

Частное образовательное учреждение дополнительного
профессионального образования
«Владимирский учебный центр «Энергетик»

ЭНЕРГИЯ БУДУЩЕГО: ИННОВАЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

МАТЕРИАЛЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

26 марта 2025 года
г. Владимир

Под общей редакцией старшего преподавателя ЧОУ ДПО
«Владимирский учебный центр «Энергетик» С.В. Антипина

Симферополь
ИТ «АРИАЛ»
2025

УДК 621.3
ББК 31.2
Э 65

Редакционная коллегия:
Антипин Сергей Владимирович,
(ответственный редактор),
старший преподаватель ЧОУ ДПО «Владимирский учебный центр «Энергетик»,
старший преподаватель кафедры электротехники и электроэнергетики ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Сиротин Николай Федерович,
директор ЧОУ ДПО «Владимирский учебный центр «Энергетик»

Э 65 Энергия будущего: инновации, технологии и перспективы развития электроэнергетики [Электронный ресурс] : материалы Всероссийской научной конференции / Под общей ред. С.В. Антипина; Частное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Владимирский учебный центр «Энергетик». – Электрон. дан. – Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2025. – Электрон. версия.
ISBN 978-5-907983-52-6

В сборнике представлены материалы Всероссийской научной конференции, посвящённой инновациям, технологиям и перспективам развития электроэнергетики. Рассмотрены ключевые направления, включая энергоэффективные системы распределения электроэнергии, цифровизацию и интеллектуальные управляющие системы, а также перспективы возобновляемых источников энергии. Особое внимание уделено таким темам, как динамическое тарифообразование, применение дронов для мониторинга ЛЭП, повышение пропускной способности электрических сетей, квантовые технологии хранения энергии и оптимизация энергопотребления в транспорте. Отражены практические аспекты внедрения инноваций, экономические и технические расчёты, а также опыт реализации пилотных проектов.

Издание адресовано специалистам в области энергетики, исследователям, инженерам, а также студентам и преподавателям, интересующимся современными тенденциями в электроэнергетике и устойчивом развитии энергосистем.

УДК: 621.3
ББК: 31.2

ISBN 978-5-907983-52-6

© ЧОУ ДПО «Владимирский
учебный центр «Энергетик», 2025
© ИТ «АРИАЛ»,
макет, оформление, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 5

Сорокин А.Д., Антипин С.В.	5
<i>Система динамического тарифообразования для стимулирования ночного потребления энергии.....</i>	
Белякова Д.А.....	8
<i>Анализ мероприятий по ликвидации снижения напряжения в послеаварийных режимах изолированных энергосистем</i>	
Ермолаев А.В., Демидов Д.В.	10
<i>Использование дронов для осмотра воздушных линий электропередач и подзарядка их от воздушных линий электропередачи</i>	
Коледа А.С.	13
<i>Направления повышения эффективности функционирования электрических сетей</i>	
Манцорова Т.Ф., Корсак Е.П.	17
<i>Проблемы и перспективы повышения энергоэффективности нефтехимических предприятий Республики Беларусь</i>	
Молокин Ю.В., Михайлов С.З., Чащин Е.А.....	20
<i>Повышение пропускной способности неизолированных плоских силовых шин</i>	
Пелешенко В.А.	23
<i>Использование квантовых эффектов для хранения и передачи энергии ..</i>	
Соловьева Т.А.....	33
<i>Полевое электроснабжение: технологии, особенности, применение.....</i>	
Сороченко П.А., Долгаль С.В.....	37
<i>Современный подход и перспективы использования накопителей электроэнергии в распределительных сетях 0,4 кв</i>	

РАЗДЕЛ II. ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ 43

Сатров М.А.	43
<i>Разработка алгоритма прогнозирования инсоляции для фотоэлектрической станции на широте новосибирска</i>	
Семернин А.Н., Малышева А.Д., Седогин М.А.	45
<i>Исследование возможности применения машинного зрения для систем управления электроприводом мостового крана</i>	
Ходжисогло А.Ю.....	49
<i>Оптимизация энергопотребления электромобилей с использованием машинного обучения и предиктивных алгоритмов управления батареями</i>	
Шмелёв В.Е., Соколов Г.Ю.....	53

<i>Предложение по совершенствованию цифрового учёта электроэнергии.....</i>	53
РАЗДЕЛ III. ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ И МИРЕ	58
Ганезов И.А.....	58
<i>Развитие энергоустановок на местных видах топлива и возобновляемых источников энергии в Беларуси.....</i>	
Пелешенко В.А.....	62
<i>Использование пограничных состояний естественного плотностно-температурного расслоения морских и пресных вод для генерации энергии</i>	
Фальченко А. Д., Наталевич М.В.	68
<i>Анализ баланса электрической энергии по административно-территориальным единицам республики беларусь.....</i>	
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	73

РАЗДЕЛ I. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Сорокин А.Д., Антипин С.В.

СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО ТАРИФООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ СТИМУЛИРОВАНИЯ НОЧНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье рассматривается система динамического тарифообразования, направленная на стимулирование ночного потребления электроэнергии. Анализируются современные проблемы распределения нагрузок в энергосистеме Российской Федерации, особенности формирования тарифов и влияние пиковых нагрузок на эксплуатацию сетей. Особое внимание уделено нормативно-правовой базе, экономической оценке эффективности предлагаемой системы, техническим вызовам её внедрения, а также перспективам интеграции с современными технологиями управления энергопотреблением. Практические примеры и пилотные проекты демонстрируют потенциал динамических тарифов для повышения устойчивости и оптимизации работы энергосистемы.

Ключевые слова: динамическое тарифообразование, ночное потребление энергии, энергосистема РФ, пиковая нагрузка, накопление энергии, оптимизация энергоснабжения, интеллектуальные системы управления, нормативно-правовая база, энергосбережение, инновационные технологии.

Российская энергетическая система занимает одно из ведущих мест в мире по выработке и потреблению электроэнергии. Традиционная система тарифообразования, основанная на одноставочных тарифах, не всегда способна учитывать существенные изменения потребления электроэнергии в течение суток. Ночное время характеризуется минимальными нагрузками, тогда как дневной период – пиковыми значениями, что требует резервирования мощностей и ведёт к дополнительным эксплуатационным затратам. В данной статье предлагается внедрение системы динамического тарифообразования, которая, посредством дифференциации тарифов в зависимости от времени суток, может стимулировать перераспределение потребления в сторону ночного периода, способствуя снижению пиковых нагрузок и повышению надёжности энергоснабжения [1].

Энергосистема Российской Федерации объединяет производство и распределение электроэнергии с использованием линий высокого напряжения (500–1150 кВ). Наибольшую долю в выработке электроэнергии занимают тепловые электростанции (67 %), за которыми следуют гидроэлектростанции (19 %) и атомные электростанции (11 %). Формирование тарифов для потребителей основывается на ряде составляющих:

- Цена электроэнергии на оптовом рынке или у генераторов;
 - Цена мощности;
 - Инфраструктурные платежи (СО ЕЭС, АТС, ЦФР);
 - Сбытовая надбавка;
 - Тарифы на передачу электроэнергии с учётом уровней напряжения.
- Несмотря на стабильное качество передачи электроэнергии, методика

тарифообразования часто не учитывает разницу в нагрузке между дневным и ночным периодами. Такое неравномерное распределение приводит к необходимости резервирования мощностей для покрытия пиковых значений, что негативно сказывается на эффективности эксплуатации энергосистемы [4]

Потребление электроэнергии в жилых домах, офисах и промышленных объектах существенно варьируется в течение суток. Ночью, когда большинство потребителей находятся в спящем состоянии, наблюдается минимальное потребление, в то время как утренние и вечерние часы характеризуются резким ростом нагрузки. Введение отдельных тарифов для дневного и ночного времени может стимулировать переход части потребителей на ночной режим, снижая пиковые нагрузки и оптимизируя использование мощностей электросетей. Для реализации данной задачи применяются как двух-, так и трёхтарифные счетчики, а также системы накопления энергии с динамической компенсацией реактивной мощности, позволяющие аккумулировать избыточную энергию в ночное время и использовать её в периоды пиковых нагрузок [2].

Внедрение динамического тарифообразования требует тщательного анализа нормативно-правовой базы. В России деятельность по установлению тарифов регулируется Федеральной антимонопольной службой, а также специализированными нормативными актами в области энергетики. Обзор зарубежного опыта показывает, что страны с высоким уровнем внедрения интеллектуальных энергосистем успешно применяют дифференцированные тарифы, что позволяет снизить эксплуатационные затраты и повысить надёжность энергоснабжения. В этой связи интеграция российских практик с зарубежными стандартами может стать основой для совершенствования системы регулирования тарифов.

Переход на динамическое тарифообразование способствует перераспределению потребления электроэнергии и снижению пиковых нагрузок, что влечёт за собой сокращение эксплуатационных затрат как для энергокомпаний, так и для конечных потребителей. Моделирование эффективности позволяет провести сравнительный анализ расходов при традиционном и динамическом подходах, выявить потенциальную экономию и обосновать необходимость реформирования тарифной политики. Примерные расчёты показывают, что снижение дневного тарифа и стимулирование ночного потребления могут привести к значительному уменьшению затрат на резервирование мощностей и оптимизации работы сетей [3].

Внедрение системы динамического тарифообразования сопряжено с рядом технических и организационных вопросов. Ключевыми проблемами являются:

- Необходимость модернизации приборов учёта электроэнергии (переход на двух- или трёхтарифные счетчики);
- Интеграция накопительных систем (например, систем UniEnergy LFP) для сглаживания колебаний нагрузки;
- Обеспечение стабильности и безопасности работы энергосистем при переходе на новую тарифную политику.

Преодоление этих вызовов требует инвестиций в обновление

инфраструктуры и разработки новых алгоритмов управления нагрузками.

Современные информационные технологии предоставляют широкие возможности для повышения эффективности энергосистемы. Интеллектуальные системы управления (например, «умный дом», автоматизированные платформы мониторинга и прогнозирования потребления) могут взаимодействовать с системой динамического тарифообразования, позволяя более точно настраивать тарифные параметры в зависимости от реального спроса. Использование аналитических инструментов и алгоритмов машинного обучения способствует формированию прогнозов потребления, что в свою очередь позволяет оптимизировать графики работы электросетей и снизить операционные риски [5].

Внедрение динамического тарифообразования уже находит отражение в ряде пилотных проектов как в России, так и за рубежом. Практические кейсы демонстрируют, что применение дифференцированных тарифов приводит к перераспределению нагрузки во времени, снижению пиковых нагрузок и оптимизации эксплуатации энергосистем. Анализ пилотных проектов позволяет выработать рекомендации по дальнейшему масштабированию и адаптации системы в различных регионах, учитывая специфику местного потребления и инфраструктурные возможности.

Внедрение системы динамического тарифообразования является перспективным направлением модернизации энергетической системы Российской Федерации. Разделение тарифов на дневное и ночное время способствует перераспределению нагрузки, снижению пиковых значений и оптимизации затрат на эксплуатацию сетей. При этом важными аспектами являются анализ нормативно-правовой базы, экономическая оценка и моделирование эффективности, а также решение технических и организационных вопросов. Интеграция современных информационных технологий и успешный опыт пилотных проектов открывают новые возможности для повышения надёжности и устойчивости энергоснабжения. Дальнейшие исследования в данной области направлены на разработку более точных алгоритмов прогнозирования потребления и адаптацию системы динамического тарифицирования к условиям быстро меняющейся энергетической среды [6].

Список литературы

1. Афанасьев И. В. Анализ и моделирование режимов электропотребления в системах динамического ценообразования / И. В. Афанасьев, П. С. Сидоров, А. А. Харитонов // *Электроэнергетика: от науки к практике*. – 2019. – № 1. – С. 45-52.
2. Белов М. П. Экономика электроэнергетики: учебник для вузов / М. П. Белов. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2017. – 320 с.
3. Воропай Н. И. Динамическое ценообразование в электроэнергетике: возможности и перспективы / Н. И. Воропай, В. В. Крук, Д. В. Попов // *Энергетическая политика*. – 2015. – № 6. – С. 52-61.
4. Козлов А. В. Влияние динамического тарифообразования на структуру электропотребления / А. В. Козлов // *Энергосбережение и энергоэффективность*. – 2020. – №

3. – С. 33-38.

5. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов / Б. И. Кудрин. – Москва: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.

6. Тихонов А. А. Моделирование спроса на электроэнергию в условиях динамического ценообразования / А. А. Тихонов // Экономика и управление в электроэнергетике. – 2016. – № 3. – С. 41-47.

Sorokin A.D., Antipin S.V.

DYNAMIC TARIFF FORMATION SYSTEM TO STIMULATE NIGHT-TIME ENERGY CONSUMPTION

Annotation. The article examines a dynamic tariff system aimed at stimulating night-time electricity consumption. It analyzes current problems of load distribution in the Russian Federation energy system, tariff formation features, and the impact of peak loads on network operation. Particular attention is paid to the regulatory framework, economic assessment of the proposed system's effectiveness, technical challenges of its implementation, and prospects for integration with modern energy management technologies. Practical examples and pilot projects demonstrate the potential of dynamic tariffs to improve sustainability and optimize the operation of the energy system.

Keywords: dynamic tariff setting, night energy consumption, Russian energy system, peak load, energy storage, energy supply optimization, intelligent control systems, regulatory framework, energy saving, innovative technologies.

Белякова Д.А.

АНАЛИЗ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЛИКВИДАЦИИ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСЛЕАВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Научный руководитель: Долгов Г.Ф.

Аннотация. В статье рассматриваются методы анализа и устранения провалов напряжения в послеаварийных режимах работы изолированных энергосистем. Особое внимание уделено использованию тиристорных компенсаторов и автоматизированных систем управления. Проведена оценка экономической эффективности внедрения инновационных технологий для повышения стабильности энергоснабжения.

Ключевые слова: изолированные энергосистемы, тиристорные компенсаторы, реактивная мощность, послеаварийные режимы, устойчивость системы.

Введение

Изолированные энергосистемы являются основой электроснабжения автономных регионов, где устойчивость работы зависит от оперативного управления режимами и устранения аварийных ситуаций. Провалы и скачки напряжения приводят к нарушению качества электроэнергии, что делает актуальным вопрос разработки эффективных мер по их ликвидации.

1. Анализ проблем устойчивости в послеаварийных режимах

Проблема снижения напряжения в изолированных энергосистемах требует особого внимания, так как нарушение нормального режима работы может привести к каскадным отказам и длительным перебоям в электроснабжении. Одним из важнейших факторов, влияющих на устойчивость, является достаточность резервов генерации и трансформации мощности.

В реальных условиях эксплуатации снижение напряжения часто связано с колебаниями нагрузки, выходом из строя оборудования и недостаточной эффективностью систем регулирования напряжения. В таких ситуациях важное значение имеют методы прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций, включая моделирование различных сценариев развития событий.

2. Методы ликвидации провалов напряжения

Для устранения провалов напряжения в энергосистемах применяются различные технические и организационные меры. Среди них можно выделить:

- внедрение систем автоматического управления режимами работы энергосистем;
- использование современных компенсаторов реактивной мощности;
- усовершенствование алгоритмов прогнозирования нагрузки.

Особая роль в обеспечении устойчивости напряжения принадлежит STATCOM (статическим компенсаторам), которые позволяют быстро реагировать на изменения параметров сети и поддерживать напряжение в допустимых пределах. Эти устройства играют ключевую роль в повышении устойчивости изолированных энергосистем.

3. Оптимизация работы энергосистем с учётом современных технологий

Применение интеллектуальных систем управления, SCADA и Smart Grids позволяет повысить точность регулирования, прогнозировать аварийные ситуации и оперативно устранять их последствия. Важную роль играет интеграция накопителей энергии, снижающих нагрузку на сеть в критические моменты.

Применение цифровых технологий в электроэнергетике позволяет существенно повысить надёжность энергосистем и минимизировать вероятность возникновения аварийных ситуаций. Важным направлением является разработка адаптивных алгоритмов управления, которые учитывают изменения параметров сети в реальном времени и автоматически корректируют работу оборудования.

Еще одним перспективным направлением является интеграция энергосистем с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Однако использование ВИЭ вызывает дополнительные сложности, связанные с нестабильностью их генерации. Для решения этой проблемы разрабатываются системы управления, основанные на технологиях машинного обучения и искусственного интеллекта.

4. Экономическая оценка внедрения инновационных решений

Экономическая целесообразность внедрения инновационных технологий в энергосистемах определяется не только снижением эксплуатационных затрат, но и повышением общей надёжности энергоснабжения. Аварийные ситуации и нестабильность напряжения приводят к значительным финансовым потерям, поэтому инвестиции в улучшение управления энергосистемами могут окупаться в короткие сроки.

Согласно исследованиям в области энергоменеджмента, внедрение цифровых технологий управления позволяет снизить затраты на эксплуатацию энергосистем на 10-15%, что делает их применение экономически оправданным.

Заключение

Развитие изолированных энергосистем требует комплексного подхода, включающего внедрение новых технологий, автоматизацию управления и оптимизацию режимов работы. Использование тиристорных компенсаторов и интеллектуальных систем позволяет существенно повысить надёжность энергоснабжения и минимизировать последствия аварийных ситуаций.

Список литературы

1. Биллингтон Р., Аллан Р. Надёжность энергосистем: моделирование и оценка. – М.: Энергия, 1996.
2. ENTSO-E. Методология оценки устойчивости энергосистем. – Брюссель: ENTSO-E, 2018.
3. CIGRE. Технические брошюры по системам управления гибким переменным током (FACTS). – Париж: CIGRE, 2007.

Belyakova D.A.

ANALYSIS OF MEASURES TO ELIMINATE VOLTAGE REDUCTION IN POST-EMERGENCY MODES OF ISOLATED POWER SYSTEMS

Scientific supervisor: Dolgov G.F.

Annotation. The article discusses methods for analyzing and eliminating voltage failures in the post-emergency operating modes of isolated power systems. Special attention is paid to the use of thyristor compensators and automated control systems. The economic efficiency of the introduction of innovative technologies to increase the stability of energy supply has been assessed.

Keywords: isolated power systems, thyristor compensators, reactive power, post-emergency modes, system stability.

Ермолаев А.В., Демидов Д.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРОНОВ ДЛЯ ОСМОТРА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И ПОДЗАРЯДКА ИХ ОТ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Научный руководитель: Соловьева А.С.

Аннотация. В статье рассматриваются перспективные методы инспекции воздушных линий электропередач (ВЛ) с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Анализируются современные технологии подзарядки дронов от ЛЭП, включая индуктивную и контактную зарядку, а также применение солнечных панелей. Приводятся преимущества автоматизированного мониторинга, повышающего безопасность и эффективность диагностики энергосистем. Рассматриваются экономические и технические аспекты внедрения данных решений.

Ключевые слова: беспилотники, мониторинг ЛЭП, дроны, подзарядка, индуктивная зарядка, диагностика.

Введение. Эффективный мониторинг и обслуживание воздушных линий электропередач (ВЛ) имеют ключевое значение для обеспечения надежности энергоснабжения. Традиционные методы осмотра, включая визуальный контроль и использование спецтехники, зачастую связаны с высокими затратами, сложной логистикой и рисками для персонала. Современные технологии предлагают использование беспилотных летательных аппаратов (дронов) для осмотра ВЛ. Более того, инновационные решения в области подзарядки дронов от самих ВЛ могут существенно повысить автономность этих устройств.

Используемые методы осмотра ВЛ:

Традиционные подходы к осмотру ВЛ включают:

- Натуральные (полевые) обследования.
- Использование спецтехники (снегоходы, вездеходы ...).
- Дистанционное обследование ВЛ с применением технологии аэросканирования [1].

Несмотря на высокую эффективность перечисленных методов, они часто сопровождаются высокими финансовыми и временными затратами, а также требуют значительных усилий для обеспечения безопасности работников.

Используя дроны, мы проходим путь от инноватики к уменьшению количества необходимых ресурсов, затем повышению квалификации работников, разработке и использованию ИИ для обработки большого количества отснятого материала к полной автоматизации мониторинга ЛЭП.

Использование дронов и БПЛА для выявления неисправностей на ЛЭП доказывает свою эффективность уже сейчас [2]:

- Использование дронов обходится значительно дешевле по сравнению с вертолетами, что позволяет снизить финансовые затраты.
- Дроны позволяют исключить необходимость нахождения персонала вблизи опасных объектов при проведении осмотров, что предотвращает риски попадания рабочего под действие электрического тока.
- Дроны могут легко достигать труднодоступных участков, таких как горные регионы или непроходимые лесные массивы.
- Современные дроны оснащены камерами высокого разрешения, тепловизорами и лазерными дальномерами, что обеспечивает точное выявление неисправностей.

Технология подзарядки дронов от ВЛ:

Одним из ключевых ограничений вынужденные подзарядка или замена батареи обуславливают незапланированные временные задержки, финансовые потери, снижение предоставляемого устройством функционала, что негативно сказывается на выполняемых прикладных задачах и может приводить к серьезным издержкам [3]. Решением этой проблемы может стать подзарядка дронов непосредственно от ВЛ. Рассмотрим основные технологии, которые смогут продлить время автономной работы.

1. Зарядка, основанная на принципе электромагнитной индукции:

Установка на дроне катушки индуктивности, принимающей внешнее электромагнитное поле и преобразующей его в электрический ток, позволяет производить подзарядку на определенных участках линии без физического контакта.

2. Контактная зарядка:

Данный вид зарядного устройства может быть реализован через физическое подключение дрона к проводам. Дрон автоматически обнаруживает провод ЛЭП, подлетает к нему снизу и зацепляется с помощью захвата, внутри которого находится трансформатор с разъемным сердечником. Он преобразует энергию в проводе в энергию для подзарядки батареи дрона [4].

3. Солнечные панели (дополнительный источник):

Солнечные панели могут использоваться как дополнительные средства подзарядки аккумулятора БПЛА. Они позволяют продлить время автономной работы, особенно в солнечные дни. Могут использоваться в сочетании с иными видами подзарядки от проводов ВЛ.

В последние годы разработаны и протестированы прототипы дронов для осмотра ВЛ. Например:

- Компании-разработчики в Китае и США успешно интегрируют дроны с системами тепловизионного контроля для выявления перегрева проводов [5].

- В Европе реализованы пилотные проекты, включающие автономную подзарядку дронов на подстанциях.

Использование дронов в сочетании с технологиями автономной подзарядки демонстрирует высокую экономическую эффективность:

- Снижение затрат на обслуживание на 30–50%.

- Уменьшение времени, необходимого для осмотра линий, в 2–3 раза.

- Повышение надежности энергоснабжения за счет регулярного мониторинга.

Дроны представляют собой перспективное решение для осмотра ВЛ, позволяя значительно повысить эффективность и безопасность этого процесса. Интеграция технологий подзарядки от ВЛ открывает новые горизонты для автономной работы дронов, минимизируя их зависимости от наземной инфраструктуры. Дальнейшие исследования и развитие этих технологий имеют потенциал для значительного улучшения управления энергосистемами в будущем.

Список литературы

1. СТО 56947007- 29.240.55.111-2011 Методические указания по оценке технического состояния ВЛ и остаточного ресурса компонентов ВЛ. Стандарт организации ФСК ЕЭС – М., 2011.

2. Использование дронов и беспилотных летательных аппаратов для выявления неисправностей на линиях электропередач / А. И. Лянова, Е. Р. Гайко, М. С. Сергеенко, Р. Е. Спиридонов // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2021. – Т. 1. – С. 72-75.

3. Десницкий, В.А. КЛАССИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ АТАК ИСЧЕРПАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ / В. А. Десницкий // Научно-

аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2021. — № 3. — С. 44-49. — ISSN 2218-130X. — Текст: электронный.

4. N + 1 Интернет-издание: Квадрокоптер научили подзаряжаться от линий электропередачи— URL: <https://nplus1.ru/news/2024/03/19/powerline-recharging-for-drone>.

5. Лаборатория дронов BR Lab: Дроны для инспекции линий электропередач и опор ЛЭП – URL: <https://brlab.ru/scopes/monitoring-liniy/>.

Ermolaev A.V., Demidov D.V.

USING DRONES TO INSPECT OVERHEAD POWER LINES AND RECHARGE THEM FROM OVERHEAD POWER LINES

Scientific adviser: Solovyova A.S.

Abstract. The article discusses promising methods of inspection of overhead power lines using unmanned aerial vehicles (UAVs). Modern technologies for charging drones from power lines, including inductive and contact charging, as well as the use of solar panels, are analyzed. The advantages of automated monitoring, which increases the safety and efficiency of diagnostics of power systems, are given. The economic and technical aspects of the implementation of these solutions are considered.

Keywords: drones, monitoring of power lines, drones, charging, inductive charging, diagnostics.

Коледа А.С.

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Научный руководитель: Лапченко Д.А.

Аннотация. В работе рассматриваются ключевые направления снижения затрат электрических сетей: для повышения энергоэффективности необходимо обеспечивать нормированные показатели качества электроэнергии, снижать потери энергии, внедрять регулируемые компенсирующие устройства и оптимизировать надежность электросетей. В ходе исследования актуальности вопроса подчеркивается важность инвестиций в модернизацию как средство повышения конкурентоспособности предприятия и достижения устойчивого развития в условиях современных экономических реалий.

Ключевые слова: электрические сети, повышение эффективности, управление затратами, модернизация, интеллектуальная сеть.

Существующее состояние электрических сетей в Республике Беларусь обуславливает приоритетность комплексной модернизации энергосистемы, направленной на оптимизацию энергопотребления и минимизацию воздействия на окружающую среду. Данная проблема не может быть решена одномоментно и требует системного подхода. Особую актуальность приобретают вопросы повышения энергоэффективности существующих объектов инфраструктуры и создания новых энергосберегающих систем, способствующих сокращению расхода природных ресурсов при сохранении высокого качества энергоснабжения [1].

Эффективность современной системы электроснабжения определяется комплексным сочетанием нескольких ключевых параметров, включая

оптимальные показатели энергопередачи, соблюдение нормативных требований к пропускной способности сети и обеспечение стабильного качества электроснабжения. Особую сложность представляет тот факт, что более семидесяти процентов электроэнергии поступает в сеть уже после преобразования, причем в металлургической отрасли этот показатель достигает девяноста процентов. Такая структура энергопотребления создает серьезные технические вызовы, прежде всего связанные с возрастающими уровнями электромагнитных нарушений, которые оказывают негативное воздействие на функциональность систем управления, контроля и сигнализации, что приводит к дестабилизации общей электромагнитной обстановки на объектах энергокомплекса.

Высокие потери в электрических сетях часто обусловлены недостаточной компенсацией реактивной мощности, а также физическим и моральным износом оборудования. Кроме того, неэффективное использование средств оптимизации режимов работы и регулирования напряжения, а также нерешенные проблемы качества электрической энергии усугубляют ситуацию. Плохое качество электрической энергии значительно снижает энергетическую эффективность сетей, увеличивая потери как активной, так и реактивной мощностей, а также технологические расходы на транспортировку электроэнергии. Это приводит к сокращению срока службы электрооборудования, повышению капитальных затрат на развитие сетевой инфраструктуры и нарушению нормальных условий функционирования энергетической системы. При превышении допустимых уровней возможны не только сбои в помехоустойчивости технических средств на электростанциях и подстанциях, но и нарушения в технологических процессах систем электроснабжения [2].

Оптимизация энергетической эффективности требует комплексного подхода, включающего несколько ключевых направлений совершенствования энергосистемы:

—обеспечение строгих нормативных стандартов качества электроэнергии на всех узловых точках электросетей, что является базовым условием надежной работы всей энергосистемы;

—уменьшение технологических потерь электрической энергии, особенно в части оптимизации режимов работы с реактивной мощностью, что предполагает внедрение экономически обоснованных значений коэффициента мощности и установку современных регулируемых компенсирующих устройств, что позволяет достичь наиболее эффективного использования имеющихся энергетических ресурсов;

Приоритетными направлениями повышения эффективности деятельности филиала можно выделить возможности снижения затрат, повышение эффективности основных средств за счет внедрения системы автоматизированного управления, модернизация оборудования распределительных сетей.

Для достижения эффективного контроля над расходами необходимо создать на предприятии систему, которая поддерживает этот процесс. Эта

система, основанная на современных подходах к планированию, нормированию, бюджетированию, учету и анализу затрат, способствует принятию обоснованных управленческих решений. На сегодняшний день существуют самые разнообразные направления снижения затрат в энергетике. Представим основные направления снижения затрат по ключевым статьям в таблице 1.

Таблица 1 – Направления снижения затрат

Статьи затрат	Направления
Топливо	<p>Организация работы с претензиями относительно объема и качества поставляемого топлива.</p> <p>Отбор поставщиков топлива с целью оптимизации его стоимости.</p> <p>Улучшение условий контрактов с поставщиками топлива.</p>
Затраты на ремонт	<p>Реализация программы реструктуризации энергетического парка предусматривает вывод части агрегатов в длительный консервационный режим при одновременном повышении коэффициента загрузки активного оборудования до оптимальных значений.</p> <p>Параллельно осуществляется плановая декомиссия морально и физически устаревших энергетических установок с целью оптимизации парка оборудования.</p> <p>Внедрение современной системы технической диагностики позволяет оперативно оценивать состояние энергетических объектов и принимать обоснованные решения по их дальнейшей эксплуатации.</p>
Снижение управленческих расходов	<p>Улучшение управления затратами, связанными с функционированием управленческого аппарата, путем внедрения лимитов на управленческие расходы и контроля за их соблюдением.</p> <p>Проведение инвентаризации текущих договоров и контрактов с последующим анализом их целесообразности, а при необходимости — их расторжением. Реализация механизма заключения соглашений на конкурсной основе.</p> <p>Сокращение расходов на услуги автотранспорта, связи, охраны и прочие подобные услуги. Введение ограничений на указанные расходы и контроль за их выполнением.</p>

Увеличение потребления электроэнергии напрямую сказывается на росте себестоимости и конечной цене товаров, что, в свою очередь, негативно влияет на их конкурентоспособность. Особенно остро эта проблема ощущается в случаях, когда продукция отличается высокой энергоемкостью. Существенное снижение энергоемкости продукции и расхода электроэнергии может быть достигнуто путем комплексной модернизации электрического хозяйства предприятия. Комплексная модернизация электрохозяйства предприятия

включает в себя модернизацию технологического электрооборудования и электрических сетей.

В комплексной модернизации технологического оборудования заключен огромный резерв по возможному снижению расхода электроэнергии. Но даже при этом значительное снижение расхода электроэнергии зачастую является побочным эффектом по отношению к росту производительности и качества продукции. В то же время модернизация требует очень значительных затрат, поскольку по сути речь идет о полном техническом перевооружении.

Модернизация электрических сетей в первую очередь включает в себя оптимизацию схем внешнего и внутреннего электроснабжения и их комплексную автоматизацию. При этом первым шагом к полной автоматизации является информатизация, предполагающая внедрение информационных систем общего и технологического назначения. Модернизация электрических сетей должна производиться на основе идеологии и принципов, так называемых интеллектуальных электрических сетей. С технической точки зрения интеллектуальная электрическая сеть – это переход на более высокий качественный уровень, создание активно-адаптивной сети, которая при минимальном участии человека обеспечивает свое оптимальное функционирование в темпе процесса и изменяет свое состояние в зависимости от характера внешних факторов и воздействий.

Список литературы

1. Национальная экономика Беларуси: текущее состояние и перспективы развития: сборник докладов студенческой конференции, Минск, 24 декабря 2019 г. / БГУ, Экономический фак., Каф. аналитической экономики и эконометрики ; [редкол.: А. М. Сидорова (отв. ред.), М. М. Ковалев, Е. Г. Господарик]. – Минск: БГУ, 2020. – 113 с. : ил., табл. – Библиогр. в тексте.

2. Фурсанов, М. И. Аналитические критерии оптимального функционирования городских электрических сетей / М. И. Фурсанов // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 51.

Koleda A.S.

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTRICAL NETWORKS

Scientific supervisor: Lapchenko D.A.

Abstract. The paper considers key areas for reducing the costs of electric networks: to increase energy efficiency, it is necessary to ensure normalized electricity quality indicators, reduce energy losses, introduce regulated compensating devices and optimize the reliability of electric networks. In the course of the study of the relevance of the issue, the importance of investments in modernization as a means of increasing the competitiveness of an enterprise and achieving sustainable development in modern economic realities is emphasized.

Keywords: electrical networks, efficiency improvement, cost management, modernization, smart grid.

Манцерава Т.Ф., Корсак Е.П.
**ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ
ПРЕДПРИЯТИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

Аннотация. В данной статье дана оценка текущего состояния нефтехимического комплекса Республики Беларусь, рассмотрены основные направления повышения энергоэффективности деятельности НПЗ. Сделан акцент на развитие теплоэнергетического хозяйства отечественных НПЗ. Выполнен расчет экономического эффекта от внедрения модернизации ИТП на НПЗ.

Ключевые слова: нефтехимические предприятия, производство, энергосбережение, энергоэффективность, индивидуальные тепловые пункты, модернизация, эффект.

Основу нефтехимического комплекса Республики Беларусь составляют более 80 организаций с общей численностью работающих приблизительно 120 тыс. человек. Эти предприятия осуществляют полный цикл работ, связанных с разведкой и добычей нефти, её транспортировкой, переработкой и реализацией нефтепродуктов. На них производят практически весь спектр химической и нефтехимической продукции, включая минеральные удобрения, химические волокна и нити, стеклоткани, автомобильные шины, лакокрасочные изделия, изделия из пластмассы.

Основным конкурентным преимуществом нефтехимической отрасли экономики Республики Беларусь является высокая степень комплексности и значительный уровень территориальной концентрации нефтехимических предприятий, наличие на них высококвалифицированного персонала. В то же время работа нефтехимического комплекса Беларуси и его научное обеспечение сопряжены с определёнными трудностями:

- неустойчивость на рынке углеводородного сырья;
- значительный удельный вес устаревшего оборудования и технологий, высокая энергоёмкость, снижающая конкурентоспособность выпускаемой химической продукции;
- отсутствие отечественного химического машиностроения;
- малая доля производства малотоннажных химических продуктов;
- нарушение внешнего электроснабжения технологических объектов предприятий концерна.

Особое внимание уделяется реконструкции и модернизации производств, внедрению новых технологий, структурной перестройке и реформированию химических предприятий, ориентированных на выпуск конкурентоспособной продукции. На ближайшие годы намечена реализация инвестиционных программ на нефтехимических предприятиях по следующим направлениям:

- увеличение глубины переработки нефти с 75,6 % до 89–90 %;
- увеличение объёмов переработки нефти (до 12 млн т в год);

- повышение качества получаемых продуктов и обеспечение его соответствия современным требованиям;
- переход на выпуск только экологически чистого дизельного топлива «Евро-5» с содержанием серы 0,001 % (10 ppm);
- снижение себестоимости нефтепродукции и увеличение рентабельности предприятий за счёт оптимизации энергопотребления и организации инфраструктуры производства; улучшение экологичности производств за счёт утилизации отходов в новые виды продукции, в частности — в нефтяной кокс и элементарную серу [1].

В частности, затраты на ТЭР на ОАО «Мозырском НПЗ» в среднем составляют 3,73 %, в том числе, тепловая энергия – 1,98 %, электрическая энергия – 1,75 %. Отсутствие затрат на топливо связано с полным использованием продуктов нефтепереработки (топливный газ, мазут, фракция дизельная гидроочищенная, ПБТ) в качестве котельно-печного топлива на предприятии [2].

На предприятии, в течение 2016-2020 гг. были реализованы мероприятия по энергосбережению суммарным энергетическим эффектом 87013 т у.т., из них 16984 т у.т. за счет мероприятий предыдущего энергоаудита, 80029 т у.т. – за счет собственных мероприятий. Следовательно, энергетический эффект реализованных собственных мероприятий по энергосбережению за 2016-2020 гг. превышает энергетический эффект нереализованных мероприятий прошлого энергоаудита в 6,4 раза [3].

На белорусских нефтехимических предприятиях приоритетом является деятельность по улучшению «зелёности» выпускаемой продукции и охране окружающей среды. Низкое содержание серы в топливе сокращает выбросы оксидов серы в атмосферу, что особенно важно для улучшения экологической обстановки в больших городах. На предприятиях нефтепереработки внедрена современная система локального мониторинга, обеспечивающая постоянный контроль над сбросами в атмосферу и открытые водоёмы с последующим анализом состояния воздушного и водного бассейнов.

Можно выделить следующие направления повышения энергоэффективности нефтехимических предприятий Республики Беларусь:

- развитие импортозамещения;
- модернизация системы теплоснабжения;
- модернизация магистральных трубопроводов пара;
- модернизация центральных тепловых пунктов;
- модернизация индивидуальных тепловых пунктов;
- использование промышленных накопителей энергии [1].

На текущий момент импортозамещение для отечественных нефтеперерабатывающих заводов может быть представлено такими направлениями, как реинжиниринг; параллельный импорт необходимого электрооборудования; развитие системы ремонта эксплуатируемого электрооборудования на отечественных специализированных предприятиях;

расширение выпуска распределительных устройств на отечественных предприятиях.

Как правило, тепловой энергией нефтехимические предприятия обеспечивают собственные источники и ТЭЦ. Например, ОАО «Мозырский НПЗ» суммарно за год предприятие потребляет более 4 млн Гкал тепловой энергии, в том числе более половины (54%) вырабатывается собственными источниками предприятия. В этой связи, особое внимание следует уделять развитию теплоэнергетического хозяйства. Основные направления развития теплоэнергетического хозяйства отечественных нефтеперерабатывающих заводов:

1. модернизация (замена, строительство) магистральных трубопроводов пара;
2. модернизация (строительство) центральных тепловых пунктов (районных конденсатных станций, центральной конденсатной станции);
3. модернизация индивидуальных тепловых пунктов [2].

Для обеспечения устойчивого режима работы наружных и внутренних тепловых сетей отопительных систем воды сан- и промтеплофикации НПЗ особое внимание уделяется модернизации индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Из 330 ИТП, эксплуатируемых и находящихся на балансе ОАО «Мозырский НПЗ», более чем в 150 из них уже проведена модернизация [2].

В частности, для Мозырского НПЗ была проведена оценка возможной эффективности модернизации тепловых пунктов с внедрением систем автоматического регулирования расхода тепловой энергии для нужд отопления. Как показали расчеты, эффективность таких мероприятий очевидна (таблица 1). Объем инвестиций на внедрение проекта для четырех тепловых пунктов – 193,21 тыс.руб. Общая экономия тепловой энергии составит 325,6 Гкал, в переводе в условное топливо, общий экономический эффект составит 54,17 т у.т., общий экономический эффект от реализации предложенных мероприятий – 33,69 тыс. руб.

Таблица 1 – Исходные данные и расчеты экономического эффекта реализации энергоэффективных мероприятий

Объект	Среднегодовое потребление	Экономия тепловой энергии за счет	Экономия тепловой	Экономия тепловой энергии за счет	Экономический эффект			Укрупненные капиталозатраты
					Гкал	т у.т.	тыс. руб.	
Ремонтно-механическое производство								
Теплопункт УМО УТО	245,5	4,91	29,46	56,47	90,84	15,11	9,40	65,17
Теплопункт УТО-2	122,8	2,46	14,74	28,24	45,44	7,56	4,7	30,11

Теплопункт УТА №2	371,3	7,43	44,56	85,40	137, 38	22,8 5	14,22	97,93
Цех №17 База оборудования								
Таможенный склад, ТПН№6, №7	140,4	2,81	16,85	32,29	51,9 5	8,64	5,38	24,72

Список литературы

1. Концерн «БЕЛНЕФТЕХИМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belneftekhim.by/ru> – Дата доступа: 08.03.2025.
2. ОАО «Мозырский НПЗ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mnpz.by/> – Дата доступа: 06.03.2025.
3. Данильчук В.В, Манцерова, Т.Ф. Пути повышение энергоэффективности нефтеперерабатывающих предприятий // Региональная экономика в контексте современности: материалы XI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых /редкол.: Фазрахманов И.И., Васильева Ю.П. и др.; под общ. ред. канд. экон. наук Васильева Ю.П. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2024, - С 7-9

Mantserava T.F., Korsak E.P.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF PETROCHEMICAL ENTERPRISES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Abstract. This article provides an assessment of the current state of the petrochemical complex of the Republic of Belarus, and discusses the main directions for improving the energy efficiency of the refinery. The emphasis is placed on the development of the thermal power industry of domestic refineries. The calculation of the economic effect of the implementation of ITP modernization at the refinery has been carried out.

Keywords: petrochemical enterprises, production, energy saving, energy efficiency, individual heating points, modernization, effect.

Молокин Ю. В., Михайлов С.З., Чащин Е.А.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПЛОСКИХ СИЛОВЫХ ШИН

Аннотация. В работе предложен способ повышения пропускной способности электротехнических шин, эксплуатируемых в нормальном режиме. На примере плоской неизолированной силовой шины сечением 120x10 мм показана возможность увеличения максимально допустимых значений тока в 1,9 раз при сохранении неизменной термической устойчивости к воздействию токов КЗ.

Ключевые слова: шина, нагрев, площадь боковой поверхности, накатка, тепловой баланс.

Известно, что жесткие неизолированные плоские силовые шины являются одной из наиболее ответственных частей в закрытых распределительных устройствах напряжением до 35 кВ [1]. При протекании тока через электротехнические шины энергия, потерянная из-за присутствия активного сопротивления, преобразуется в тепло. При этом согласно требованиям ГОСТ

8024-90, ГОСТ 2213-79, ГОСТ 839-80, ГОСТ 10693-81 допускается нагрев шин до температуры не более 90 °С. Т.о. пропускная способность электротехнических шин, определяемая допустимой плотностью тока, в значительной степени ограничивается исходя из условий нагрева до предельно допустимой температуры. Следует отметить, что одновременно с процессом нагрева развиваются и процессы охлаждения, и при нормальном режиме эксплуатации уравнение теплового баланса имеет вид [2]:

$$I^2 R dt = Gcd\theta + KF\theta dt, \quad (1)$$

где I - сила тока; R - омическое сопротивление электротехнической шины; G - вес токоведущей части; c - удельная теплоемкость материала шины; θ - перегрев, который является разностью температур шины и окружающей среды; K - общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплопотерь; F – площадь охлаждаемой поверхности шины.

Решение дифференциального уравнения (1), в приближении единичной длины и отсутствия значимого влияния скин-эффекта, позволяет определить максимально допустимое значение тока, при протекании которого в установившемся режиме температура электротехнической шины достигнет предельно допустимых значений:

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{FQ}{R}}, \quad (2)$$

где Q - полная теплоотдача с участка шины.

Из выражения (2) видно, что при прочих равных условиях, пропускная способность плоских неизолированных шин зависит от площади боковой поверхности, которая может быть увеличена путем механической обработки поверхности неизолированных шин рифлением посредством накатки. Накатка согласно ГОСТ 21474-75 на плоских деталях осуществляется как правило посредством ролика. В процессе накатки ролик вдавливается в поверхность детали под давлением до 1400 МПа на глубину от 0,5 до 0,8 мм и продольно перемещается вдоль электротехнической шины. Шаг рифления P , принимается из ряда: 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 мм. А глубина h и угол a накатки зависит от материала шины (табл.)1.

Таблица 1. Глубина и угол накатки согласно ГОСТ 21474-75

	Сталь	Цветные металлы и сплавы
Высота рифления h , мм	0,25, 0,7 P	0,25, 0,5 P .
Угол накатки a , град.	70	90

Наиболее часто применяемые размеры однополосных медных и алюминиевых шин составляют 120x10 мм, 120x12 мм, 100x12 мм. Далее в работе рассмотрим алюминиевую шину с поперечным сечением 120x10 мм. В соответствии с рекомендациями (см. табл. 1), принимаем накатку с прямым профилем, с углом $a = 90^\circ$ и высотой рифления 0,5 P . В зависимости от способа накатки и шага рифления площадь боковой поверхности будет увеличиваться на разную величину (рис. 1). Шину моделировали в системе КОМПАС. Расчет

площади боковой поверхности производился с помощью инструмента “длина кривой”, встроенного в систему КОМПАС в приближении единичного отрезка шины длиной 1 см.

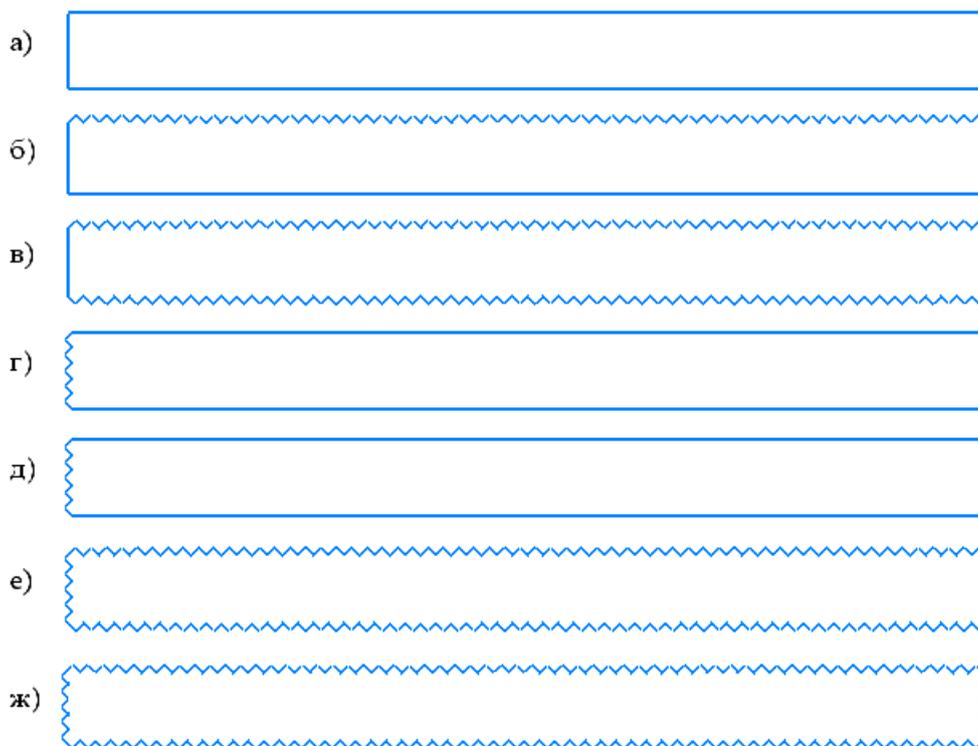


Рис.1. Поперечное сечение шины в разрезе:
а) без накатки; б-ж) способы накатки

Следует отметить, что при накатке, площадь поперечного сечения шины не уменьшается. Поэтому термическая устойчивость электротехнических шин к воздействию токов КЗ не меняется. Результаты увеличения площади боковой поверхности плоской шины на величину ΔF и повышения максимально допустимых значений тока ΔI_{\max} в зависимости от способа накатки поверхностей шины 120x10 мм приведены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение F и I_{\max} при накатке с шагом $P = 0,6$ мм

Способ накатки	а	б	в	г	д	е	ж
Высота рифления $h = 0,5 P$							
ΔF , %	0	19	38	1,5	3,1	39,6	41,3
ΔI_{\max} , %	0	9,1	17,5	0,8	1,5	18,2	18,9

Видно, что накатка электротехнических шин с поперечным сечением 120x10 мм позволяет увеличить площадь боковой до 41,3% по сравнению с исходной шиной без накатки. В свою очередь, согласно приведенной выше

зависимости (2), это приводит к увеличению пропускной способности неизолированных плоских силовых шин, при нормальном режиме эксплуатации, в 1,19 раз.

Список литературы

1. Токопроводы и шинопроводы. Вводный раздел // шинопровод.ру : сайт. – URL: <https://shinoprovod.ru/shinoprovod/> (дата обращения: 07.03.2025).
2. Потери энергии в электрических сетях и установках: учеб. пособие / Г. В. Маслакова, А. А. Митрофанов, Е. А. Чашин, Ю. А. Шурыгин. — Липецк : Издательство Липецкого государственного технического университета, 2018. — 79 с.

Molokin Yu.V., Mikhailov S.Z., Chashchin E.A.
**INCREASING THE THROUGHPUT OF NON-INSULATED FLAT
POWER BUSES**

Abstract. The paper proposes a method for increasing the throughput of electrical busbars operated in normal operation. Using the example of a flat, non-insulated power bus with a cross section of 120x10 mm, the possibility of increasing the maximum allowable current values by 1.9 times while maintaining constant thermal resistance to short-circuit currents is shown.

Keywords: tire, heating, side surface area, knurling, thermal balance.

Пелешенко В.А.
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И
ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ**

Аннотация. Статья посвящена исследованиям квантовых эффектов включая квантовую запутанность, когерентность и сверхпроводимость материалов с целью оценки их перспектив использования для хранения и передачи энергии в энергетическом секторе. В работе рассмотрены теоретические основы электричества в контексте квантовых эффектов и проанализированы существующие квантовые технологии. Основные выводы исследования включают описание факторов, препятствующих использованию квантовых эффектов в энергетике, и возможные пути их преодоления для выхода на качественно новый революционный виток развития энергетической отрасли.

Ключевые слова: передача энергии, хранение энергии, квантовые технологии, квантовые эффекты, когерентность, сверхпроводимость.

*“Электричество — не огонь.
В отличие от огня, это процесс не химический.
Хотя, разумеется, в самом огне между атомами
происходит электрическое взаимодействие.
Как и в любом другом происходящем в мире явлении”
Ричард Фейнман*

Введение

В настоящее время в мире вырабатывается и распределяется внутри электросети более 29 000 ТВт·ч (тераватт-часов) электроэнергии, которая обеспечивает работу более 60 млрд устройств, распределённых по 300 млн

предприятий, 2,5 млрд домохозяйств в общей сложности для 7 млрд человек. Сейчас, когда вы читаете эту статью, мир освещает более 150 млрд лампочек, работает более 1,5 млрд холодильников и более 2 млрд телевизоров. Всей этой мощи и разнообразию электроприборов и в целом имеющейся мировой энергосистеме мы обязаны второй промышленной революции, породившей массовую электрификацию и воплотившей в жизнь мечты и идеи Майкла Фарадея, Томаса Эдисона, Николы Тесла и многих других учёных. При этом большая часть электроприборов, которыми мы сейчас пользуемся в быту и которые существуют для промышленной генерации и передачи энергии, была разработана и запатентована ещё на заре 19 века на основе простых эмпирических законов таких как закон Ома, закон Ампера — Максвелла, Закон Джоуля — Ленца, закон Гаусса и т.д. После этого были третий и четвёртый виток промышленной революции. Мы вошли в мир информационных технологий, мир больших данных и мир искусственного интеллекта. Но заложенные каноны в электротехнике, включая наше понимание электричества и базовые принципы работы электроприборов, остались практически неизменны. Несмотря на то, что мы подчинили энергию атома большая часть электричества, по-прежнему вырабатывается на угольных электростанциях, а средний возраст эксплуатируемого сейчас оборудования энергосистемы превышает 45 лет. В частности, внутри Российской энергосистемы в настоящее время также задействованы электроагрегаты эксплуатируемые уже более 100 лет, к примерам оборудование малой Карельской ГЭС Хямекоски имеет возраст 109 лет. В общемировом масштабе более 800 млн человек по-прежнему вообще не имеют доступа к электричеству. При этом в таких европейских странах как Германия, Франция, Испания, Великобритания последние 10 лет несмотря на переход к электрифицированным экологически чистым видам транспорта и электрическому отоплению наблюдается спад производства электроэнергии и деградация электросистемы до уровня 80-х годов. В индустриально развитом высокотехнологичном Китае за счёт внедрения современных технологий напротив наблюдается экспоненциальный рост энергосистемы. На рисунке 1 представлена международная карта электрических мощностей:

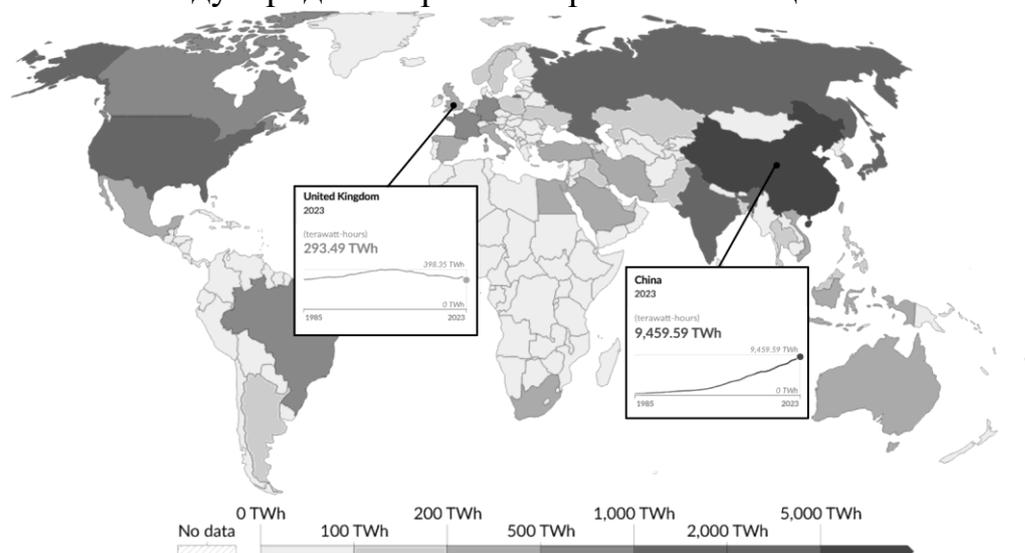
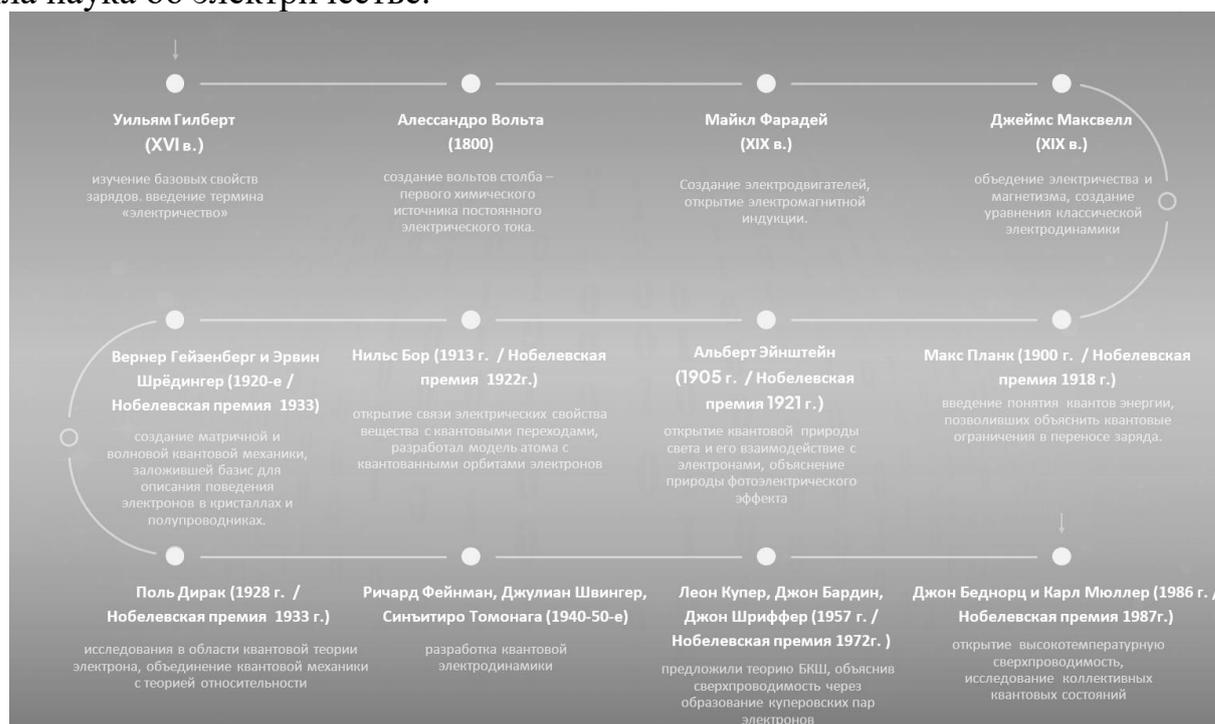


Рисунок 1. Международная карта электрических мощностей

Вход в эру международной гонки ИИ, внедрение блокчейн технологией, создание информационной экономики требует всевозрастающих энергетических ресурсов. Согласно текущей статистике современные дата-центры в среднем потребляют 800 ТВт·ч. с пиковой нагрузкой 1 050 ТВт·ч и ожидается что уже к 2030 году потребление вырастет более чем в 10 раз, а к 2040 году они потеснят все остальные секторы и их доля будет главенствующей в общем энергопотреблении. Таким образом современная энергетика стоит перед серьёзным вызовом, который невозможно решить старыми традиционными способами. Энергетической отрасли требуется обновление за счёт разработки, внедрения, применения и масштабирования новых технологий и подходов. Организацией Объединённых Наций 2025 год объявлен Международным годом квантовой науки и технологий. Как когда-то идеи Майкла Фарадея, Томаса Эдисона, Николы Тесла нашли воплощение в виде электрических машин и приборов создавших как таковую энергетику в нашем текущем её представлении, так и сейчас идеи изложенные в трудах Макса Планка, Альберта Эйнштейна, Эрвина Шредингера и Макса Борна наконец-то открывают завесу тайны над тем что такое материя и электричество на самом деле и над теми процессами которые происходят в нашем мире на уровне частиц и атомов находя реальное воплощение в современных материалах и устройствах. В данной статье рассмотрены квантовые технологии, как залог перехода энергетической отрасли на качественно новый виток технологического развития, который так необходим в наше время информационной революции больших данных и искусственного интеллекта.

Квантовые эффекты и понятие электричества

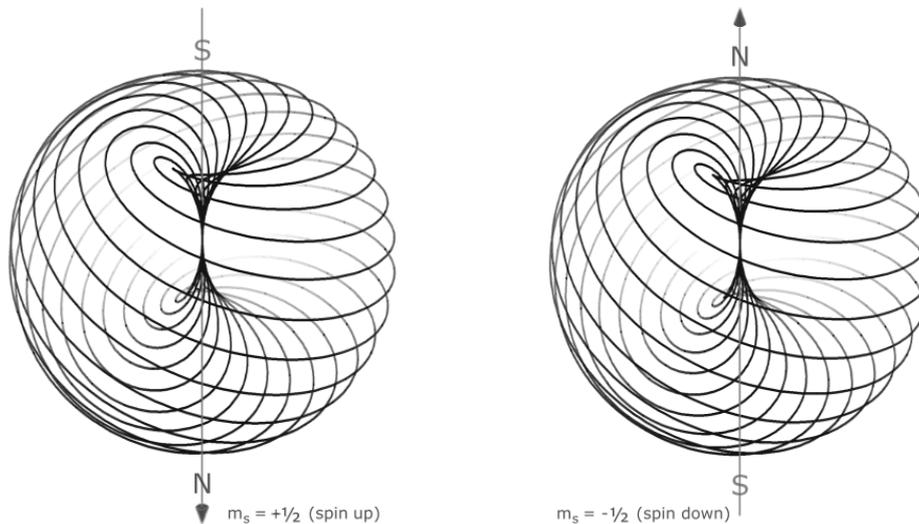
На рисунке представлены основные этапы дорожной карты, через которые прошла наука об электричестве.



Рисунке 2. Дорожная карта науке об электричестве

В тривиальном представлении электричество это упорядоченное движение электронов в металлическом проводнике. Привычно оперируя такими характеристиками электрического тока как напряжение, сила тока, сопротивление и т.д. Понимая при этом под термином «напряжение» отношение работы перемещения электрического заряда между двумя точками электрической цепи к значению самого заряда. Под термином «сила тока» - некую физическую величину равную прошедшему через поперечное сечение проводника заряду за некую единицу времени. А под термином «сопротивление» - физическую величину, характеризующую свойства проводника препятствовать свободному течению электрического тока. Мы связываем эти привычные величины основным законом теории электрических цепей – Законом Ома, согласно которому сила тока прямо пропорциональна напряжению, а также обратно пропорциональна сопротивлению проводника. Проведём мысленный эксперимент. Допустим мы имеем провод, через который мы хотим пропустить ток в 1 А. Это соответственно предполагает, что за 1 секунду через его сечение будет проходить заряд в 1 Кулон. Учитывая, что заряд одного электрона равен $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, для получения тока в 1 А необходимо чтобы за каждую секунду через его сечение проходило порядка $6,3 \cdot 10^{18}$ электронов. Если предположить, что сечение проводника составляет 1 мм^2 , а молярная масса эквивалента молярной массе меди 63,55 г/моль, а при этом согласно постоянной Авогадро – 1 моль вещества содержит $6,022 \cdot 10^{23}$ атомов, то таким образом в каждом грамме нашего вещества будет порядка $9,4 \cdot 10^{21}$ атомов. Если при этом предположить, что каждый атом имеет 1 свободный электрон участвующий в “упорядоченном движении электронов” при течении электрического тока, то для достижения силы тока в 1А нам для передачи заряда необходимо каждую секунду количество электронов, содержащихся в 0,00067 граммах нашего вещества. Предположим, что плотность используемого в проводнике вещества эквивалента плотности меди 0,0089 г/куб. мм. Тогда 0,00067 грамм вещества с $9,4 \cdot 10^{21}$ электронов необходимых для поддержания силы тока в 1А будет занимать объем 0,075 куб. мм. В итоге при сечении проводника 1 мм^2 мы будем иметь скорость течения тока 0,075 мм/с. Если учесть, что в среднем удаление электростанций от дома равно 25 км, а от лампочки до выключателя 7м, то при такой скорости электроны от электростанции доберутся до вашего дома только не ранее чем через 10 лет, а лампочка после нажатия на выключатель загорится только на следующие сутки. Но, естественно, так не происходит. Привычному молниеносному распространению электричества со скоростью эквивалентной скорости света со значением 299 792 458 м/с мы обязаны в первую очередь квантовым эффектам, при которых электроны проявляют корпускулярно-волновые свойства, и являются таким образом одновременно как волной, так и частицей при этом обладая собственной массой, зарядом, спином и магнетизмом, вступая за счёт этого в активные сложные взаимодействия. Истинная природа электрона до сих пор таит много загадок и изучается. В частности, мало исследованы и противоречивы размеры, форма и поведение электрона. Первая фотография электрона была получена только в 2008 году, а трёхмерная модель электрона с

приблизительным расположением составляющих его элементарных частиц только в 2023 году. На рисунке 3 показана разработанная на языке Python с использованием библиотек Manim и Matplotlib квантовая спин-орбитальная модель электрона.



Рисунке 3. Спин-орбитальная модель электрона

Электрон представлен в виде его двух состояний со спином $+1/2 \hbar$ и $-1/2 \hbar$. Спин (от английского spin — «вращение») - собственный момент количества движения, иначе момент импульса электрона или внутренний угловой момент его вращения. Тем не менее это не является вращением в классическом смысле и не связано с перемещением частицы как нечто целого ввиду того, что электрон в рамках стандартной квантовой модели считается точечным объектом, не имеющим собственного размера. Если говорить обобщённо, то квантовая характеристика спина это внутреннее квантовое свойство, а не результат движения частицы. В частности, её можно выразить как внутреннюю степень свободы частицы, аналогично заряду или массе, и она обозначается в единицах постоянной Дирака (\hbar), на которой базируется уравнение Дирака [1]. В релятивистской ковариантной форме оно имеет вид:

$$(i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu - mc^2)\psi = 0,$$

(1)

где:

γ^μ — матрица Дирака, удовлетворяющая алгебре Клиффорда;

∂_μ — ковариантная производная по координатам x_μ ;

m — масса частицы (электрона);

ψ — 4-компонентный дираковский спинор, описывающий частицу со спином $1/2$;

\hbar — частное из величины постоянной Планка по 2π , имеющее размерность действия (энергия \times время) с приблизительным значением $\approx 1.0545718 \times 10^{-34}$ Дж·с.

В сочетании с уравнениями Максвелла данное уравнение создаёт основу для описания релятивистских квантовых явлений включая взаимодействие

электронов с электромагнитным полем, взаимодействие света при столкновении с электроном, и объясняет явление электрон-позитронных пар из высокоэнергетических фотонов. В данной работе в большей степени рассматриваются квантовые эффекты для хранения и передачи энергии на основе представленной модели электронов. Однако в электрическом токе, рассматриваемом в широком смысле как направленное движение носителей электрического заряда, носителями также могут выступать катионы и анионы в электролитах и ионы в газовой среде. В квантовой электродинамике наряду с электроном рассматриваются позитроны - античастицы электронов, фотоны — кванты электромагнитного поля и т.д. “Стандартная модель” элементарных частиц, включающая частицы, обеспечивающие электромагнитное, слабое и сильное взаимодействие, представлена на рисунке 4:

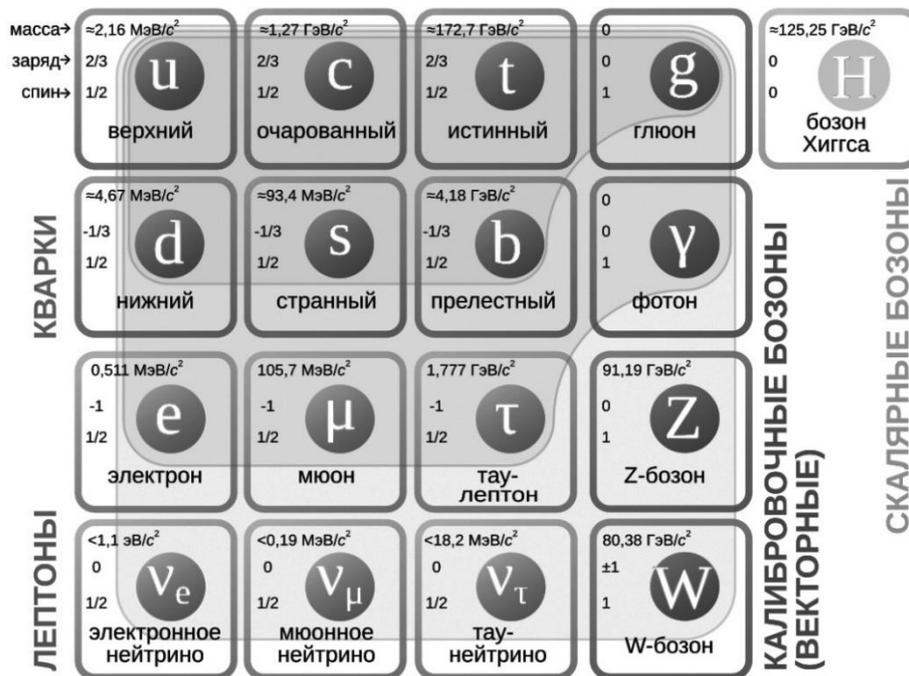


Рисунок 4. Стандартная модель элементарных частиц

Хранение и передача энергии

Вернёмся к нашему мысленному эксперименту с проводником. Для обеспечения течения электрического тока как направленного движения электронов необходимо чтобы каждый электрон получал некую кинетическую энергию. При этом исходя из вышеизложенного определения напряжения, энергия будет являться произведением напряжения на заряд электрона. Учитывая, что кинетическая энергия электрона представляет собой произведение квадрата его скорости на $1/2$ массу, которую мы будем считать неизменной, то приравняв кинетическую энергию электрона к произведению напряжения на заряд электрона, которую мы также будем считать неизменной величиной, мы получим что скорость электронов будет пропорциональна корню из электрического напряжения. Ранее мы представили, что сила тока имеет линейную зависимость от скорости электронов. Таким образом сила тока должна быть прямо пропорциональна корню из напряжения, что коррелирует с ошибочным законом Барлоу предложенным в 1824 году до выведения закон Ома,

что абсолютно неверно и что проверяется на простейших практических электрических опытах. Проводники “сопротивляются” свободному перемещению электронов ограничивая его через взаимодействие внутри кристаллических решёток. В частности, в до квантового представления с точки зрения классических физических законов это объяснилось тем, что металл рассматривался как неподвижная решетка положительных ионов, с которой неминуемо через время релаксации – τ , происходило столкновение электронов участвующих в переносе заряда электрического тока [2]. При этом, согласно экспериментальным данным, время релаксации приблизительно составляет $\sim 10^{-14}$ с. Введение времени релаксации позволяет перейти к дрейфовой скорости электронов, которая объясняет линейную зависимость тока от напряжения. Также это объясняет нагрев проводников за счет того, что электроны, обладающие дрейфовой скоростью, передают ионам кристаллической решетки проводника часть своей кинетической энергии. При течении электрического тока сопутствующий нагрев проводников неизбежно приводит к потерям. В целом энергетические потери внутри энергосистемы довольно разнообразны, и не только тепловые, а также происходят на всех этапах как при продуцировании энергии на электростанциях, так и при её преобразовании и передачи в линиях электропередач (ЛЭП), трансформаторах, распределительных сетях и т.д. Если при этом ориентироваться только на то, что часть электроэнергии теряется из-за сопротивления преобразовываясь в тепло, то в мировом масштабе на основе закона Джоуля-Ленца, приблизительные расчёты показывают, что общемировые потери составляют порядка 1500 ТВт·ч ежегодно, что близко к суммарному потреблению всех стран Европы. При этом стоит отметить, что качество используемых материалов и в целом качество энергосистемы в разных странах также различно. В развитых странах тепловые потери при передаче электричества выше, чем в развивающихся. Так, к примеру в Индии потери достигают 25%, а в Японии, где уже внедрены современные разработки, они составляют всего 7%.

Снижение сопротивления и тепловых потерь является сильным рычагом для увеличения эффективности электросистем. Если вернуться к нашему мысленному эксперименту, то за счет ранее упомянутого корпускулярно волнового дуализма электрон обладая волновыми свойствами должен обходить сопротивление, вызванное физическим взаимодействием электронов как частиц внутри кристаллической решётки проводников, позволяя им двигаться беспрепятственно, подобно свету в оптически однородной прозрачной среде. Если оперировать только волновыми свойствами это представляется теоретически возможным, но при условии идеальной однородной и неподвижной кристаллической решётки проводников, что является трудно достижимым на практике ввиду её фактической неоднородности, из-за дефектов и примесей, и фактической подвижности за счёт тепловых колебаний в условиях реальных эксплуатационных температур. При этом если вернуться к определению электронов как к свободным частицам обеспечивающих перенос заряда встаёт следующий риторический вопрос о том, как в стабильном

“холодном” веществе обладающем “прозрачностью” с точки зрения волновых свойств, добиться появления достаточно “горячих” электронов, обладающих необходимым количеством энергии, близким к уровню Ферми и способным осуществить переход на внешние энергетические уровни с удалением от связей ограничивающих их атомов для осуществления “упорядоченного движения” и переноса заряда для достижения явления электрического тока.

Сверхпроводимость и квантовые батареи

Известно, что сопротивление проводника увеличивается при его нагреве:

$$R(T)=R_0\cdot[1+\alpha\cdot(T-T_0)]$$

(2)

где:

R_0 — сопротивление при температуре T_0 ;

α — температурный коэффициент сопротивления;

T — конечная температура.

Ранее приведённая классическая физика не смогла в полной мере описать это явление, и в целом дать объяснение в отношении процессов, происходящих в проводниках, связанных с термодинамикой и в частности теплоемкости. В этой стезе современный квантовый подход в рамках Модели Эйнштейна для твердых тел и модели Дебая предполагающий, что обмен энергией в интегральных единицах или квантах исходя из квантового представления об электроне даёт более глубокое понимание этих процессов и привёл к практическим результатам в этой области в виде современных сверхпроводящих материалов. Из вышеприведенной формулы и описания свойств кристаллической решётки проводников очевидно, что понижение температуры должно способствовать понижению сопротивления. В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,1 К резко падает до нуля. Также было обнаружено что сверхпроводники полностью выталкивают магнитное поле из своего объема - Эффект Мейснера.

Современное квантовое обоснование сверхпроводимости предполагает наличие связанности состояний двух электронов, возникающее в сверхпроводниках благодаря слабому притяжению между ними. Это явление называется Кемеровской парой и является ключевым элементом теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) [3]. В обычных условиях электроны отталкиваются из-за кулоновского взаимодействия. Однако в сверхпроводниках при низких температурах первый электрон, двигаясь через кристаллическую решетку, деформирует её, создавая область повышенной положительной заряженности, а второй электрон притягивается к этой области, эффективно взаимодействуя с первым электроном через колебания решетки. Таким образом для данного эффекта необходимо наличие электронов с противоположными импульсами (k и $-k$) и спинами ($\uparrow\downarrow$). При этом конденсат Бозе-Эйнштейна из куперовских пар движется без потерь энергии, так как рассеяние на дефектах решетки требует разрушения пар (на что нет энергии при $T < T_c$). Свойства сверхпроводников делают их идеальным материалом для создания кабелей для

передачи энергии без потерь, а также для создания эффективных накопителей энергии и магнитов. Однако они сложны в обработке и эксплуатации и требуют дорогостоящего энергозатратного охлаждения и слабо устойчивы. Тем не менее их негативные свойства пытаются обойти за счет поиска высокотемпературных сверхпроводников (Рис.5).

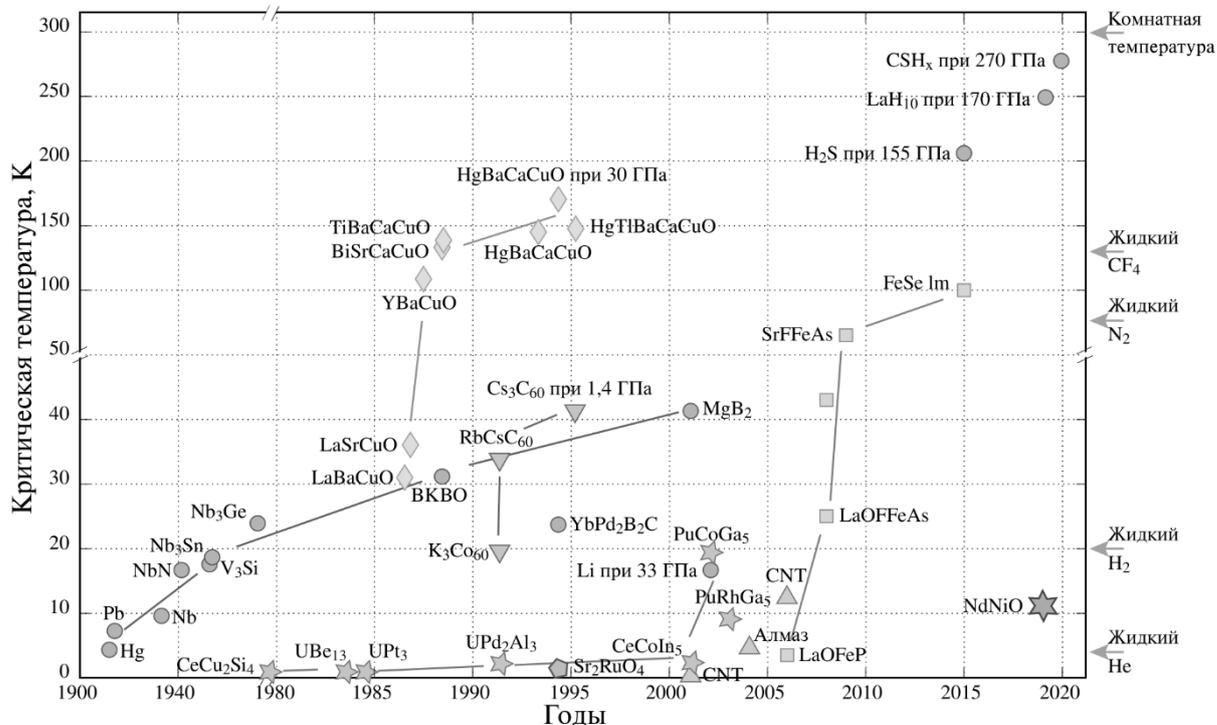


Рисунок 5. График открытий сверхпроводимости с 1900 по 2020 годы

На текущий момент самым многообещающим материалом является LK-99 полученный на основе свинца, фосфора и кислорода с частичным замещением ионов меди [4]. В 2023 году корейские исследователи заявили о том, что LK-99 обладает сверхпроводимостью при комнатных температурах и нормальном атмосферном давлении. Сверхпроводимость LK-99 обусловлена деформацией его структуры с замещением ионов Cu^{2+} на ионы $\text{Pb}^{2+(2)}$, с изолированием атомами фосфата свинца, что вызывает напряжение, передающееся цилиндрической колонне атомов $\text{Pb}(1)$, вызывающее её искажение с образованием сверхпроводящих квантовых ям (SQWs) - гибридных наноструктур, сочетающих свойства сверхпроводимости с квантовыми ограничениями (Рис.6).

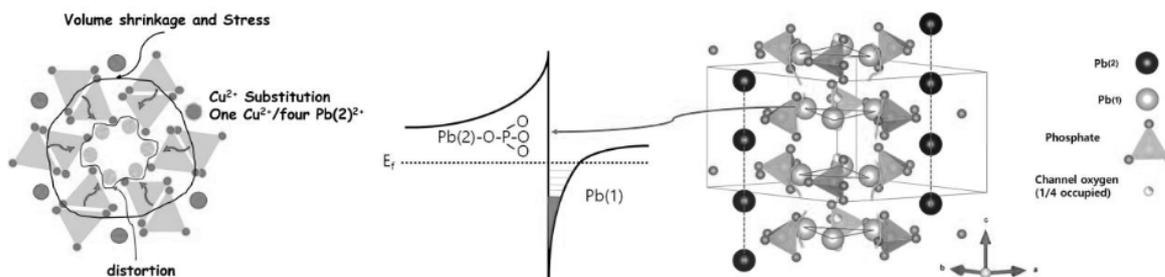


Рисунок 6. Структура LK-99

Подобные коллективные квантовые эффекты помимо эффективной передачи энергии также пригодны для хранения энергии. Известно, что ансамбль квантовых систем (например, атомов) взаимодействует с электромагнитным полем, демонстрируя усиленное излучение [Дике]. Это явление может быть адаптировано в контексте квантовых батарей для управления энергией. Ансамбль из N квантовых элементов (например, двухуровневых систем) может находиться в запутанных состояниях, что приводит к синергетическим эффектам. Энергия сохраняется не в отдельных элементах, а в их коллективных модах. Таким образом, возможно добиться как сверхизлучения так и сверхпоглощения. При сверхизлучении ансамбль излучает энергию с интенсивностью, пропорциональной N^2 , а не N как при отсутствии связанности. При сверхпоглощении наблюдается коллективное поглощение энергии из внешнего поля, что позволяет существенно ускорить заряд батареи. При этом явление квантовой когерентности позволяет преодолевать классические физические ограничения обычных электробатарей. В практической реализации структура квантовых батарей представляет двухуровневые системы квантовых битов, связанных с общим фотонным полем (резонатором). Зарядка осуществляется через резонатор, возбуждая коллективные моды системы с ускорением передачи энергии за счёт сверхпоглощения. Разрядка осуществляется при подключении нагрузки, при которой коллективные состояния распадаются, высвобождая энергию через сверхизлучение. При этом в целом эффективность и скорость зарядки квантовых батарей зависит от количества связанных квантовых блоков. Если, к примеру провести аналогию со стандартным аккумулятором телефона емкостью 4000 мА·ч и реализовать его из 10 000 связанных квантовых блоков, то его скорость полной зарядки будет менее 1 с.

Заключение

В подтверждение практической реализуемости квантовых эффектов для хранения и передачи энергии стоит отметить, что уже более 10 лет назад было доказано, что на начальных этапах фотосинтеза в бактериях и растениях работают квантовые эффекты [5]. Поглощённый фотон генерирует электронное возбуждение в пигмент-белковых комплексах, и это возбуждение с почти 100% эффективностью мигрирует к реакционному центру фотосистемы. Это является наглядной демонстрацией квантовой когерентности как согласованного волнового поведения возбуждённых состояний в биологических энергетических

процессах. Внедрение сверхпроводников и квантовых батарей способно радикально преобразовать ключевые элементы энергетики, создав основу для устойчивой, высокоэффективной и долговечной энергосистемы будущего.

Список литературы

1. Дирак П. А. М. Релятивистское волновое уравнение электрона // Успехи физических наук. — 1979. — Т. 129, вып. 4. — С. 681—691.
2. Друде Пол (1900). "Zur Elektronentheorie der Metalle". Annalen der Physik. 306 (3): 566–613.
3. Боголюбов Н. Н. О новом методе в теории сверхпроводимости (неопр.) // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1958. — Т. 34(1). — С. 58.
4. The first room-temperature ambient-pressure superconductor S Lee, JH Kim, YW Kwon arXiv preprint arXiv:2307.12008, 2023 arxiv.org
5. E. Romero et al. Quantum coherence in photosynthesis for efficient solar-energy conversion // Nature Physics. 2014. Advanced online publication. DOI:10.1038/nphys3017.

Vitaliy Peleshenko

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Annotation. The article is devoted to the research of quantum effects including quantum entanglement, coherence and superconductivity of materials in order to assess their prospects for use for energy storage and transmission in the energy sector. The paper examines the theoretical foundations of electricity in the context of quantum effects and analyzes existing quantum technologies. The main conclusions of the study include a description of the factors hindering the use of quantum effects in the energy industry, and possible ways to overcome them in order to enter a qualitatively new revolutionary stage in the development of the energy industry.

Keywords: energy transfer, energy storage, quantum technologies, quantum effects, coherence, superconductivity.

Соловьева Т.А.

ПОЛЕВОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ: ТЕХНОЛОГИИ, ОСОБЕННОСТИ, ПРИМЕНЕНИЕ

Научный руководитель: Зажигин В.В.

Аннотация. В статье рассматриваются войсковые источники электроэнергии, их классификация, технические характеристики и практическое применение в военной инфраструктуре. Основное внимание уделено электроагрегатам и силовым электростанциям. На примере генератора ЭД-30 подробно анализируются такие параметры, как радиус обслуживания, время работы и расход топлива при различных нагрузках. Приводятся рекомендации по повышению эффективности эксплуатации генераторов, включая выбор сечения кабеля и распределение нагрузки. Статья также затрагивает вопросы повышения надежности электроснабжения в полевых условиях за счет использования быстровозводимых сетей и интеграции с существующими распределительными системами.

Ключевые слова. Радиус обслуживания, время работы, расход топлива, потери напряжения, военная инфраструктура, надежность электроснабжения, быстровозводимые сети.

Введение

Электроэнергия является одним из ключевых ресурсов, обеспечивающих функционирование военной инфраструктуры как в мирное, так и в военное время. Войсковые источники электроэнергии, такие как электроагрегаты и силовые электростанции, играют важную роль в обеспечении бесперебойного энергоснабжения мобильных и стационарных объектов.

1. Классификация войсковых источников электроэнергии

Войсковые источники электроэнергии делятся на две основные категории:

1. Электроагрегаты:

- Автономные устройства, состоящие из двигателя внутреннего сгорания и генератора, смонтированных на общей раме.
- Оснащены щитом управления и вспомогательным оборудованием.
- Могут работать на бензине или дизельном топливе.
- Используются для питания комплексов вооружения, инженерной техники и систем освещения.

2. Силовые электростанции:

- Предназначены для электроснабжения крупных объектов.
- Выпускаются мощностью от 8 до 500 кВт.
- Обеспечивают переменный трехфазный ток напряжением 220 или 380 В и частотой 50 или 400 Гц.
- Включают в себя электроагрегат, кабели для подключения нагрузки и автоприцеп для транспортировки [2].

2. Проблемы полевого электроснабжения

Несмотря на широкое применение автономных источников энергии, полевые энергосистемы сталкиваются с рядом проблем:

1. Ограниченный радиус обслуживания:

Длина кабелей ограничивает расстояние между генератором и потребителями.

Потери напряжения при увеличении длины кабеля снижают эффективность системы.

2. Низкая надежность:

Выход из строя генератора или повреждение кабеля может привести к полному отключению электроэнергии.

3. Сложность масштабирования:

Подключение новых потребителей требует прокладки дополнительных линий, что увеличивает время и затраты.

4. Зависимость от топлива:

Генераторы требуют постоянного запаса топлива, что усложняет логистику.

Рассмотрим пример расчета радиуса обслуживания и время работы для генератора ЭД-30.

Технические характеристики генератора ЭД-30

Генераторная машина ЭД-30 имеет следующие основные характеристики:

- Номинальная мощность: 30 кВт.

- Напряжение: 400 В (3-фазное) или 230 В (1-фазное).
- Ток: до 43,5 А (при 400 В и полной нагрузке).
- Расход топлива: 7 л/ч (при 75% нагрузке) и 11,4 л/ч (при 100% нагрузке).

Эти параметры определяют, какую нагрузку может обслуживать генератор и на каком расстоянии.[3]

Сравним время работы генератора ЭД30 при 75% нагрузке (расход топлива 7 л/ч) и при 100% нагрузке (расход топлива 11,4 л/ч) для бака объемом 150 литров.

1. 75% нагрузка:

– Расход топлива: 7 л/ч.

– Время работы:

$$t = \frac{\text{Объем бака}}{\text{Расход топлива}} \quad (1)$$

$$t = \frac{150}{7} = 21,43 \text{ часов (21 час и 26 минут)}$$

2. 100% нагрузка:

– Расход топлива: 11,4 л/ч.

– Время работы:

$$t = \frac{150}{11,4} = 13,6 \text{ часов (13 часов и 10 минут).}$$

Таблица №1

Параметр	75% нагрузка	100% нагрузка
Расход топлива (л/ч)	7,0	11,4
Время работы (часы)	21,43	13,16
Время работы (часы:мин)	21 час 26 минут	13 часов 10 минут
Эффективность	Меньше расход, дольше работа	Больше расход, меньше работа

Графическое сравнение:

На графике ниже показана зависимость времени работы от запаса топлива для двух режимов нагрузки:

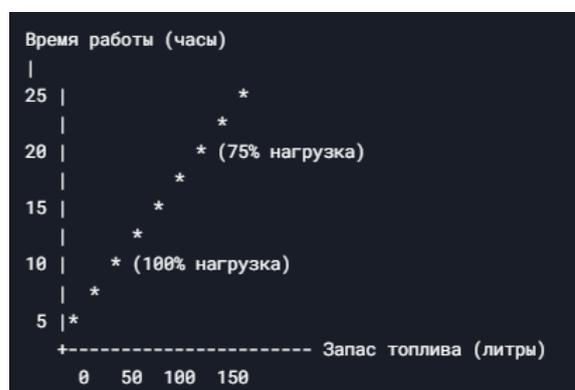


Рисунок 1 – зависимость времени работы от запаса топлива для двух режимов нагрузки

1. При 75% нагрузке:

Генератор работает дольше (21,43 часа) на том же объеме топлива (150 литров).

2. При 100% нагрузке:

Генератор работает меньше (13,16 часа) на том же объеме топлива (150 литров).

Длина кабеля и потери напряжения

Чем длиннее кабель, тем больше потери напряжения. Для минимизации потерь важно правильно выбрать сечение кабеля. Например, для тока 43,5 А и допустимых потерь 5%:

– Сечение кабеля: 10 мм² (для длины до 100 м).

– Максимальная длина кабеля: 150–200 м (при увеличении сечения до 16 мм²).

Расчет радиуса обслуживания

Рассмотрим пример расчета радиуса обслуживания для генератора ЭД-30.

Для наглядности приведем графики, иллюстрирующие зависимость радиуса обслуживания от длины кабеля и сечения.

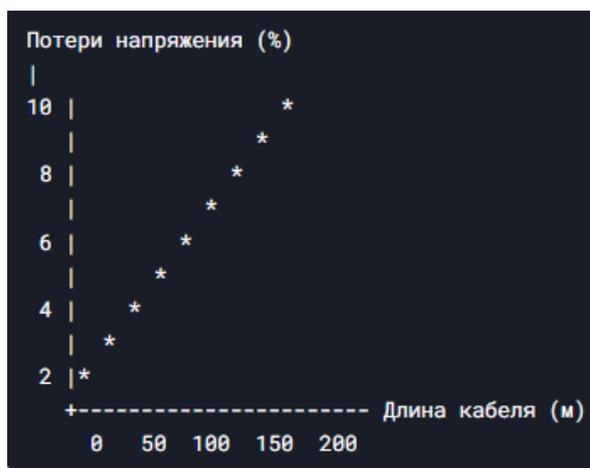


Рисунок 2 – Зависимость потерь напряжения от длины кабеля

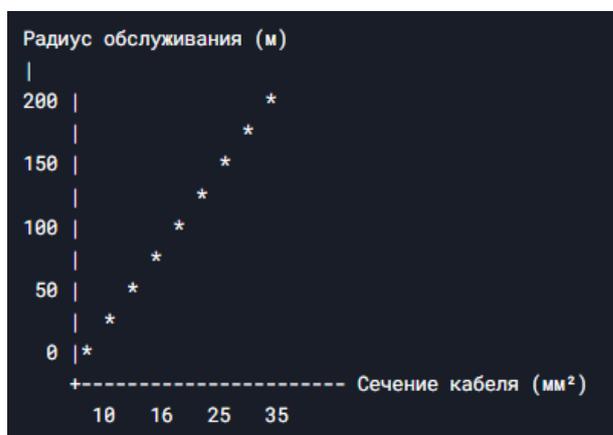


Рисунок 3 – Зависимость радиуса обслуживания от сечения кабеля

3. Быстровозводимые сети как решение проблем

Быстровозводимые сети — это модульные системы, которые позволяют оперативно создавать временные энергосети с минимальными затратами времени и ресурсов.

Преимущества быстровозводимых сетей:

- Высокая скорость развертывания;
- Масштабируемость;
- Возможность подключения новых потребителей без значительных изменений в существующей сети.

Список литературы

1. Учебник сержанта инженерных войск / под общ. ред. И. И. Сердцева; М-во обороны Рос. Федерации. — М. : [б. и.], 2004. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — Ответственный исполнитель: полковник Н. М. Комаровский; научный руководитель: генерал-майор В. С. Петрук.
2. Энциклопедический словарь Министерства обороны Российской Федерации [Электронный ресурс]. — URL: <https://encyclopedia.mil.ru/encyclopedia/glossary.htm?f=2026&blk=10327975&objInBlock=25> (дата обращения: 10.10.2023).
3. Дизель-генераторные установки: руководство по эксплуатации. — М. : [б. и.], [б. г.]. — 120 с

Solovyova T.A.

FIELD POWER SUPPLY: TECHNOLOGIES, FEATURES, APPLICATIONS

Scientific supervisor: Zazhigin V.V.

Abstract. The article examines military power sources, their classification, technical characteristics, and practical application in military infrastructure. The primary focus is on electric units and power plants. Using the ED-30 generator as an example, parameters such as service radius, operating time, and fuel consumption under varying loads are analyzed in detail. Recommendations are provided to improve generator efficiency, including selecting cable cross-sections and optimizing load distribution. The article also addresses enhancing power supply reliability in field conditions through the use of rapidly deployable networks and integration with existing distribution systems.

Keywords. Service radius, operating time, fuel consumption, voltage losses, military infrastructure, power supply reliability, rapidly deployable networks.

Сороченко П. А., Долгаль С. В.

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4 КВ

Аннотация. В эпоху технологического прогресса и увеличения потребностей в электроэнергии, вопрос повышения качества электроснабжения становится актуальным для большинства потребителей. Данная статья предлагает анализ эффективности использования накопителей электроэнергии на уровне 0,4 кВ, исследуя их роль в распределительных сетях. Рассматриваются различные технологии аккумулирования энергии, их преимущества и недостатки, с акцентом на электрохимические накопители. Также представляется пример

внедрения систем накопления электроэнергии (СНЭ) на базе ПАО «Россети Центр» - «Воронежэнерго» и их влияние на улучшение качества электроснабжения и повышение энергоэффективности.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, система электроснабжения, повышение качества электроснабжения, повышение эффективности.

В современном мире, когда происходит активное развитие технологий и масштабирование производств, спрос на электроэнергию значительно возрастает с каждым годом. В то же время повышаются требования к качеству электроэнергии у потребителей и ужесточаются требования по энергоэффективности внутри сетевых организаций. Одним из решений является использование накопителей электроэнергии 0,4 кВ, [1].

Целью данной работы является анализ эффективности использования накопителей электроэнергии в распределительных сетях 0,4 кВ и перспектив их применения в будущих проектах.

Существует целый ряд технологий аккумулирования электроэнергии. На рисунке 1 приведены наиболее распространенные типы накопителей электроэнергии.

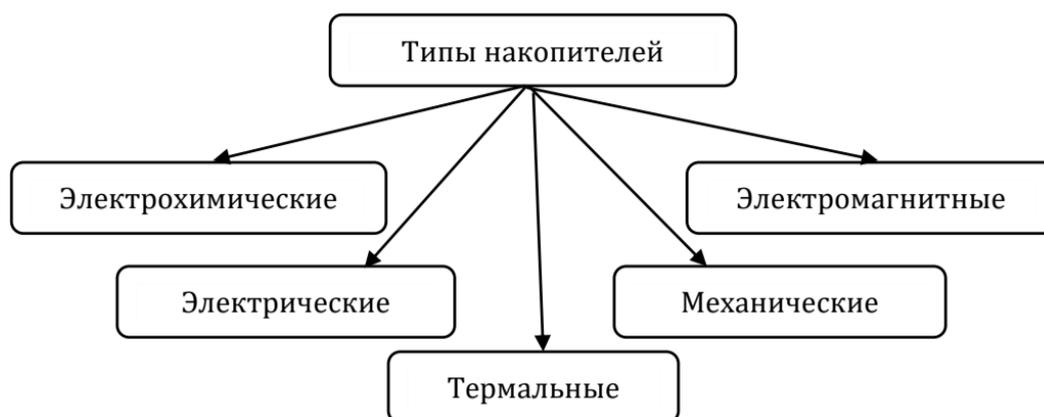


Рисунок 1 – Типы накопителей электроэнергии

В ходе анализа использования типов накопителей было выявлено, что в качестве накопителей электроэнергии небольшой мощности в более чем 98 % случаев используются электрохимические накопители, [2].

В таблице 1 приведены основные преимущества и недостатки различных типов накопителей.

Таблица 1 – Свойства различных типов электрохимических накопителей

Тип накопителя	Преимущества	Недостатки
Свинцово-кислотные (Lead-Acid)	- сравнительно низкая скорость саморазряда;	- токсичные материалы; - низкая плотность электроэнергии (Втч/л)
Никель-кадмиевые (Ni-Cd)	- широкий температурный диапазон; - высокая плотность электроэнергии (Втч/л)	- сравнительно большие габариты;

		- высокая скорость саморазряда;
Литий-ионные (Li-Ion)	- высокая плотность электроэнергии (Втч/л); - надежность (большой количество циклов)	- высокая стоимость; - вероятность перегрева
Натрий-серные (Sodium-sulfur)	- надежность (большой количество циклов); - высокая плотность электроэнергии (Втч/л)	- пожароопасны
Литий-железо-фосфатные (LiFePO4)	- широкий температурный диапазон; - надежность (большой количество циклов);	- низкая плотность электроэнергии (Втч/л); - высокая стоимость
Графеновые	- надежность (большой количество циклов); - быстрая отдача электроэнергии	- низкая плотность электроэнергии (Втч/л); - высокая стоимость

Свинцово-кислотные аккумуляторы в различных исполнениях (с жидким или загущенным электролитом) повсеместно используются в качестве накопителей электроэнергии на объектах, где требуется запастись сравнительно небольшое количество электроэнергии, [3]. В энергетике основные объекты – это подстанции и все чаще встречаются накопители в распределительных сетях 0,4 кВ.

На любом графике нагрузки можно выделить участки, где присутствует неравномерность. Коэффициент неравномерности характеризует неравномерность графика нагрузки во времени и определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{P_{min}}{P_{max}},$$

где P_{max} , P_{min} – максимальное и минимальное значение потребляемой мощности.

Использование накопителей в распределительных сетях 0,4 кВ позволяет модернизировать сеть с минимальными вложениями и без реконструкции сети, [4].

Цели применения накопителей электроэнергии:

1) Обеспечение категории надежности потребителей. В таком случае накопитель электроэнергии используется как второй – независимый источник питания;

2) Повышение качества электроснабжения и энергоэффективности. В случае установки накопителя в нагруженных ЛЭП, в часы максимальной нагрузки накопитель будет постепенно разряжаться, тем самым поддерживая напряжение на необходимом уровне. При этом, поддержание определенного уровня напряжения способствует снижению потерь.

В филиале ПАО «Россети Центр» - «Воронежэнерго» постепенно внедряются системы накопления электроэнергии (СНЭ). На данный момент установлено 2 СНЭ. Одна система используется для обеспечения 2 категории

надежности электроснабжения потребителей. Вторая – для повышения качества электроснабжения за счет сглаживания графика нагрузки.

Параметры накопителей приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики СНЭ

Наименование параметра	Значение
Тип источника тока	Литий-ионная
Запасаемая электроэнергия, кВт·ч	40
Номинальное выходное напряжение, В	799,2
Максимально допустимое выходное напряжение, В	907,2
Минимально допустимое выходное напряжение, В	648,0

Далее рассмотрен пример использования СНЭ в сети 0,4 кВ. Цель использования – выравнивание графика нагрузки и повышение качества электроснабжения потребителей.

На рисунке 2 приведен график нагрузки ВЛ 0,4 кВ, пролегающей по территории небольшого районного центра. На данном графике наглядно видно, что СНЭ позволяет значительно снизить коэффициент неравномерности, что положительно сказывается на энергоэффективности передачи электроэнергии

Максимальный ток ВЛ 0,4 кВ за день замера – 127,6 А, минимальный – 89,3 А.

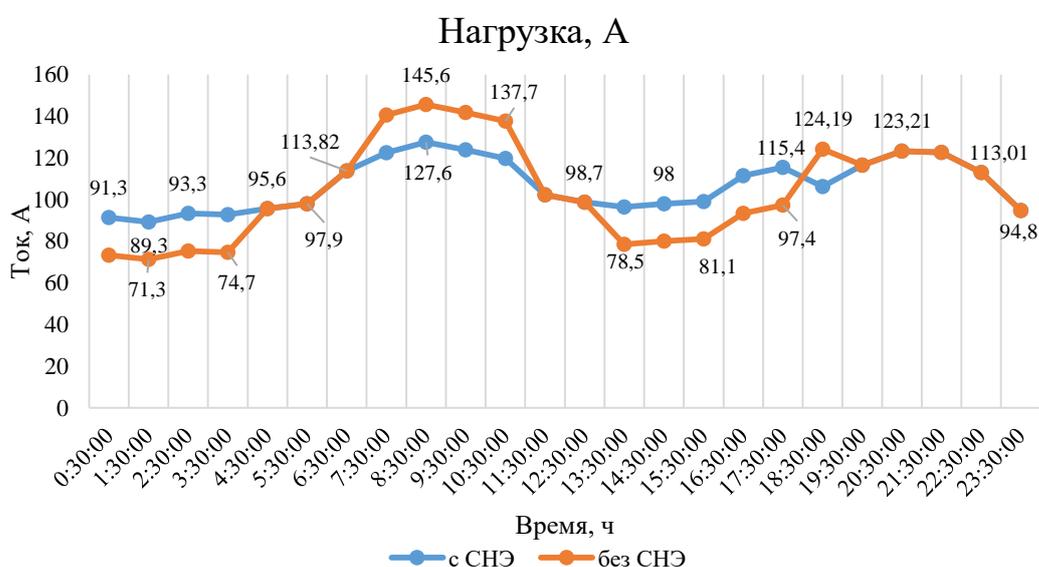


Рисунок 2 – Нагрузка ВЛ 0,4 кВ

Время начала и окончания циклов заряда и разряда СНЭ заданы следующим образом:

- 1) Цикл заряда – с 0:00 до 7:00;
- 2) Цикл разряда – с 07:00 до 10:00;
- 3) Цикл заряда – с 13:00 до 18:00;
- 4) Цикл разряда – с 18:00 до 22:00.

На рисунке 3 приведен график уровня заряда СНЭ в течении суток.

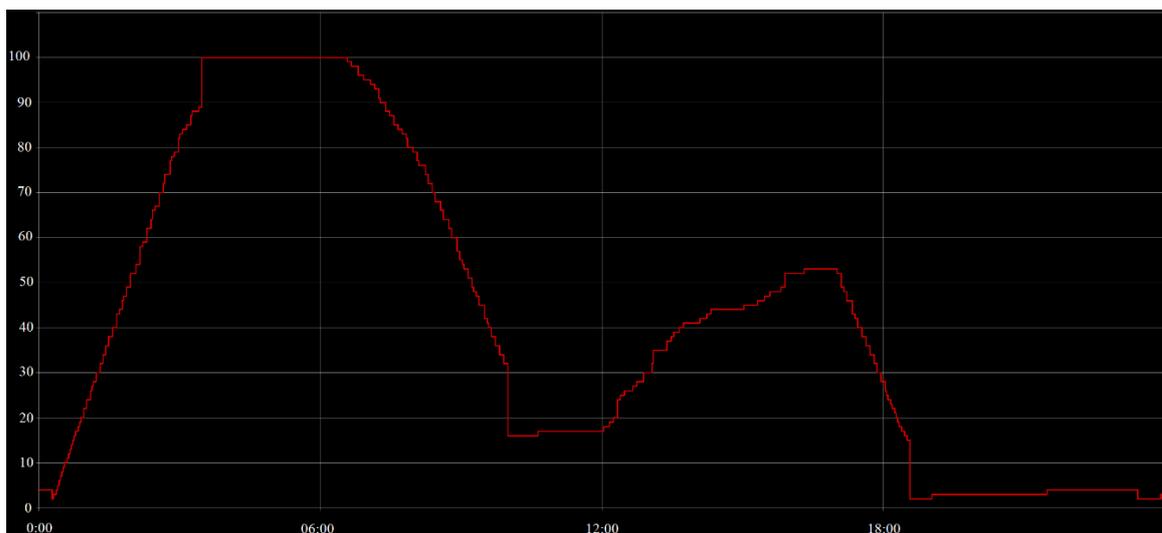


Рисунок 3 – График уровня заряда СНЭ

Анализ графика показал, что запасенной электроэнергии в ночное время суток хватает для покрытия утреннего максимума нагрузки. Однако, при дневном цикле заряда, заряд периодически блокировался автоматикой, которая контролирует снижение напряжения ВЛ 0,4 кВ, в связи с чем, СНЭ перед вечерним максимум была заряжена не полностью.

При прохождении вечернего максимума, вплоть до 00:00 следующих суток, заряд также был заблокирован автоматикой.

Суммарная отдача СНЭ за сутки составляет 58,3 кВт·ч.

Таким образом, в данной статье были рассмотрены различные типы накопителей, отмечены их преимущества и недостатки. Подробнее были рассмотрены СНЭ с электрохимическими накопителями.

Детально был рассмотрен пример реального использования СНЭ в сети 0,4 кВ. Анализ графика нагрузки (рисунок 2) показал, что установка СНЭ позволяет повысить коэффициент неравномерности графика нагрузки с 0,49 до 0,7, что означает более равномерную загрузку силового трансформатора и, как следствие, более оптимальный режим работы сети в целом.

Также выявлен факт недозаряда СНЭ в дневное время суток. В связи с этим, в период вечернего максимума вся нагрузка приходится на силовой трансформатор.

Дальнейшее развитие систем накопления электроэнергии, в том числе использование наиболее современных типов аккумуляторов позволит значительно повысить эффективность использования СНЭ за счет сокращения времени заряда.

Список литературы

1. Мухаметова Л.Р., Ахметова И.Г., Стриелковски В. Инновации в области хранения энергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Том 21, No 4. С. 33-40.
2. Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions / M. Chen, Y. Zhang, G. Xing и др. // Energy & Environmental Science. 2021. Том 14, No 6. С. 3323-3351.

3. Сороченко П. А. Разработка и исследование модели системы распределенной генерации с применением Simulink // Материалы XIV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. С. 123-126.

4. Жилин Е. В., Долгаль С. В., Малышева А. Д. Перспективы применения накопителей электроэнергии в энергетических системах // Энергетические системы. С. 32-41.

Sorochenko P. A., Dolgal S. V.
**MODERN APPROACH AND PROSPECTS OF USING ENERGY
STORAGE DEVICES IN 0.4 KV DISTRIBUTION GRIDS**

Annotation. In the era of technological progress and increasing electricity demand, the issue of improving the quality of electricity supply becomes relevant for most consumers. This paper offers an analysis of the efficiency of energy storage devices at the 0.4 kV level, investigating their role in distribution networks. Different energy storage technologies, their advantages and disadvantages are considered, with emphasis on electrochemical storage systems. The paper also presents an example of the implementation of energy storage systems (ESS) on the basis of PJSC “Rosseti Center” - “Voronezhenergo” and their impact on improving the quality of power supply and energy efficiency.

Key words: electricity storage, power supply system, power supply quality improvement, efficiency improvement.

РАЗДЕЛ II. ЦИФРОВИЗАЦИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Сатров М.А.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНСОЛЯЦИИ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НА ШИРОТЕ НОВОСИБИРСКА

Научный руководитель: Павловский Евгений Николаевич

Аннотация. Исследование посвящено разработке алгоритма прогнозирования инсоляции для повышения эффективности солнечных электростанций на широте Новосибирска. Используя интеллектуальные технологии и анализ метеорологических данных, создана нейросетевая модель прогнозирования, обеспечивающая высокую точность предсказания выработки электроэнергии. Модель основана на комбинированном использовании ретроспективных данных, метеорологических параметров и вероятностных характеристик инсоляции.

Ключевые слова: ИИ, прогнозирование, анализ данных, машинное обучение, нейронная сеть, солнечная энергетика, метеорологические факторы.

Рынок солнечного искусственного интеллекта представляет собой пересечение солнечных технологий и искусственного интеллекта, создавая инновационные решения для эффективного использования и управления энергией. Прогнозирование инсоляции методами ИИ играет ключевую роль в решении проблем, связанных с прерывистым характером солнечной энергии. Солнечная энергия из-за своей специфики может быть нерегулярной и непредсказуемой, и для включения её в производственную структуру необходимо иметь данные о её возможностях в любой момент времени.

Большинство современных систем прогнозирования мощности СЭС имеют недостатки: большая ошибка прогнозирования в пасмурные дни; использование усредненных параметров солнечного излучения; неучет внешних и внутренних факторов; ограниченность моделей конкретными станциями; отсутствие комплексного использования данных НАСА, наземных станций и статистических моделей.

Цель исследования – разработка модели прогнозирования инсоляции с использованием интеллектуальных технологий, обеспечивающей объективные результаты на основе повседневных метеорологических параметров.

Для определения солнечной энергии в условиях Новосибирской области использовался комплексный подход на основе трех методов:

1. Оценка инсоляции с использованием многолетних наблюдений НАСА за 1984-2022гг [1]. Для повышения точности применена статистическая обработка с удалением выбросов через расчет квартилей и межквартильного размаха.

2. Теоретический метод оценки инсоляции. Проведена оценка часовых сумм прямой и рассеянной солнечной радиации с учетом оптической толщины атмосферы и фактора мутности Линке [2]. Определены средние значения дневной инсоляции по месяцам.

3. Данные наземных метеорологических станций, представленные в климатических справочниках и открытом доступе.

На основе комбинированного анализа установлено, что для максимальной выработки на широте Новосибирска оптимальны солнечные панели под углом 45° относительно горизонта.

Важной особенностью исследования стало определение вероятностных характеристик инсоляции. Мощность солнечной станции зависит от множества факторов и носит вероятностный характер. Статистический анализ позволил построить функции распределения вероятности инсоляции для каждого месяца и выявить периоды с наибольшей изменчивостью показателей (февраль, август, октябрь, ноябрь).

Методы искусственного интеллекта имеют высокий потенциал для прогнозирования инсоляции. Для построения модели использованы ретроспективные данные ежедневных метеорологических параметров за 2011-2023 гг.: инсоляция, облачность, УФ-индекс, влажность, температура, атмосферное давление, ясность неба.

Данные были разделены в соотношении 80:20: 2011-2021 гг. – обучающая выборка, 2022-2023гг. – тестовая. Валидация проводилась на данных за 2024г.

Были протестированы различные алгоритмы машинного обучения: линейная регрессия, градиентный бустинг, XGBoost, LightGBM, CatBoost, метод опорных векторов, K-ближайших соседей, нейронная сеть MLPRegressor, трансформеры [4].

Для повышения точности прогнозирования в модель были добавлены дополнительные параметры: продолжительность светового дня; вероятный диапазон инсоляций; наиболее вероятные значения инсоляции; прогнозные погодные явления; сезонные признаки в виде синуса и косинуса дня в году; лаги и скользящие статистики.

Модель CatBoost с оптимальными гиперпараметрами ($iterations=2000$, $learning_rate=0.05$, $depth=6$, $l2_leaf_reg=3$, $bagging_temperature=0.1$) показала высокую точность:

$R^2: 0.90$; MAE: 0.44; RMSE: 0.5644; MSE: 0.32.

Анализ важности признаков выявил, что наибольшее значение для прогнозирования имеют скользящее среднее инсоляции за 7 дней, погодные факторы (облачность, УФ-индекс) и сезонные компоненты.

Для дальнейшего повышения точности была использована нейросетевая модель на основе многослойного перцептрона. Архитектура MLPRegressor включала 32 входных нейрона и три скрытых слоя (200, 150, 100 нейронов) [5]. Данная модель продемонстрировала наилучшие результаты:

$R^2: 0.98$; MAE: 0.18; RMSE: 0.06; MSE: 0.05.

Валидация на данных 2024 года подтвердила высокую точность прогнозирования, с сохранением метрик качества на уровне тестовой выборки.

Прогнозирование инсоляции при помощи нейронных сетей является наиболее точным методом, позволяющим преодолеть метеозависимость солнечных источников энергии. Разработанная модель имеет практическую

значимость для специалистов в области солнечной энергетики, исследователей и разработчиков солнечных энергоустановок в Новосибирской области. Методика может быть адаптирована для других регионов России [3].

Предложенная модель обеспечивает прогнозы, близкие к реальным значениям, и может служить эффективным инструментом как для ежедневного управления солнечными электростанциями, так и для экономически обоснованного проектирования фотоэлектрических систем.

Список литературы

1. NASA Surface meteorology and Solar Energy [Электронный ресурс] // Atmospheric Science Data Center. – 2024. – URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 21.01.2025).
2. Myers D.R. Solar radiation: practical modeling for renewable energy applications / D.R. Myers. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. – 199 с.
3. Джумаев А.Я. Возможности использования солнечной энергии в регионах Туркменистана / А.Я. Джумаев // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – № 3/4. – С. 80–86.
4. Миронов А.М. Машинное обучение. Часть 1 [Электронный ресурс] / А. М. Миронов // МГУ. – URL: http://intsys.msu.ru/staff/mironov/machine_learning_vol1.pdf.
5. Гафаров Ф.М. Искусственные нейронные сети и их приложения: учебное пособие / Ф. М. Гафаров, А. Ф. Гафаров. – Казань: Издательство Казанского университета, 2018. – 121 с.

Satrov M.A.

DEVELOPMENT OF AN INSOLATION FORECASTING ALGORITHM FOR A PHOTOVOLTAIC POWER STATION AT THE LATITUDE OF NOVOSIBIRSK

Scientific supervisor: Pavlovsky E.N.

Abstract. The study is devoted to the development of an insolation forecasting model to improve the efficiency of solar power plants at the latitude of Novosibirsk. Using intelligent technologies and meteorological data analysis, a neural network forecasting model has been created that provides high accuracy in predicting electricity generation. The model is based on the combined use of retrospective data, meteorological parameters, and probabilistic characteristics of insolation.

Keywords: AI, forecasting, data mining, machine learning, neural network, solar energy, meteorological factors.

Семернин А.Н., Малышева А.Д., Седогин М.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ МОСТОВОГО КРАНА

Научный руководитель: Семернин А.Н.

Аннотация. В работе проводится исследование возможности и эффективности применения машинного зрения совместно с различными системами управления электроприводом мостового крана. Приводятся системы управления электроприводом мостового крана. Выполняется анализ возможности применения машинного зрения для бездатчиковых систем управления. Анализируется эффективность применения системы машинного зрения совместно с системами управления на базе нечеткой логики. Предлагается

алгоритм автоматической настройки параметров ПИ- и ПИД-регуляторов с использованием системы машинного зрения.

Ключевые слова: машинное зрение, система управления электроприводом, ПИД-регуляторы, нечеткая логика, адаптивное управление, модальное управление.

Машинное зрение является одной из технологий, реализуемых при помощи искусственного интеллекта. С его помощью осуществляется получение и анализ изображения реального объекта. Благодаря этому машинное зрение способно выполнять различные задачи, связанные с определением визуальных параметров (тип, размеры, количество) и состояния (положение, дефекты) исследуемого объекта [2].

В настоящее время машинное зрение получает все большее распространение во всех сферах деятельности, в том числе в системах управления [3]. Машинное зрение может применяться в составе системы управления электрического привода промышленного оборудования для повышения безопасности технологических процессов [4]. Алгоритмы контроля захвата и перемещения комбинированной системы управления электроприводом мостового крана позволяют снизить величину возникающих колебаний груза во время работы крана [1]. Целью данной работы является исследование возможности и целесообразности применения системы машинного зрения вместе с различными системами управления электроприводом мостового крана.

В электроприводе мостового крана для снижения величины пространственных колебаний, возникающих при перемещении грузов, применяются следующие системы управления: системы с ПИ- и ПИД регуляторами; системы с регуляторами на базе нечеткой логики; системы модального управления; системы адаптивного управления [5].

Системы адаптивного и модального управления относятся к системам бездатчикового векторного управления электроприводом. В основе этих систем лежат алгоритмы управления, для работы которых необходимо производить прямые измерения только электрических величин двигателя (напряжение и ток статора). В состав данных систем управления входят блоки наблюдения (наблюдатели) скорости, принцип действия которых основан на сравнении векторов потокосцеплений двигателя [6]. Система машинного зрения выполняет обработку визуальных параметров перемещаемого груза. Данная информация не используется в бездатчиковых системах управления электроприводом. Отсюда следует, что применение системы машинного зрения в адаптивных и модальных системах управления невозможно, так как не позволит заменить блоки наблюдения. Возможно только поочередное применение данных двух систем отдельно друг от друга.

Системы управления электроприводом мостового крана с регуляторами на базе нечеткой логики имеют в своем составе блок, содержащий базу правил для изменения параметров регулятора (рисунок 1). Данные правила предварительно настраиваются для разных углов отклонения груза и загружаются в систему. В системе управления также присутствует датчик интенсивности, регулирующий изменение скорости. На выходе системы происходит вычитание сигнала

датчика из сигнала регулятора. При увеличении угла отклонения регулятор будет подавать большее управляющее воздействие, тем самым ограничивая ускорение груза снижая величину возникающих колебаний [7]. Для работы системы необходимо применение датчика угла отклонения груза, который возможно заменить машинным зрением. Однако наличие автоматической настройки параметров нечеткого регулятора в зависимости от угла отклонения не требует полного функционала системы машинного зрения. Отсюда следует, что применение системы машинного зрения вместе с регуляторами нечеткой логики является возможной, но нецелесообразной.

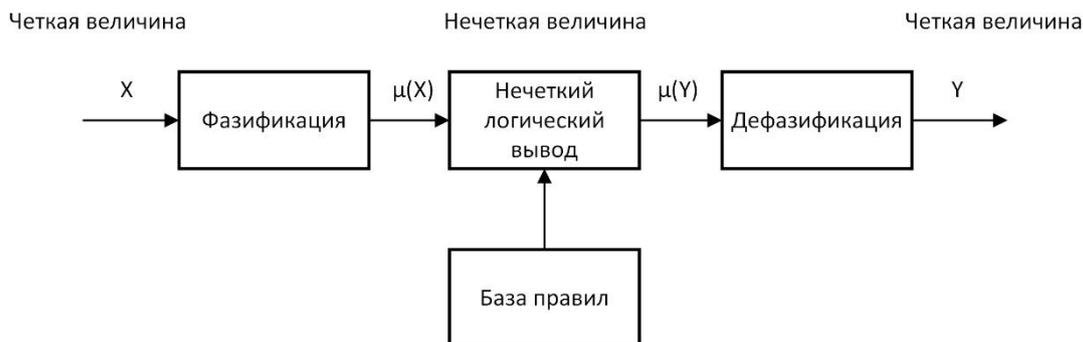


Рисунок 1 – Принцип работы нечеткого регулятора

Наиболее распространенными системами управления электроприводом мостового крана являются замкнутые системы с ПИ- и ПИД-регуляторами, настроенными на модульный оптимум. Они позволяют снизить величину возникающих колебаний путем регулирования по ошибке перемещения и по углу отклонения перемещаемого груза [8]. К недостаткам данных систем управления можно отнести необходимость выполнения предварительной настройки регуляторов в зависимости от параметров перемещаемого груза (длина груза, длина подвеса). При этом для настройки параметров регуляторов необходимо использование датчиков для определения угла отклонения груза при возникновении колебаний, а также для определения скорости его передвижения. В условиях неопределенности параметров применение систем с ПИ- и ПИД-регуляторами становится затруднительным. Использование системы машинного зрения позволит определять габариты, геометрический центр и тип подвеса груза и передавать их в программное обеспечение для расчета параметров регуляторов. Благодаря этому становится возможной автоматическая предварительная настройка параметров регуляторов в процессе работы электропривода мостового крана.

Алгоритм автоматической настройки параметров ПИ- и ПИД-регуляторов представлен на рисунке 2.

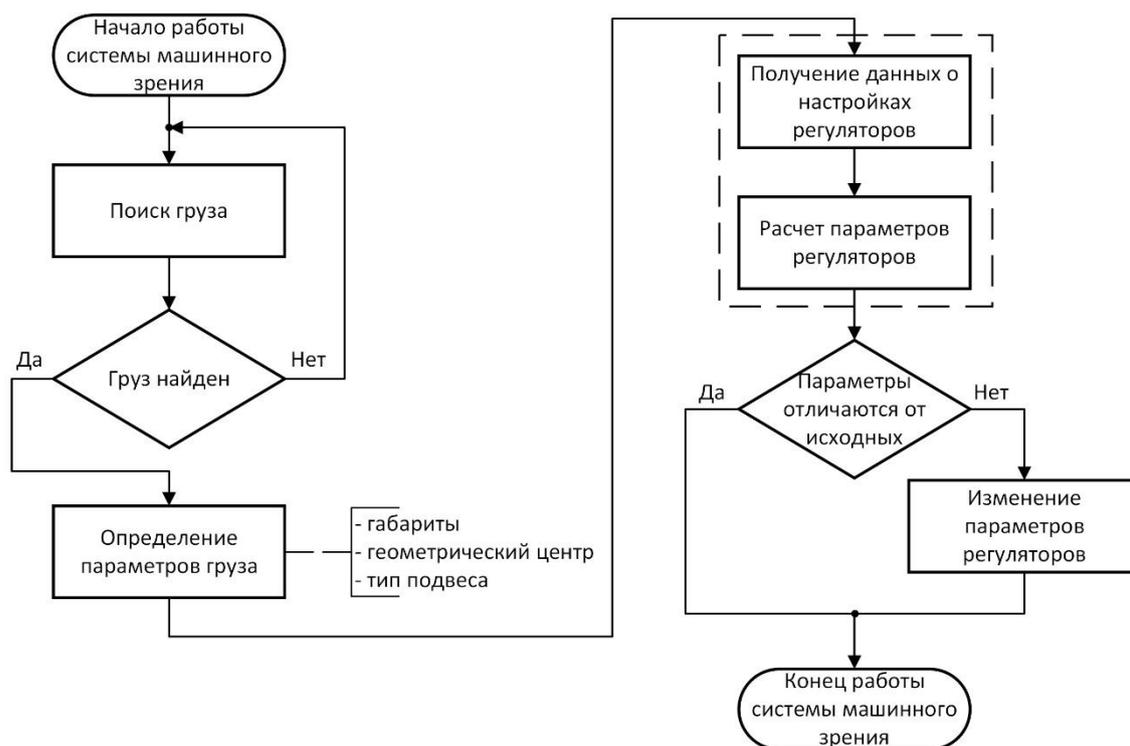


Рисунок 2 – Алгоритм автоматической настройки параметров регуляторов

В настоящее время распространяется применение машинного зрения в различных системах управления. Система машинного зрения может применяться совместно с отдельными стандартными системами управления электроприводом мостового крана. Систему машинного зрения невозможно применять вместе с адаптивными и модальными системами управления, так как последние являются бездатчиковыми и не требуют для управления визуальных параметров груза. Система машинного зрения может применяться совместно с системами управления на базе регуляторов нечеткой логики. Однако наличие в этих системах автоматической настройки параметров нечетких регуляторов делает применение системы машинного зрения нецелесообразным. Возможно и целесообразно применение системы машинного зрения совместно с системами управления на основе ПИ- и ПИД-регуляторов. Их комбинация позволяет использовать алгоритм автоматической настройки параметров регуляторов, значительно повышая эффективность стандартной системы управления.

Список литературы

1. Солдатенков А.С., Малышева А.Д., Седогин М.А. Особенности применения системы машинного зрения для управления электроприводом мостового крана // Энергетические системы. – 2024. – № 9 (4). – С. 50-57.
2. Полеников А. М. Применение технологий искусственного интеллекта для оптимизации технологических процессов в производстве // Хлебопечение России. – 2024. – Том 68, № 2. – С. 88-99.
3. Каргин В.А., Сохинов Д.Ю., Усанов К.М., Мокрушин С.А., Кротов И.В. Интеллектуальная автоматизированная система управления сортировкой фруктов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2024. – Том 71, № 2 (55). – С. 100-106.

4. Холодилилин И. Ю., Коржов А. В., Григорьев М. А., Хохлов Ю. И., Савостеенко Н. В. Высокоэффективный электропривод с системой технического зрения для тягового применения в тяжелых гусеничных машинах // Омский научный вестник. – 2021. – № 6 (180). – С. 41-47.
5. Круглов С.П., Аксаментов Д.Н. Адаптивное управление мостовым краном по скорости перемещения тележки // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Том 25, № 1. – С. 86-92.
6. Пахомов А. Н., Федоренко А.А., Чертыков П.Н. Модальное управление асинхронным электроприводом тележки мостового крана с наблюдающим устройством // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2022. – №15(5). – С. 583–592.
7. Синюков А.В., Абдуллазянов Э.Ю., Заруцкий Н.Н., Синюкова Т.В., Грачева Е.И. Использование аппарата на базе нечеткой логики для демпфирования колебаний гибкоподвешенного груза // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Том 26, № 3. – С.33-49.
8. Пахомов А.Н. Модернизация закона управления электроприводом перемещения тележки грузоподъемного крана // Globus: Технические науки. – 2020. – № 3 (34). – С. 31-33.

Andrey Semernin, Alvina Malysheva, Mikhail Sedogin
**INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING MACHINE
VISION FOR OVERHEAD CRANE ELECTRICAL DRIVE CONTROL
SYSTEMS**

Scientific adviser: Andrey Semernin

Abstract. The paper investigates the possibility and effectiveness of using machine vision in conjunction with various electric crane control systems. The control systems for the electric drive of an overhead crane are given. The possibility of using machine vision for sensor-free control systems is being analyzed. The effectiveness of using a machine vision system in conjunction with fuzzy logic-based control systems is analyzed. An algorithm for automatically adjusting the parameters of PI and PID controllers using a machine vision system is proposed.

Keywords: machine vision, electric drive control system, PID controllers, fuzzy logic, adaptive control, modal control.

Ходжиогло А.Ю.
**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И
ПРЕДИКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ БАТАРЕЯМИ**

Научный руководитель: Усунц-Кригер Т.Н.

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к оптимизации энергопотребления электромобилей на основе применения технологий машинного обучения и предиктивных алгоритмов управления. Основное внимание уделено разработке интеллектуальных систем, прогнозирующих энергозатраты на основе данных о состоянии аккумуляторной батареи, дорожных условиях, погоде и стиле вождения. Автор анализирует способы интеграции предиктивной аналитики с существующими системами управления энергией электромобилей, а также оценивает их влияние на продление срока службы батарей, повышение общей энергоэффективности и уменьшение углеродного следа. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих эффективность предложенных методов.

Ключевые слова: энергопотребление электромобилей, машинное обучение, предиктивные алгоритмы, управление батареями, срок службы аккумулятора, устойчивые транспортные технологии.

Одним из важнейших направлений в области устойчивого транспорта является развитие технологий электромобилей. На фоне растущей необходимости перехода к экологичным источникам энергии, а также стремления минимизировать углеродный след транспортных средств, электромобили становятся неотъемлемой частью городской и глобальной транспортной инфраструктуры. Однако для массового внедрения электромобилей остаются нерешенные задачи, связанные с их энергоэффективностью. Наиболее острой проблемой является обеспеченность энергии батареи, которая ограничивает запас хода и, в свою очередь, снижает конкурентоспособность электромобилей по сравнению с автомобилями, работающими на традиционном топливе. Одним из ключевых шагов на пути к решению этой задачи становится решение вопроса оптимизации энергопотребления, основанного на машинном обучении и предиктивных алгоритмах управления.

Основной вклад машинного обучения в управление энергией электромобиля заключается в способности обучающихся систем анализировать большие объемы данных и выявлять закономерности, которые недоступны при традиционном подходе. Типичные источники данных для анализа включают показатели работы батареи, параметры вождения, дорожные и погодные условия, а также время суток и характер дорожного трафика. Данные могут быть получены в реальном времени с помощью сенсоров и встроенных модулей телеметрии, которые уже широко используются в современных электромобилях.

Важным аспектом является также использование предиктивных алгоритмов, которые строят прогнозы на основе как исторических, так и текущих данных. Такие прогнозы могут учитывать одновременно несколько факторов, например, уменьшение емкости батареи из-за ее естественного износа, изменение климата (температура, влажность), а также поведение водителя. Одним из практических примеров использования предиктивной аналитики являются системы маршрутизации с учетом энергопотребления.

Результаты экспериментальных исследований демонстрируют, что применение предиктивных методов существенно повышает эффективность использования энергетических ресурсов, увеличивает запас хода и снижает эксплуатационные затраты. Одним из центральных элементов исследований стало применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования энергозатрат в зависимости от текущего маршрута. В рамках экспериментов, затрагивавших использование информации о дорожных условиях, профиле высот, плотности транспорта и данных о погоде, была показана возможность сокращения затрат энергии на 12-25% при интеграции более сложных стратегий по управлению режимами работы привода [4]. Эксперименты включали тестирование алгоритмов с использованием симуляционных платформ, в которых реальные маршруты были воспроизведены с учётом ключевых

факторов влияния. В одном из таких исследований использовался гибридный подход, объединяющий рекуррентные нейронные сети («RNN») и градиентные методы оптимизации. Результаты свидетельствовали о том, что аккуратность предсказания уровня энергопотребления при использовании предложенного метода возросла на 18% по сравнению с традиционными моделями [1]. Более того, оптимизация маршрута с учётом подъёмов и спусков позволяла адаптивно перераспределять нагрузку между батареей и двигателем, достигнув дополнительной экономии.

Отдельным направлением экспериментов стало изучение возможностей предиктивной аналитики в работе систем рекуперации энергии. В электромобилях существенную роль играет эффективность рекуперативного торможения, обеспечивающего возврат кинетической энергии обратно в аккумулятор. Обнаружено, что использование предсказательных алгоритмов позволяет значительно улучшить управление рекуперацией на этапе планирования движения. Например, при движении в условиях плотного трафика интеграция предиктивных алгоритмов обеспечивала средний прирост уровня рекуперации на 15% [3]. Эксперименты проводились с использованием тестовой платформы, имитирующей городской цикл движения, где систему управления обучали предсказывать оптимальные точки включения и выключения рекуперации на основе данных о скорости и вероятных изменениях движения окружающего транспорта. Этот подход также учитывал профили поведения других автомобилей, что обеспечивало более плавное управление в реальных дорожных условиях.

Ещё одним важным элементом стало изучение интеграции методов предиктивной аналитики для управления температурными режимами батарейных систем. Известно, что эффективность аккумуляторной батареи и её общая долговечность значительно зависят от температурных параметров. Низкие или высокие температуры вызывают снижение ёмкости и увеличивают энергопотери. В ходе экспериментов была протестирована система, использующая прогнозирование изменения температуры батареи на основе дорожной обстановки, интенсивности энергопотребления, а также внешних факторов, таких как температура воздуха и влажность [5]. Используя алгоритм на основе градиентного бустинга, предложенная методика показывала способность к снижению перегрузки батарей на 20% за счёт адаптационного управления охлаждением и нагревом в зависимости от предсказанного маршрута [2]. Этот эксперимент, проведённый на симуляторе в сочетании с реальными данными тестового автопарка, подтвердил, что подход одновременно снижает энергозатраты на терморегуляцию и сохраняет общую производительность батареи.

Нельзя не отметить и важность предиктивной аналитики в стратегии переключения режимов между двигателями в гибридных системах, где вспомогательные генераторы или двигатели внутреннего сгорания используются в отдельных условиях для увеличения запаса хода. В ходе натурных испытаний на смешанных маршрутах городской и загородной сетки эксперты

протестировали предсказательные алгоритмы, которые позволяли максимально эффективно включать вспомогательные источники энергии только в необходимых условиях [7]. Это способствовало снижению энергозатрат на 8-10% и минимизировало выбросы углекислого газа, что особенно важно при учёте требований экологических стандартов [6]. При этом использовался адаптивный метод со множеством сценариев, предсказывающих вероятность необходимости переключения режимов в зависимости от дорожного трафика, наклона дорожного полотна и состояния батарей.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают важность внедрения предиктивной аналитики на всех уровнях управления энергией электромобиля. Использование данных моделей позволяет объединить разрозненные компоненты электроприводов в единую оптимизированную систему, которая не только повышает энергоэффективность, но и улучшает общее качество эксплуатации. Выводы экспериментов подчеркивают необходимость дальнейших исследований, направленных на адаптацию подобных технологий к изменяющимся условиям эксплуатации, а также снижение стоимости их внедрения для массового применения на рынках.

Список литературы

1. Бабаян Г. В. Инновации в устойчивом транспорте: умные зарядные дороги с индуктивной зарядкой для экологически чистых районов // *Universum: технические науки*. – 2024. – № 11-5(128). – С. 23-31.
2. Беляев Д. С., Генсон Е. М. Анализ факторов, оказывающих влияние на энергопотребление электромобилем // *Химия. Экология. Урбанистика*. – 2022. – Т. 3. – С. 49-53.
3. Бобрышев А. Д., Ирадионов В. И., Юхачев С. П. Определение необходимых объемов инвестиций для обеспечения целевых темпов роста промышленности // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки*. – 2015. – № 6(146). – С. 109-118.
4. Тищенко А. Д., Пономарев В. С., Ростовский Д. Е. [и др.] О миварной системе принятия решений для электромобилей с рекомендациями по оптимальной скорости // *Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: сборник статей II Всероссийской научной конференции, Москва, 27–28 апреля 2023 года*. – Москва: Издательский дом КДУ, Добросвет, 2023. – С. 467-472.
5. Филькин М. Е. Перспективы интеллектуальных сетей в энергетике электрического транспорта // *Экономика и предпринимательство*. – 2024. – № 11(172). – С. 1349-1353.
6. Шибанов К. С. Стратегическое управление в контексте технологических изменений. – Казань: ООО «Бук», 2025. – 172 с.
7. Этвеш С. А., Гакова Е. В. Термодинамика и энергопотребление электромобилей // *Новые технологии в инженерии: сборник студенческих научных статей по материалам XI студенческой научно-практической конференции, Москва, 22 марта 2023 года*. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2023. – С. 193-206.

Alexey Khodzhiglo

OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN ELECTRIC VEHICLES USING MACHINE LEARNING AND PREDICTIVE BATTERY MANAGEMENT ALGORITHMS

Scientific adviser: Usnunts-Krieger T.N.

Abstract. The article discusses modern approaches to optimizing the energy consumption of electric vehicles based on the use of machine learning technologies and predictive control algorithms. The main focus is on the development of intelligent systems that predict energy costs based on data on the state of the battery, road conditions, weather, and driving style. The author analyzes ways to integrate predictive analytics with existing energy management systems of electric vehicles, and assesses their impact on extending battery life, increasing overall energy efficiency, and reducing the carbon footprint. The results of experimental studies confirming the effectiveness of the proposed methods are presented.

Keywords: electric vehicle energy consumption, machine learning, predictive algorithms, battery management, battery life, sustainable transport technologies.

Шмелёв В.Е., Соколов Г.Ю.
**ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЦИФРОВОГО
УЧЁТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Аннотация. В работе дано предложение незначительно расширить функционал цифровых приборов коммерческого учёта электроэнергии с целью значительного упрощения расчёта потерь электроэнергии на участке электропитающей сети между границей балансовой принадлежности и местом установки приборов. Предлагается дополнить учёт активной и реактивной энергии счётом пофазного интеграла квадрата тока (ИКТ). В результате расчёт потери активной энергии на участке линии сведётся к умножению ИКТ на её активное сопротивление. Это должно существенно снизить количество споров между потребителями электроэнергии и энергоснабжающими предприятиями. Это также может позволить допустить снижение точности учёта реактивной энергии.

Ключевые слова: активная мощность, реактивная мощность, мощность искажения, активная энергия, реактивная энергия, методики расчёта потерь, учёт электроэнергии.

С 1 мая 2024 года «интеллектуальный» учёт электроэнергии регламентируется стандартом [1]. Там перечислены регистрируемые, хранимые, обрабатываемые параметры и выполняемые функции интеллектуальных систем учёта электроэнергии (ИСУЭ). К ним, кроме всего прочего, относятся передача показаний и результатов измерений принятой (отданной) активной и реактивной энергии на начало месяца и суток. Если граница балансовой принадлежности (точка поставки) не совпадает с местом установки приборов учёта (точка учёта), то потери активной энергии между этими точками должны учитываться при финансовых расчётах, которые проводятся за электроэнергию, прошедшую через точку поставки.

Если приборы коммерческого учёта стоят с двух сторон от точки поставки, то методика расчёта потерь (а значит, и электроэнергии, прошедшей через точку поставки) достаточно проста и однозначна и изложена, например, в [2]. Если приборы коммерческого учёта стоят с одной стороны от точки поставки, то потери относятся на счёт субъекта, на балансе которого находится участок сети между точкой поставки и точкой учёта.

С физической точки зрения электрическая энергия (а короче – электроэнергия) – это энергия электромагнитного поля. Именно в таком виде она доводится до потребителей по линиям электропередачи (ЛЭП) и проходит через трансформаторы и другие преобразователи. С точки зрения теории

электромагнитного поля средства передачи электроэнергии представляют собой направляющие системы потоков электромагнитной мощности. Если напряжение и ток в каждой фазе изменяются во времени по периодическому закону, то активной мощностью называют среднюю за период мгновенную мощность. Активной энергией, принятой (отданной) за отчётный период, является временной интеграл мгновенной $p(t)$ (или активной P) мощности (все счётчики являются интегрирующими приборами). В цифровые счётчики различных типов «защиты» свои численные методы интегрирования по времени. С этой точки зрения цифровой учёт активной электроэнергии – сравнительно несложная задача.

Реактивной энергией является временной интеграл реактивной мощности. В периодическом несинусоидальном режиме изменения фазных токов и напряжений при использовании разных типов цифровых и аналоговых счётчиков применяются разные определения самого понятия реактивной мощности. В одних случаях реактивная мощность – это формальная сумма реактивных мощностей конечного числа (сорока) гармоник (формула(1)), в других случаях – реактивная мощность только первой гармоники Q_1 . Без гармонического анализа реактивная мощность может определяться по площади динамической вольт-амперной характеристики приёмника (по формуле Маевского (2)), по площади динамической вебер-кулонной характеристики после удаления постоянных составляющих напряжения и тока (по «интегральной» формуле (3)). В силовой электронике такую неактивную (реактивную) мощность иначе называют мощностью сдвига. Многие цифровые измерительные приборы определяют реактивную мощность по более простой *формуле сдвига*. Здесь напряжение как функция времени задерживается на четверть периода, затем умножается на мгновенный ток, и произведение арифметически (интегрально) усредняется за период (формула (4)). Все эти определения реактивной мощности дают разные результаты в несинусоидальном периодическом режиме и один и тот же результат в синусоидальном режиме. Кроме реактивной мощности существует также ещё один вид неактивной мощности – мощность искажения. Она является третьей ортогональной составляющей полной электрической мощности, равной для однофазного приёмника произведению действующих (среднеквадратичных за период) значений напряжения и тока. Цифровые измерительные приборы могут оценивать реактивную мощность в «геометрическом» смысле – как квадратный корень разности квадратов полной и активной мощностей. Знак получаемой неактивной мощности принимается равным знаку реактивной мощности первой гармоники или знаку реактивной мощности, полученной по формуле сдвига. С этой точки зрения задача строгого цифрового учёта реактивной энергии при сильном искажении синусоидальности форм напряжения или тока в заявляемом классе точности – технически трудновыполнимая задача.

Формулы, определяющие реактивную мощность

$$Q = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_{\text{опт}}(t) \cdot i(t) \cdot dt = -\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i_{\text{опт}}(t) \cdot dt =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin(\varphi_k) = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k, \quad (1)$$

$$\text{где } u_{\text{опт}}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{u(\tau)}{\pi \cdot (t - \tau)} \cdot d\tau.$$

$$Q_M = \frac{1}{2\pi} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{i(t_0)}^{i(t_0+T)} u di = -\frac{1}{2\pi} \int_{i(t_0)}^{i(t_0+T)} i du = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot Q_k. \quad (2)$$

$$Q_{\text{и}} = \frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} \Psi(t) \cdot i(t) dt = -\frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} q(t) \cdot u(t) dt =$$

$$= \frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_{q(t_0)}^{q(t_0+T)} \Psi dq = -\frac{2\pi}{T^2} \cdot \int_{\Psi(t_0)}^{\Psi(t_0+T)} q d\Psi = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Q_k}{k}. \quad (3)$$

$$Q_c = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u\left(t - \frac{T}{4}\right) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i\left(t + \frac{T}{4}\right) dt =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} (Q_{4k-3} - P_{4k-2} - Q_{4k-1} + P_{4k}). \quad (4)$$

За потреблённую реактивную энергию финансовые расчёты с 2004 года не производятся. Коммерческий учёт этой энергии нужен для достижения двух целей: во-первых, для контроля соблюдения договорного соотношения реактивной и активной мощности (за нарушение к потребителю могут быть применены штрафные санкции), во-вторых, для финансового расчёта потерь активной энергии на участке сети между точкой поставки и точкой учёта.

Разные энергоснабжающие (электросетевые и энергосбытовые) компании могут применять свои утверждённые методики оценки потерь активной энергии на «разностных» участках сети. Кратко рассмотрим методики расчёта потерь активной энергии на участке линии между точкой поставки и точкой учёта. Первую из этих методик применяет ООО «Евростет». Слагаемые годовых потерь определяются ежемесячно. По формуле (5) определяется месячное слагаемое потери активной энергии:

$$\Delta W = \left(\frac{P}{U_{\text{ном}} \cdot \cos(\varphi_{\text{н}})} \right)^2 \cdot r_0 \cdot L \cdot T_{\text{max}}, \quad \text{где } T_{\text{max}} = \frac{W_{\text{T}}}{P}, \quad (5)$$

где P – максимальная мощность потребления, $U_{\text{ном}}$ – номинальное линейное напряжение в точке учёта, $\cos(\varphi_{\text{н}})$ – нормативный коэффициент мощности (или средний за месяц, если вёлся учёт реактивной энергии), r_0 – погонное активное сопротивление фазной жилы участка линии, L – длина участка линии, T_{max} – число часов использования максимальной мощности за месяц, W_{T} – потреблённая активная энергия за месяц.

Вторая методика применяется АО «ОРЭС Владимирская область». Отношение потери активной энергии в линии к фактически потреблённой активной энергии в течение месяца определяется по формуле (6):

$$\delta W = \frac{r_0 \cdot L \cdot \left(1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (\theta - 20) / n_u\right) \cdot \left(\frac{P}{U_l \cdot \cos(\varphi_n)}\right) + P_{из}}{P}, \quad (6)$$

где n_u – коэффициент, соответствующий материалу токоведущей жилы, $P_{из}$ – активная мощность, потребляемая измерительными цепями прибора учёта, θ – температура окружающей среды, °С. Остальные параметры имеют тот же смысл, что и в формуле (5).

Третья методика применяется в филиале ПАО «Россети Центр и Приволжье» - «Владимирэнерго». Потери электроэнергии в воздушной линии определяются по формуле (7):

$$\Delta W = \frac{W_{факт}^2 \cdot r_0 \cdot L}{U_l^2 \cdot (\cos(\varphi_n))^2 \cdot T_{раб}}. \quad (7)$$

Методики (5), (6), (7) обладают разной степенью адекватности. Ни одна из этих формул не является точной и не учитывает реального графика нагрузки потребителя и, тем более, не учитывает возможные несимметрии потребления электроэнергии по фазам. Поэтому авторами предлагается в цифровых приборах учёта электроэнергии дополнить счёт активной и реактивной энергии счётом пофазного интеграла квадрата тока (ИКТ). В результате расчёт потери активной энергии на участке линии сведётся к умножению ИКТ на её активное сопротивление (с последующим суммированием по фазам). Это должно существенно снизить количество споров между потребителями электроэнергии и энергоснабжающими предприятиями. Это также может позволить допустить снижение точности учёта реактивной энергии.

Список литературы

- ГОСТ Р 71331-2024 Интеллектуальные системы учета электрической энергии (мощности). Общие технические требования. Применяется с 01.05.2024.
- Лыкин, А.В. Учёт и контроль электроэнергии. Конспект лекций: учебное пособие/ А.В. Лыкин. – Новосибирск: НГТУ, 2019. – 171 с. – ISBN 978-5-7782-3797-1.

Vyacheslav Shmelev, George Sokolov

PROPOSAL TO IMPROVE DIGITAL ELECTRIC POWER ACCOUNTING

Annotation: The paper makes a proposal to slightly expand the functionality of digital commercial electricity metering devices in order to significantly simplify the calculation of electricity losses in the section of the power supply network between the balance sheet boundary and the installation location of the devices. It is proposed to supplement the account of active and reactive energy with the account of the phase-by-phase integral of the current squared (ICS). As a result, the calculation of the loss of active energy on a section of the line will be reduced to multiplying the ICS by its active resistance. This should significantly reduce the number of disputes between electricity consumers and energy supply companies. This may also allow for a decrease in the accuracy of reactive energy accounting.

Keywords: active power, reactive power, distortion power, active energy, reactive energy, loss calculation methods, electric power accounting.

РАЗДЕЛ III. ПЕРСПЕКТИВЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ И МИРЕ

Оганезов И.А.

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА МЕСТНЫХ ВИДАХ ТОПЛИВА И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В БЕЛАРУСИ

Аннотация. Рассмотрено развитие местных видов топлива (МВТ) и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в экономике Республики Беларусь за последние годы. Показаны планируемые значения экономии топливно-энергетических ресурсов и импортируемого природного газа в натуральных единицах и денежном выражении за счет использования МВТ и ВИЭ.

Ключевые слова: энергетика, местные виды топлива, энергосбережение, возобновляемые источники энергии, экономия,

В Беларуси в рамках экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) основное внимание сосредоточено на расширение использования древесного топлива. Это связано с значительно меньшими объемами капиталовложений и небольшими сроками окупаемости в сравнении с другими видами возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1].

В 2021–2025 гг. в рамках реализации Государственной программы Энергосбережение в Республике Беларусь предусматривается ввод в эксплуатацию около 539 МВт энергоемкостей на древесном топливе, что может позволить увеличить объем использования местных ТЭР, более чем на 144 тыс. т.у.т. и, соответственно, снизить потребление импортируемого природного газа из России на 125 млн. м³. В 2021-2025 годах в рамках реализации данной госпрограммы облисполкомами Беларуси и Минским горисполкомом запланировано строительство в организациях ЖКХ 95 энергоисточников на местных ТЭР общей тепловой мощностью 526,7 МВт. Целевыми показателями реализации данной программы в целом по Республике Беларусь являются: доля местных ТЭР в валовом потреблении ТЭР – не менее 16,1%; доля ВИЭ в валовом потреблении ТЭР – до 8%, что будет способствовать, наряду с использованием атомной энергии, достижению нормативного уровня энергетической самостоятельности страны [1-2].

Основными направлениями дальнейшего развития использования МВТ являются: создание энергоисточников, использующих местные ТЭР (древесное и торфяное топливо, горючие отходы, попутный газ и прочие); строительство локальных биогазовых комплексов в животноводческих сельскохозяйственных организациях; создание биогазовых установок на очистных сооружениях и полигонах захоронения твердых коммунальных отходов; увеличение выработки электрической и тепловой энергии за счет использования энергии естественного движения водных потоков, ветра и солнца; создание в организациях ЖКХ мощностей по производству топлива из твердых коммунальных отходов (RDF-

топливо) с его использованием на энергоисточниках; использование в качестве топлива на цементных заводах строительной отрасли нефтяного кокса [1-2].

В Республике Беларусь появились и успешно работают собственные производители котельного оборудования на местных видах топлива (ООО «ТЕПЕО», НПП «Белкотломаш», ЧП «СМУ Энерготехсервис», СООО «КОМКОНТ», ООО «НОВИТЕРБЕЛ» и т.д.), а также производители специальной техники (ЧП "Спецтехпром" и др.). Создана и инфраструктура по производству, транспортировке, хранению древесного и торфяного топлива. Кроме того, освоен полный цикл строительства энергоисточников на местных видах топлива, начиная от их проектирования, заканчивая эксплуатацией и последующей модернизацией. В итоге в Беларуси в настоящее время на МВТ работает около 5,57 тыс. энергоисточников, что составляет более 53 % от их общего количества. В организациях ЖКХ на МВТ работает около 70% энергоисточников. За первые три года реализации государственной программы «Энергосбережение» с 2021 по 2023 гг. в Республике Беларусь были созданы дополнительные энергетические мощности на 234 МВт на МВТ, которые позволили заместить 60 млн. м³ природного газа, импортируемого из России, снизить затраты на этих энергоисточниках на 16–19 %. На эти цели уже направлено около 146 млн. руб. РБ собственных и бюджетных средств и 112 млн. руб. РБ из других источников. При этом в соответствии с представленными Госстандартом материалами средства местных бюджетов выделялись по областям очень неравномерно [3].

В 2021-2025 гг. в рамках реализации госпрограммы облисполкомами и Минским горисполкомом запланировано строительство в организациях ЖКХ 95 энергоисточников на местных ТЭР общей тепловой мощностью 526,7 МВт. В частности, за 2021-2022 гг. в эксплуатацию были введены 29 энергоисточников МВТ суммарной тепловой мощностью 180,7 МВт, что позволило обеспечить увеличение ежегодного объема использования местных ТЭР на 55,1 тыс. т условного топлива (см. табл.1). В Беларуси за 2023-2024 гг. были введены энергоисточники на местных ТЭР общей мощностью 131,7 МВт (см. табл.1) [2-5].

Значения вводимых тепловых мощности Беларуси на МВТ, в МВт, планируемой экономии ТЭР и импортируемого из России природного газа за время реализации Государственной программы Энергосбережение в Республике Беларусь показаны в табл.1 и на рис.1 [2- 5].

Таблица 1 — Вводимые тепловые мощности Беларуси на МВТ, в МВт, планируемая экономия топливно-энергетических ресурсов, тыс. т. у. т. и импортируемого природного газа, млн. м³

Годы реализации Программы Энергосбережение	2021	2022	2023	2024	2025 (прогноз)	Итого 2021-2025

Вводимые тепловые мощности Беларуси на МВт, МВт	86,4	94,3	53,3	78,4	213,6- 22 7,4	526- 539,8
Планируемая экономия ТЭР, тыс. т. у. т.	26,35	28,75	16,25	23,91	79,54	144,8
Планируемая экономия импортируемого природного газа, млн. м ³	22,75	24,82	14,03	20,64	68,66	125

Значения вводимых тепловых мощностей Беларуси на МВт, в МВт приведены на рис.1.

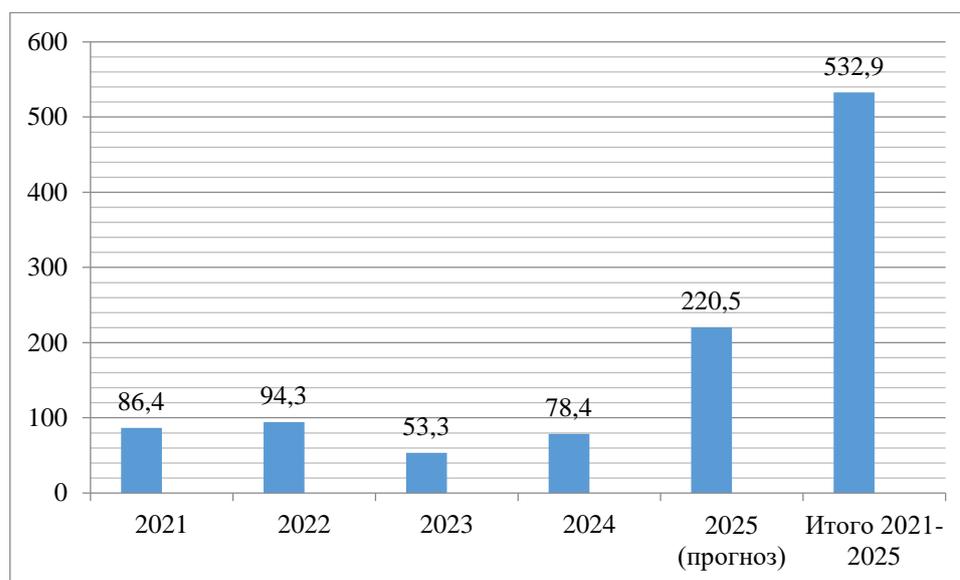


Рисунок 1 – Планируемые значения вводимых тепловых мощностей на местных видах топлива в Беларуси в 2021-2025 гг., МВт

Общий годовой размер экономии валютных средств Республики Беларусь за использования МВт вместо импортируемого природного газа при полной реализации запланированной государственной программы «Энергосбережение» с 2021 по 2025 гг. в Республике Беларусь можно оценить до 29 млн. долл. США. Кроме того, на современных энергоисточниках, работающих на местных ТЭР, себестоимость производства тепловой энергии как минимум на 10–20% ниже, чем на теплоисточниках, использующих импортируемые виды топлива [1- 5].

В Беларуси за последние 14 лет мощность установок ВИЭ выросла в 14 раз и составила 632 МВт. В настоящее время в Республике Беларусь действуют [6]:

— 84 фотоэлектрические станции общей мощностью 272,7 МВт или (43,16% от общей мощности ВИЭ Беларуси), из них: крупнейшие – Чериковская ФЭС ООО «Солар Лэнд» (109 МВт), Речицкая ФЭС ПО «Белоруснефть» (56 МВт);

— 108 ветроэнергетических установок мощностью 122 МВт (19,31%), из них: крупнейшие ветропарки – РУП «Гродноэнерго» (9 МВт), ООО «Газосиликат-люкс» (9 МВт);

— 11 мини-ТЭЦ на древесном топливе электрической мощностью порядка 100,5 МВт (15,90%).

— 55 мини-ГЭС мощностью 96,5 МВт (15,27%), из них: крупнейшие – Полоцкая (21,6 МВт) и Витебская (40 МВт);

— 31 биогазовый комплекс мощностью 40,2 МВт (6,36%), из них: крупнейший в СПК «Рассвет им. Орловского» (4,8 МВт);

В структуре ВИЭ нашей республики почти на 97% используется биомасса (в основном древесное топливо) и чуть более 3% — энергия воды, ветра и солнца. Строительство новых энергоисточников с применением местных МВт и переводом действующих объектов на МВт — стратегическая задача для экономики Республики Беларусь. Решение данных вопросов может позволить уменьшить ее зависимость от импортируемых энергоносителей, а также существенно экономить валютные средства, обеспечивать энергетическую и экономическую безопасность, внедрять передовые технологии и создавать новые рабочие места. Использование данных ВИЭ в настоящее время позволяет Беларуси экономить около 500 тыс. т условного топлива в год, что может быть эквивалентно 100 млн. долл. США [6].

Список литературы

1. Развитие возобновляемой энергетики Беларуси – Госстандарт [Электронный ресурс]: — Режим доступа: https://energoeffect.gov.by/news/news_2023/20231025_news1—Дата доступа: 14.02.2025

2. Утверждена Государственная программа «Энергосбережение» на 2021 – 2025 годы. – Госстандарт [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <https://gosstandart.gov.by/approved-state-program-energy-saving-for-2021-2025->—Дата доступа: 14.02.2025

3. В Правительстве обсудили вопросы строительства энергоисточников на местных видах топлива. – Госстандарт [Электронный ресурс]: — Режим доступа: <https://gosstandart.gov.by/v-pravitelstve-obsudili-voprosy-stroitelstva-energoistochnikov-na-mestnykh-vidakh>—Дата доступа: 14.02.2025

4. В Департаменте по энергоэффективности подвели итоги полугодия. – [Электронный ресурс]: — Режим доступа: https://energoeffect.gov.by/news/news_2023/20230911_news1—Дата доступа: 14.02.2025

5. В Департаменте по энергоэффективности состоялось заседание коллегии. – [Электронный ресурс]: — Режим доступа: https://energoeffect.gov.by/news/news-2024/20241220_news3—Дата доступа: 14.02.2025

6. Полещук: внедрение ВИЭ позволяет в Беларуси каждый год экономить около 500 тысяч тонн условного топлива – [Электронный ресурс]: / Беларусь сегодня – Минск, 2024 — Режим доступа: <https://www.sb.by/articles/v-belarusi-za-14-let-moshchnost-ustanovok-vie-vyrosla-v-14-raz-i-sostavila-632-mvt.html?amp=1>—Дата доступа: 14.02.2025

Oganezov I.A.

DEVELOPMENT OF POWER INSTALLATIONS USING LOCAL FUELS AND RENEWABLE ENERGY SOURCES IN BELARUS

Abstract. The development of local fuels (LMF) and renewable energy sources (RES) in the economy of the Republic of Belarus in recent years is considered.

The planned values of saving fuel and energy resources and imported natural gas in natural units and monetary terms through the use of MW and RES are shown.

Keywords: energy, local fuels, energy saving, renewable energy sources, savings.

Пелешенко В.А.
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ
ЕСТЕСТВЕННОГО ПЛОТНОСТНОГО-ТЕМПЕРАТУРНОГО
РАССЛОЕНИЯ МОРСКИХ И ПРЕСНЫХ ВОД ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ
ЭНЕРГИИ**

Аннотация. Статья посвящена исследованию использования естественного температурно-плотностного расслоения морских и пресных вод для генерации энергии, в частности, с использованием технологии ОТЕС (Ocean Thermal Energy Conversion). В работе рассмотрены физические основы термоклина и его использование в энергетике посредством цикла Ренкина, а также инновационные подходы, для повышения КПД ОТЕС. Основные выводы подчеркивают потенциал прибрежных зон России для внедрения ОТЕС, несмотря на климатические ограничения. Выявлены ключевые препятствия внедрения ОТЕС и способы их преодоления.

Ключевые слова: ОТЕС, термоклин, цикл Ренкина, прибрежная энергетика.

Введение

Море – единственная надежда человечества

Жак Ив Кусто

Наше общество прошло множество этапов индустриального развития и на текущий момент стоит на пороге нового эволюционного витка - “Индустрия 5.0” [1], в рамках которого ИИ в полной мере сольется с достижениями в робототехнике, индустрии IoT и машиностроении, при этом не просто заменив ручной и умственный труд людей, а создаст по сути новое бесконечно расширяемое цифровое пространство как на уровне цифровых двойников реальных объектов так и на уровне совершенно новых объектов и интерфейсов заменяя и приумножая таким образом реальную физическую среду. Уже сейчас гонка ИИ, роботизация производства, переход с ДВС на электромобили, внедрение блокчейн технологий, демонстрирует существенное увеличение потребления энергоресурсов. С приближением и воплощением новой эры “Индустрия 5.0” энергопотребление будет расти экспоненциально и в итоге не далёк тот день, когда электроэнергия станет, по сути, доминирующим ресурсом, каким когда-то была нефть, а сейчас в эпоху “Индустрии 4.0” являются “большие данные”. Вместе с тем с исчерпанием континентальных ресурсов, как с точки зрения биологических, так и с точки зрения полезных ископаемых, и всеобщим трендом на усиление глобализации и укрепления мировой торговли, с созданием межгосударственных промышленных коопераций, происходит стремительное освоение шельфовых месторождений, развитие морских торговых путей и портовой инфраструктуры, с переносом места дислокации производств ближе к ресурсам в прибрежные районы. Таким образом в прибрежных городах несмотря на их логистические и сырьевые преимущества вопрос об увеличении энергопроизводства встаёт сейчас особенно остро. В западных странах, где за счёт колониального прошлого, население исконно концентрировалось в прибрежных районах, привязанных к портовой инфраструктуре, произошло

активное внедрение экологически чистых возобновляемых источников энергии, которые базируются на природных естественных прибрежных процессах таких как, ветра, морские течения, сила приливов и отливов и т.д. Уже сейчас, в Европе на долю возобновляемых источников энергии приходится более 47% от всего производства электроэнергии. Однако в РФ, несмотря на то что мы располагаем рекордными шельфовыми ресурсами и береговой линией в 40 тысяч километров, а также имеем фундаментальные исторические достижения в гидроэнергетике в лице Саяно-Шушенской ГЭС, Красноярской ГЭС и Братской ГЭС, на текущий момент слабо используется потенциал наших акваторий в энергетических целях. Отчасти это обусловлено тяжелыми климатическими условиями, которые тем не менее можно обойти за счёт использования для генерации энергии пограничных состояний естественного плотностно-температурного расслоения морских и пресных вод наших шельфовых акваторий, чему посвящена данная работа.

Плотностно-температурное расслоение морских и пресных вод

Ещё в начале 19 века, американский морской офицер, картограф, океанограф и метеоролог в одном лице - Мэтью Фонтейн Мори писал, что «В океане текут реки» которые сохраняют течение в пределах своих берегов, даже при самых сильных штормах и землетрясениях, “ложе которых образуют холодные воды, а стремнину — тёплые”. Тогда исследователи в основном ограничивались «поверхностным» представлением о водах и Мори М.Ф. наверняка имел ввиду природу таких течений как Гольфстрим или Куроисио, но его слова в равной степени также можно применить к такому явлению как “термоклин“, которое мы сейчас рассмотрим и которое, тем не менее, было подтверждено значительно позже чем в период работ Мори М.Ф., благодаря появлению и распространению глубоководной техники, которой тогда практически не было. Само по себе изменение температуры воды с глубиной в принципе довольно очевидно и подтверждалось простейшими эмпирическими наблюдениями ещё на заре естествознания, однако физическое описание этого процесса включает взаимосвязь множества параметров и физических явлений.

Проведём мысленный эксперимент. Предположим, что происходит равномерное прогревание поверхностного слоя воды до температуры $T_{\text{поверхности}}$. Введём допущение что вода при этом остаётся неподвижной, а тепло передается только за счет теплопроводности. Тогда распределение температуры, согласно закону Фурье, будет выражено линейной формулой вида:

$$T_{(z)} = T_{\text{поверхности}} - (q \cdot z / k),$$

(1)

где:

z — глубина (м),

q — плотность теплового потока (Вт/м²),

k — теплопроводность воды (~0.606 Вт/(м·К) при 25°С).

Предположим, что температура дна $T_{\text{дна}}$ постоянна, и нам известно расстояние от поверхности до дна – обозначим его величиной H . Таким образом изменение температуры с глубиной должно подчиниться закону:

$$T_{(z)} = T_{\text{поверхности}} - (T_{\text{поверхности}} - T_{\text{дна}}) \cdot z / H$$

(2)

Так в нашем стационарном режиме при H равном 10 м, на глубине 5 м мы должны получить температуру воды 17.5°C . Это выглядит довольно убедительно, но встаёт вопрос о том, как быстро это произойдёт при принятых нами допущениях. Если мы будем рассматривать динамический процесс, при котором вода только начала прогреваться в глубь то мы увидим, что из-за низкой теплопроводности воды скорость прогрева будет довольно медленной. Глубину прогрева за время t при этом можно выразить формулой:

$$\delta \approx \sqrt{\alpha \cdot t},$$

(3)

где:

$\alpha = k / \rho \cdot c_p$ — температуропроводность воды ($\sim 1.4 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$);
 ρ — плотность воды ($\sim 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$);
 c_p — удельная теплоёмкость ($\sim 4186 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$).

Таким образом за сутки прогреется только 0.11 м воды, а для прогрева 10 м уйдут десятилетия что противоречит действительности.

В реальных условиях за счёт разности плотности теплой и холодной воды, и воздействию ветровой нагрузки на свободную поверхность жидкости происходит конвекция – тепловой перенос за счёт перемешивания жидкости. В глубоких озёрах летом конвекция подавлена с переходом в стратификацию. Однако зимой и в северных широтах охлаждение поверхности запускает постоянную циркуляцию жидкости перемешивая холодные и теплые массы у поверхности за счёт конвекции.

Нагрев жидкости также происходит неоднородно. Первые два метра воды поглощают практически всё «тепловое» излучение - инфракрасное излучение. Тем не менее оптические свойства воды позволяют свету проникать до глубин в 100м. При этом формула поглощения света имеет вид:

$$I_{(z)} = I_0 \cdot e^{-kz},$$

(4)

Где k это коэффициент ослабления света зависящий от чистоты воды, а I_0 это интенсивность освещения поверхности.

Таким образом тепло от солнечного света распределяется неравномерно и редко достигает глубины более 10 м, но опять же за счёт конвекции создаёт стабильный теплый эпилимнионный слой с глубиной до 100м.

Если ещё учесть охлаждение поверхностного слоя за счёт испарения, которое мы обозначим величиной Q , которое отнимает порядка $\sim 2260 \text{ кДж}/\text{кг}$, и то, что теплопроводность воды понижается с понижением температуры, упрощённая модель теплопереноса воды будет иметь вид:

$$\partial T / \partial t = \alpha \cdot \partial^2 T / \partial z^2 - v \cdot \partial T / \partial z + I(z) / \rho c_p - Q / \rho c_p H$$

(5)

Вышеизложенные процессы на практике формируют в толще воды три слоя:

- Слой с верхними прогретыми водами – Эпилимнион;

– Слой с резким перепадом температуры – “термоклин” – Металимнион;

– Слой с холодными придонными водами – Гиполимнион.

Рассмотрим это явление с точки зрения генерации электроэнергии.

Схема замкнутого цикла преобразования тепловой энергии океана в электроэнергию

Градиент температуры и, в частности, термоклин, который как правило расположен на глубине не более 200 метров позволяет использовать температурные эффекты морской воды для извлечения энергии океана через классический цикл Ренкина. Впервые практическая реализация этого принципа была предложена французским инженером Жаком-Арсеном д’Арсонвалем [2]. На рисунке 1 представлена схема замкнутого цикла преобразования тепловой энергии океана в электроэнергию (ОТЕС), включающая такие компоненты как испаритель, турбину, генератор, конденсатор и насосы:

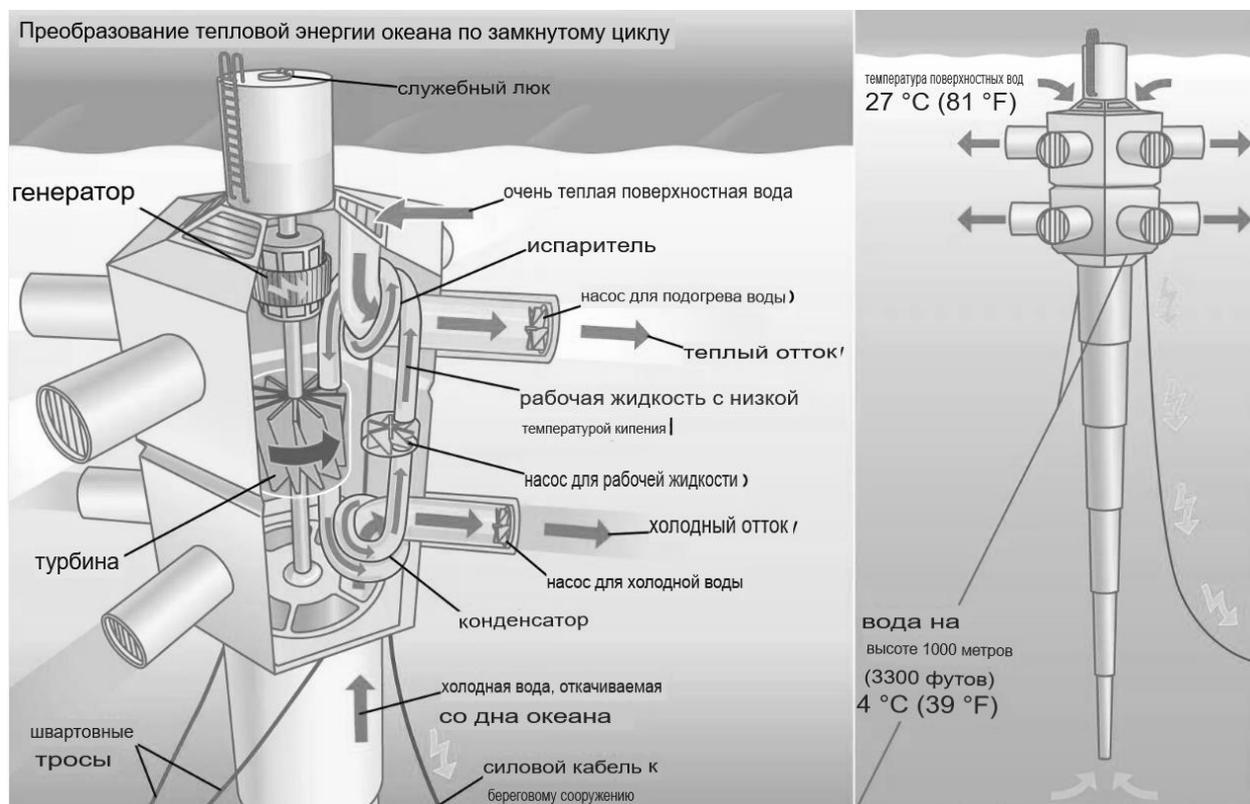


Рисунок 1 Схема замкнутого цикла преобразования тепловой энергии океана в электроэнергию (ОТЕС)

В качестве рабочей жидкости в системы используются вещества, обладающие низкой температурой кипения, в частности аммиак. Насосами рабочая жидкость нагнетается в испаритель. В испарителе происходит нагрев рабочей жидкости через теплообменник, в который поступают теплые воды (25–30°C) из эпилимниона. Под действием высокой температуры рабочая жидкость превращается в пар. Расширение пара создаёт давление в системе, которое обеспечивает вращение турбины. Вращение турбины передаётся через вал на электрогенератор, вырабатывающий электричество. После осуществления «работы» пар поступает в конденсатор, где превращается в жидкость за счёт

охлаждения холодными водами (4–10°C) из гиполимниона. После чего сконденсированная рабочая жидкость обратно закачивается в испаритель для повторения цикла.

Практическая реализация ОТЕС

В качестве примера практической реализации технологии ОТЕС можно привести установку замкнутого цикла мощностью 100 кВт, построенную в 1970 году Токийской электроэнергетической компанией на острове Науру. В США в 1990 годах на Гавайских островах под эгидой ВМС США была введена в строй экспериментальная электростанция замкнутого цикла мощностью 250 кВт, а в 2015 году разработанная и введена в строй серийная гражданская электростанция мощностью 105 кВт (рис.2). В 2002 плавучая ОТЕС мощностью 1 МВт была запущена в Индии. В 2013 ОТЕС мощностью 100 кВт была запущена в Японии на острове Окинава.



Рисунок 2. ОТЕС Makai Ocean Engeneering, Гавай

Активные разработки в области ОТЕС ведет Франция - проект NEMO (16 МВт) и Великобритания - ОТЕС-платформа «Доминик» (1.5 МВт). В 2023 года была испытана и введена в эксплуатацию серийная плавучая ОТЕС-платформа мощностью 20 киловатт в Китае с припиской к порту Гуанчжоу. На текущий момент 39 островных государств в рамках SIDS DOCK, включая острова Тихого океана, Карибские острова, острова в Атлантическом и Индийском океанах, под эгидой ООН подписали соглашение с Global OTEC Resources о сотрудничестве в разработке и внедрении ОТЕС электростанций в рамках единого проекта развития энергетики, основанного на возобновляемых источниках энергии, и предполагающего запуск массовой постройки островных электростанций ОТЕС.

Перспективы использования ОТЕС

Теоретически ОТЕС может вырабатывать в 10–100 раз больше энергии, чем другие источники энергии в океане, такие как, к примеру энергия волн [3]. Но строительство подобных станций довольно дорогостояще с соотношением 1,5 млрд долларов США на каждые 100 МВт мощности. Около 40% стоимости электростанций ОТЕС приходится на трубопроводы [4]. Перенос основных агрегатов непосредственно на глубину термоклина позволил бы сэкономить 600 миллионов долларов США на каждые 100 МВт мощности и обеспечил бы их бесперебойное функционирование на территории РФ, защитив их тем самым от обледенения при эксплуатации в северных широтах. Использование таких высоко токсичных рабочих жидкостей как аммиак также ограничивает внедрение технологии ОТЕС. Теоретически этот недостаток может быть решен за счёт перехода на фторуглероды, такие как ХФУ и ГХФУ или отказа от замкнутого цикла в пользу открытого цикла, где в качестве рабочей жидкости используется морская вода, которая в вакуумной камере кипит при низкой температуре, превращаясь в пар и вращая турбины [5]. При этом при конденсации на выходе получается пресная вода, которая как побочный продукт, может быть, в дальнейшем использована на близлежащих плавучих платформах и островах, которые как правило испытывают дефицит пресной воды.

Заключение

Стоит отметить, что использование производства электроэнергии за счёт цикла Ренкина хоть и является классическим для энергетической отрасли, но в целом это довольно грубое решение с низкой эффективностью. Механические потери в турбинах и насосах снижают КПД в ОТЕС в среднем на 10–15%. Реальный процесс расширения пара также не изоэнтропийный и сопряжён с потерями. Также потери обусловлены тепловыми утечками в испарителе, отборе энергии при охлаждении и т.д. Даже при сверхкритичном паре при $T > 374^\circ\text{C}$ и $P > 221$ бар цикла Ренкина обеспечивает КПД менее 50%. В Атомной энергетике КПД достигает 30–35%. В ОТЕС теоретический КПД составляет 6–12%, практический 3–7%. Решением может быть отказ от цикла Ренкина и перехода к прямой механической передаче энергии на электрогенераторы за счёт “поплавковых” систем, изготовленных из материалов, обладающих отрицательным коэффициентом теплового расширения, таких как, к примеру $\text{Ca}_2\text{RuO}_{4-\gamma}$ в сочетании с аэрогелем для обеспечения нужной плотности. Это позволило бы создавать непрерывные колебания поплавков при их нахождении в термоклин. В верху термоклина, за счёт увеличения температуры, а следовательно уменьшения их объема и плавучести, они начинают погружаться. И наоборот при достижении нижней части термоклина они расширяются, увеличивая объем и плавучесть с последующим всплытием из-за охлаждения. Таким образом образуются бесконечные поперечные колебания, которые при прямом преобразовании в электроэнергию способны обеспечить КПД от 30% до 50%.

Список литературы

1. Бабкин А.В., Шкарупета Е.В., Плотников В.А. Интеллектуальная киберсоциальная экосистема индустрии 5.0: понятие, сущность, модель // Экономическое возрождение России. 2021. № 4 (70). С. 39–62.
2. Пионтковский И. А. Арсен Д'Арсонваль. / «Природа», 1946, № 3.
3. Эйвери Уильям Х. и Чи Ву. Возобновляемая энергия из океана: руководство по ОТЕС. Нью-Йорк: Издательство Оксфордского университета. 1994.
4. Финни, Карен Энн. «Преобразование тепловой энергии океана». Инженерный журнал Гуэлфа. 2008.
5. Бхаратан, Д.; Крейт, Ф.; Шлеп, Д.; Оуэнс, У. Л. (январь 1984). «Тепло- и массообмен в системах ОТЕС с открытым циклом». «Теплопередача». 5 (1–2): 17–30.

Vitaliy Peleshenko

USING THE BOUNDARY STATES OF THE NATURAL DENSITY-TEMPERATURE STRATIFICATION OF MARINE AND FRESH WATERS FOR ENERGY GENERATION

Abstract. The article is devoted to the study of the use of natural temperature-density stratification of marine and fresh waters for generating energy in private using OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) type technology. The paper considers the physical foundations of thermocline and its use in energy through the Rankine cycle, as well as innovative approaches to increase the efficiency of OTEC. The main findings highlight the potential of Russia's coastal zones for implementing OTEC, despite climate constraints. The key obstacles to the implementation of OTEC and ways to overcome them have been identified.

Keywords: OTEC, thermocline, Rankine cycle, coastal energy.

Фальченко А. Д., Наталевич М.В.

АНАЛИЗ БАЛАНСА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО АДМИНИСТРАТИВНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНЫМ ЕДИНИЦАМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Научный руководитель: Манцерава Т.Ф.

Аннотация. В статье проводится анализ структуры потребления и генерации электроэнергии в рамках административно-территориальных единиц Республики Беларусь, включая объекты, использующие возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Рассматриваются региональные различия в энергобалансе ВИЭ, зависящие от специфики территорий различных областей страны. Проведен анализ энергетического баланса по областям и регионам Республики Беларусь.

Ключевые слова: электрическая энергия, производство, потребление, баланс, возобновляемые источники энергии.

Использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Республике Беларусь охватывает множество секторов экономики, промышленности и сельского хозяйства. Это связано с необходимостью повышения энергоэффективности, снижения зависимости от ископаемых ресурсов и решению экологических проблем.

Использование ВИЭ в теплоснабжении и отоплении является одним из наиболее перспективных направлений в нашей стране. Это связано с высокими затратами на традиционные источники тепла (газ, уголь, мазут) и стремлением к энергонезависимости. В Беларуси также активно используются древесные отходы (кора, щепа, опилки) для производства тепла. В сельской местности строятся котельные, работающие на биотопливе, снабжающие отоплением дома и социальные объекты. Активно используются и внедряются установки для переработки органических отходов (навоз, растительные остатки) на биогазовых установках.

Солнечные коллекторы устанавливаются на крышах домов, гостиниц, спортивных комплексов для нагрева воды, что позволяет снизить затраты на горячее водоснабжение. Солнечные панели устанавливаются на крышах промышленных объектов для снижения затрат на электроэнергию (солнечные панели на крыше завода "Белшина" в Бобруйске). Ветровые установки внедряются для обеспечения энергией удаленных сельскохозяйственных объектов, таких как фермы, склады и перерабатывающие предприятия.

Возобновляемые источники энергии широко используются в сельском хозяйстве. Это обусловлено наличием большого количества органических отходов и необходимостью снижения затрат на энергоресурсы. Например, биогазовые установки (переработка навоза, растительных остатков и других органических отходов в биогаз, который используется для производства электроэнергии, тепла и удобрений; утилизация отходов). Биомасса используется для генерации тепла и пара на промышленных предприятиях, особенно в деревообрабатывающей и пищевой промышленности.

Производство и использование биотоплива, таких как биодизель и биоэтанол в качестве альтернативы традиционному топливу. Биодизель производится из рапсового масла, а биоэтанол — из зерновых культур (заводы по производству биодизеля в Минской и Гродненской областях).

Энергетический сектор Беларуси включает в себя традиционные источники энергии, такие как уголь, газ и нефть, а также растущий сегмент возобновляемых источников, такие как энергия ветра, солнца и водных масс. В настоящее время в Республике Беларусь расположено 485 установок по использованию возобновляемых источников энергии [2].

Потребление электроэнергии в Беларуси варьируется в зависимости от региона. На рисунке 1 представлен баланс мощностей станций, использующих ВИЭ, по областям Республики Беларусь. Как видно по рисунку, Могилевская область является лидирующей по производству ВИЭ в нашей стране (205,43 МВт). В Могилевской области крупнейшие ВЭС и СЭС расположены в Чериковском, Дрибинском и Могилевском районах [2].

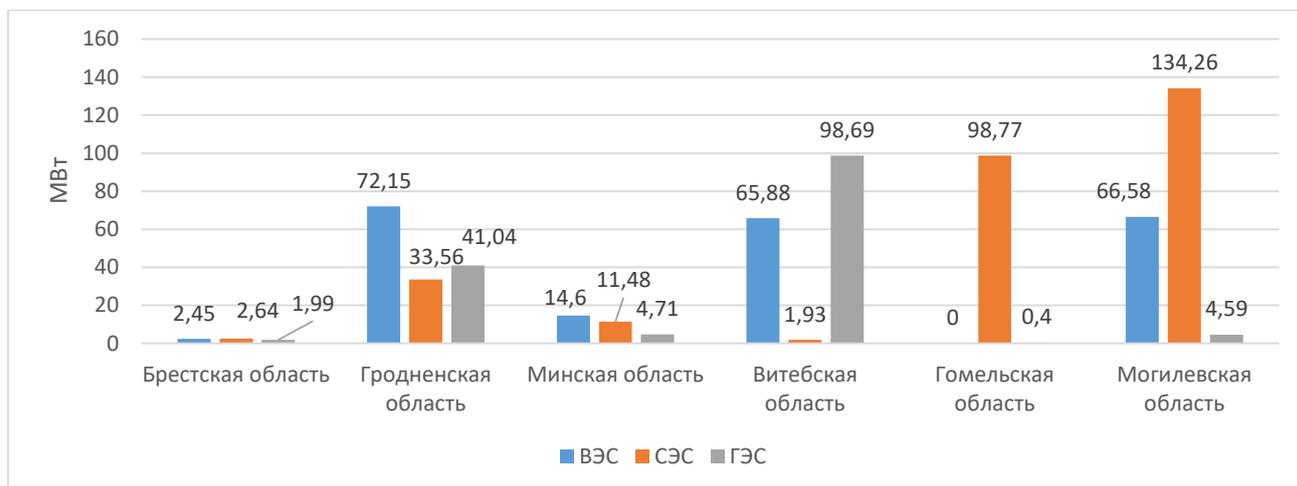


Рис. 1 – Баланс мощностей станций, использующих ВИЭ, по областям Республики Беларусь

Одной из основных целей государственной политики в области энергетики является увеличение доли ВИЭ в общем энергобалансе и снижение зависимости от импорта углеводородов. Как видно по данным рисунка 1, Брестская область имеет меньший процент в доле производства электроэнергии на станциях, использующих ВИЭ (7,08 МВт).

Крупнейшие гидроэлектростанции расположены в Гродненском (37,36 МВт), Витебском (40,2 МВт), Полоцком (22 МВт) и Бешенковичском (33 МВт) районах. Гидроэнергетика активно развивается в районах с крупными водоемами (северо-западные районы Беларуси). Крупнейшие солнечные электростанции расположены в Сморгонском (18,63 МВт), Брагинском (22,68 МВт) и Быховском (12,45 МВт) районах. Крупнейшие ветровые электростанции расположены в Лиезненском (42,95 МВт), Могилевском (24,12 МВт) и Новогрудском (39,95 МВт) районах. Учитывая среднегодовую скорость ветра, Могилевская и Витебская область имеют значительный потенциал в развитии ветроэнергетики.

Результаты анализа регионального распределения электроэнергетических балансов на территории Республики Беларусь свидетельствуют о наличии значительного потенциала для стратегического развития сектора возобновляемых источников энергии. На текущий момент наименее выраженная динамика внедрения ВИЭ наблюдается в Брестской области, что требует структурной модернизации локальной энергетической политики.

Электроэнергетическая система Беларуси централизована, и производство электроэнергии осуществляется преимущественно на крупных станциях, расположенных в различных областях. В частности, крупные теплоэлектростанции расположены в Минской, Гомельской и Витебской областях. С вводом БелАЭС, которая находится в Гродненской области, атомная генерация приобрела статус критически важного компонента в обеспечении базовой нагрузки энергосистемы.

На рисунке 2 представлено производство электрической энергии по областям Республики Беларусь за 2024 год.

По сравнению с 2000 годом производство электроэнергии увеличилось на 22,5% в Брестской области и на 11,65% в Гродненской области. Однако в Витебской, Гомельской, Могилевской и Минской областях наблюдалось снижение: на 3,75%, 15,32%, 12,37% и 10,9% соответственно.

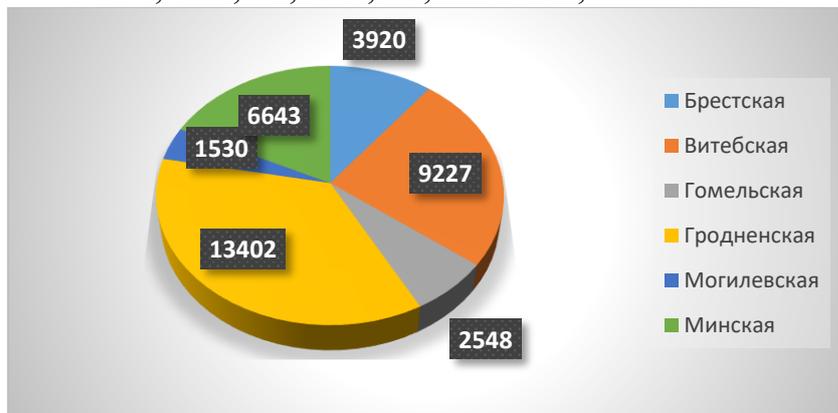


Рис. 2 – Производство электрической энергии по областям Республики Беларусь за 2024 год

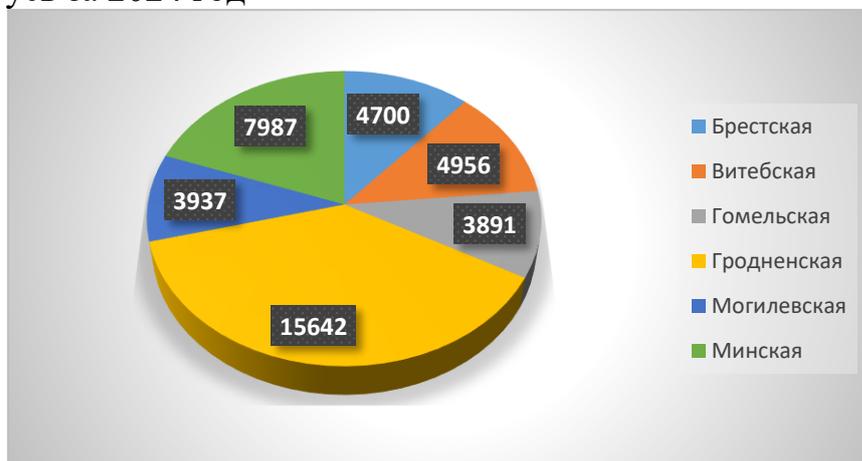


Рис. 3 – Потребление электрической энергии по областям Республики Беларусь за 2024 год

Потребление в 2024 году по сравнению с 2000 годом увеличилось на 44,79% в Брестской области, на 13,95% в Витебской, на 35,59% в Гродненской, на 18,41% в Могилевской и на 2,56% в Минской областях. В Гомельской области наблюдалось снижение потребления на 18,6%.

Анализ баланса электрической энергии по областям Республики Беларусь показывает, что энергосистема страны находится на этапе активного развития и модернизации. Введение новых мощностей, таких как БелАЭС, позволяет существенно изменить структуру энергобаланса и снизить зависимость от внешних источников. Однако неравномерное распределение производственных мощностей и потребности в электроэнергии между областями требуют внимания со стороны государства. Устойчивое развитие электроэнергетики, включая увеличение доли возобновляемых источников энергии и улучшение инфраструктуры, позволит обеспечить надежное и экологически чистое электроснабжение в долгосрочной перспективе. Внедрение передовых технологий, таких как умные сети и системы управления энергопотреблением,

оптимизирует использование электроэнергии и снижает потери. Переход на ВИЭ и снижение доли углеводородного топлива уменьшают выбросы парниковых газов и улучшают экологическую ситуацию. Эти шаги не только улучшат баланс электрической энергии, но и создадут устойчивую и безопасную энергетическую систему, служащую основой для дальнейшего развития страны.

Список литературы

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://belstat.gov.by/>. – Дата доступа: 24.10.2024.
2. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://195.50.7.239/Charts>. – Дата доступа: 29.10.2024.
3. Государственное производственное объединение электроэнергетики «БЕЛЭНЕРГО» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energo.by>. – Дата доступа: 22.10.2024.

Falchenko A.D., Natalevich M.V.

ANALYSIS OF THE ELECTRIC ENERGY BALANCE BY ADMINISTRATIVE-TERRITORIAL UNITS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Scientific adviser: Mantcerova T.F.

Abstract: This article provides a comprehensive analysis of the structure of consumption and generation of electricity produced by renewable energy facilities at the level of administrative-territorial units of the Republic of Belarus. Regional imbalances in the renewable energy balance are analyzed, depending on the territorial characteristics of the country's regions. The analysis of the energy balance in the regions of the Republic of Belarus is carried out.

Keywords: electric energy, production, consumption, balance, renewable energy sources.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

1. **Антипин Сергей Владимирович**, старший преподаватель (ЧОУ ДПО «Владимирский учебный центр «Энергетик»; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир) svantipin@vlsu.ru
2. **Белякова Дарья Андреевна**, студент (Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир) d.belyackova2017@yandex.ru
3. **Демидов Дмитрий Вячеславович**, студент (Вятский Государственный Университет, г. Киров) stud205208@vyatsu.ru
4. **Долгаль Станислав Владимирович**, диспетчер участка оперативно технологического управления основной сети диспетчерской службы центра управления сетями (ПАО «Россети Центр» - «Воронежэнерго», г.Воронеж), внештатный преподаватель (ЧУ ДПО «Воронежский учебный центр» «Энергетик», г.Воронеж) dolgal.stanislaw@yandex.ru
5. **Долгов Геннадий Филиппович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики (Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир) dolgov@vlsu.ru
6. **Ермолаев Андрей Вячеславович**, студент (Вятский Государственный Университет, г. Киров) stud205217@vyatsu.ru
7. **Зажигин Василий Викторович**, кандидат технических наук, доцент (военно-инженерная ордена Кутузова академия имени героя советского союза генерал-лейтенанта инженерных войск Д.М. Карбышева) zazhiginv@mail.ru
8. **Коледа Анастасия Сергеевна**, студент (Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Республика Беларусь) nastyakoleda1@gmail.com
9. **Корсак Екатерина Павловна**, магистр экономических наук, старший преподаватель кафедры экономики и организации энергетики (Белорусского национального технического университета, г.Минск, Республика Беларусь) kotyal@yandex.ru
10. **Лапченко Дарья Александровна**, старший преподаватель (Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Республика Беларусь) lapchenko_d@mail.ru
11. **Мальшева Альвина Дмитриевна**, ассистент (Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, г.Белгород) kuznetsova.alvina18@gmail.com
12. **Манцерова Татьяна Феликсовна**, кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой экономики и организации энергетики (Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Республика Беларусь) mantf@mail.ru

13. **Михайлов Сергей Зиновьевич**, сотрудник (ООО «Мосэлектрощит», г.Ковров) kanircha@list.ru
14. **Молокин Юрий Валентинович**, кандидат технических наук, доцент (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г.Ковров) kanircha@list.ru
15. **Наталевич Мария Вадимовна**, студент (Белорусский национальный технический университет, г.Минск, Республика Беларусь) maryland04@mail.ru
16. **Оганезов Игорь Азизович**, кандидат технических наук, доцент кафедры экономики и организации предприятий АПК (Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь) Ig11122@tut.by
17. **Пелешенко Виталий Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики высшей школы кибертехнологий, математики и статистики Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова (РЭУ им. Г.В. Плеханова, г. Москва) peleshenko.va@rea.ru
18. **Сатров Михаил Анатольевич**, студент (Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ), г. Новосибирск) mihail01@inbox.ru
19. **Седогин Михаил Александрович**, студент (Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, г.Белгород) sedogin2012@mail.ru
20. **Семернин Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент (Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, г.Белгород) semernin.64@mail.ru
21. **Сиротин Николай Федорович**, директор (ЧОУ ДПО «Владимирский учебный центр «Энергетик», г.Владимир) vl.energetik@yandex.ru
22. **Соколов Георгий Юрьевич**, студент (Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г.Владимир) sgy5313@gmail.com
23. **Соловьева Алина Сергеевна**, старший преподаватель (Вятский Государственный Университет, г. Киров) usr20976@vyatsu.ru
24. **Соловьева Татьяна Александровна**, соискатель научной степени (Военно-инженерная ордена Кутузова академия имени героя советского союза генерал-лейтенанта инженерных войск Д.М. Карбышева) solovyeva_98@mail.ru
25. **Сорокин Антон Дмитриевич**, студент (Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г.Владимир) sopokun17459@gmail.com
26. **Сороченко Павел Александрович**, ведущий инженер службы подстанций (ПАО «Россети Центр» - «Воронежэнерго», г.Воронеж) sorochenko.pavel48@gmail.com

27. **Уснунц-Кригер Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой базовых дисциплин (Выксунский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»») konf.vfmisis@gmail.com
28. **Фальченко Александра Дмитриевна**, студент (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь) afalchenko11.03@mail.ru
29. **Ходжиогло Алексей Юрьевич**, студент (Выксунский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Выкса) voronmu@mail.ru
30. **Чашин Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», г. Ковров) kanircha@list.ru
31. **Шмелёв Вячеслав Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и электроэнергетики (Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир) shmelev@vlsu.ru

Научное издание

ЭНЕРГИЯ БУДУЩЕГО: ИННОВАЦИИ, ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

**МАТЕРИАЛЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

26 марта 2025 года
г. Владимир

*Под общей редакцией старшего преподавателя ЧОУ ДПО
«Владимирский учебный центр «Энергетик» С.В. Антипина*

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТИПОГРАФИЯ «АРИАЛ».
295015, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Севастопольская, зд. 31а,
тел.: +7 978 71 72 901, e-mail: it.arial@yandex.ru, сайт: arialprint.ru