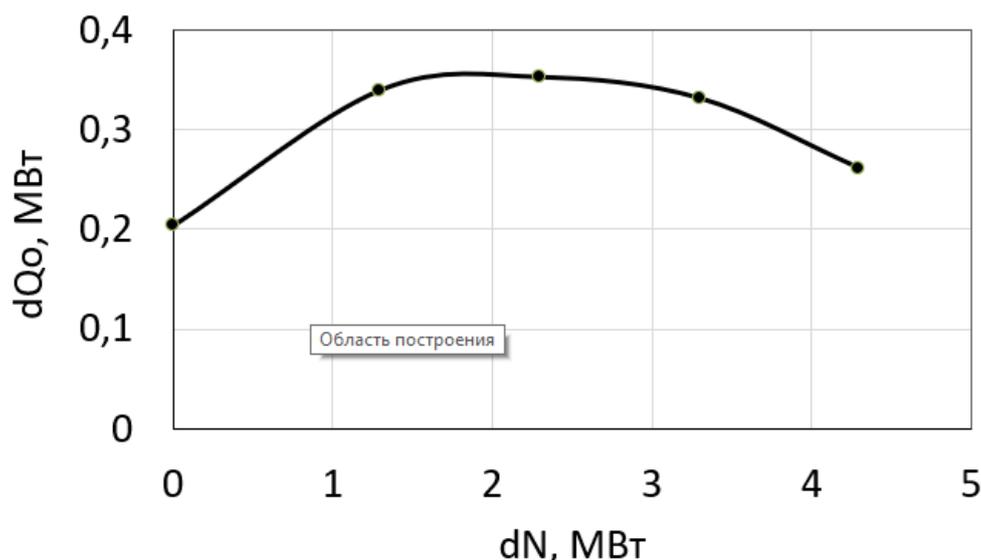


Рисунок 1. Снижение затрат теплоты на турбоустановки при уплотнении РД ЧНД в зависимости от полученной дополнительной по сравнению с базовым режимом электрической мощности

**Выводы.** Результаты проведённых расчётов подтверждают предположение об эффективности уплотнения РД ЧНД при работе ТЭЦ по электрическому графику при условии, что заданная электрическая мощность может быть обеспечена при работе хотя бы одной из турбин с уплотненной диафрагмой с полным ее закрытием. В ходе дальнейших расчетов предполагается определение всего диапазона граничных условий (по нагрузкам и параметрам сетевой воды), когда это требование выполняется для ТЭЦ с двумя и тремя однотипными турбоустановками, а также определение энергетической эффективности наличия уплотнения РД в зависимости от величины влияющих факторов во всем этом диапазоне

### Библиографический список

1. Эффективность использования теплофикационных турбоустановок в переменной части графиков тепловых и электрических нагрузок / Е. И. Эфрос, В. Ф. Гуторов, Л. Л. Симою, В. М. Суших // Теплоэнергетика. 2002. № 6. С. 2–8.
2. Способы снижения вентиляционных расходов пара в ЧНД / М. А. Репин, Н. В. Татаринова // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017). Киров : Вятский государственный университет, 2017. С. 1986–1994.
3. Эфрос Е. И. Экономичность и надежность мощных теплофикационных турбин и пути их повышения : автореф. ... д-ра техн. наук : 05.04.12. М., 1998. 40 с.
4. Математические модели теплофикационных паротурбинных установок на основе экспериментальных характеристик турбинных ступеней и отсеков / Н. В. Татаринова, Д. М. Суворов, В. М. Суших // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. № 4. С. 330–339.

Электронное научное издание

**АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ  
РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции,  
посвященной 60-летию образования  
Электротехнического факультета ВятГУ**

*13 сентября 2023 г.*

Статьи публикуются в авторской редакции  
Технический редактор *Л. А. Кислицына*

*Электронное издание сетевого распространения  
Объем издания: 3 Мб  
Дата подписания к использованию: 13.11.2023*

Вятский государственный университет  
610000, г. Киров, ул. Московская, 36  
[www.vyatsu.ru](http://www.vyatsu.ru), [www.vestnik43.ru](http://www.vestnik43.ru)  
Тел. (8332) 20-89-64 (Научное издательство ВятГУ)