

«Энергетика будущего»

Материалы международной
научно-практической конференции

1 - 3 октября

Уфа, 2025г.



Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

*Материалы
Международной научно-практической конференции
(г. Уфа, 1–3 октября 2025 г.)*

Научное электронное издание сетевого доступа

Уфа
Уфимский университет
2026

УДК 620.9
ББК 31
Э65

*Печатается по решению кафедры электромеханики
ПИШ «Моторы будущего» УУНУТ.
Протокол № 20 от 25.02.2026 г.*

Редакционная коллегия:

канд. техн. наук, доцент кафедры, и.о. заведующего кафедрой электромеханики,
директор ПИШ «Моторы будущего» **М. В. Охотников** (*отв. редактор*);
д-р техн. наук, профессор кафедры электромеханики **Ф. Р. Исмагилов**;
преподаватель кафедры электромеханики **А. М. Кабиров**;
канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики **И. З. Шахмаев**;
канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики **Е. М. Федосов**

Энергетика будущего: материалы Международной научно-практической
Э65 конференции (г. Уфа, 1–3 октября 2025 г.) / отв. ред. М. В. Охотников.
[Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа: Уфим-
ский университет, 2026. – 115 с. – URL: [https://uust.ru/media/documents/
digital-publications/2026/022.pdf](https://uust.ru/media/documents/digital-publications/2026/022.pdf) – Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-6338-8

В сборнике представлены научные статьи и доклады о современных проблемах
энергетики, таких как интеллектуальные энергетические системы, релейная защита
и автоматика.

Статьи приводятся в авторской редакции, авторы несут ответственность за
достоверность и точность материала.

УДК 620.9
ББК 31

ISBN 978-5-7477-6338-8

© Уфимский университет, 2026

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В РАМКАХ ПРОВЕДЕНИЯ
КОНФЕРЕНЦИИ..... 5

**СЕКЦИЯ II. ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ: ПРОИЗВОДСТВО,
ИНФРАСТРУКТУРА И СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

1 *Ахмадиев А.Р. Ахметгалеев Э.А.* Прогнозирующая диагностика и увеличение эксплуатационного ресурса литий-ионных аккумуляторов в электротранспорте..... 7

2 *Ахметгалеев Э.А., Ахмадиев А.Р.* Перспективы внедрения твёрдых аккумуляторов в системы энергообеспечения городского электротранспорта..... 12

3 *Горюхин М.О., Иванов М.В., Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У.* Инновационные теплообменные аппараты для охлаждения тяговых электродвигателей электробусов..... 16

4 *Иванов М.В.* Потенциал углеродных нанотрубок для электрических машин электротранспорта..... 23

5 *Исмагилов Ф.Р., Тимербулатов Т.А.* Электромобиль как часть энергосистемы 28

6 *Мулюков А.А., Ахмадиев А.Р.* Аддитивные технологии в производстве обмоточных материалов высокоудельных электрических машин. Обзор современного состояния и перспектив 33

7 *Пономарев Г.О.* Энергия черной дыры для электротранспорта: вызовы и решения 41

8 *Султангареев Д.У., Шайхлисламов А.И.* Методы повышения отказоустойчивости обмоток тягового электродвигателя гибридного КАМАЗа 44

9 *Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У., Иванов М.В., Горюхин М.О.* Повреждение подшипников из-за «подшипниковых токов»..... 47

10 *Щепин Д.И., Фархутдинов Р.И.* Применение методов искусственного интеллекта для комплексного технического диагностирования тяговых электродвигателей..... 54

СЕКЦИЯ III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

11 *Батталханов А.З.* Цифровая трансформация и низкоуглеродный переход в электроэнергетике и транспортном секторе: вызовы и перспективы для Казахстана 60

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

12	<i>Батталханов А.З.</i> Низкоуглеродная энергетика: исторический контекст, современные парадоксы и системные вызовы.....	63
13	<i>Паиков Р.А.</i> Нейросетевая генерация сценариев противоаварийной подготовки персонала электроэнергетических систем	66
14	<i>Плодистый Б.А., Гуриков О.В.</i> Цифровая модель статической тиристорной системы самовозбуждения для анализа переходных процессов в энергосистеме	72
15	<i>Рахман Мд. Нафиз</i> Оптимизация микросетей при помощи искусственного интеллекта для повышения энергоэффективности и экономии средств в Бангладеш.....	79
16	<i>Фархутдинов Р.И., Щетин Д.И.</i> Интеллектуальные зарядные станции для электротранспорта с адаптацией к нагрузкам энергосети	88
17	<i>Шакуров Д.И., Савиных А.А.</i> Использование умных энергетических сетей («smart grid») для оптимального распределения нагрузки.	92

СЕКЦИЯ IV. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА

18	<i>Батталханов А.З.</i> Цифровая трансформация релейной защиты: современное состояние и перспективы в контексте энергетики будущего	97
19	<i>Захаров В.А., Малышев Н.А., Никифоров И.К.</i> Проектирование однопорогового компаратора с электронным ключом герконового реле РПГ-5	101
20	<i>Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Кудрявцев Н.С., Ахмеджанова Э.Р.</i> Организация плавки гололёда переменным током на проводах воздушных линий.....	107

**ПЕРЕЧЕНЬ ДОКЛАДОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В РАМКАХ
ПРОВЕДЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ**

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

1. *Смирнов А.Н.* Проверка функционирования САУ ГТУ на соответствие системным требованиям
2. *Охотников М.В.* Методология создания и проектирования электрических и гибридных силовых установок*
3. *Проскуракова Л.Н.* Ключевые технологические тренды развития интеллектуальных энергетических систем
4. *Федосов Е.М.* Применение технологий информационного моделирования при проектировании объектов электросетевого хозяйства

**СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ: ПРОИЗВОДСТВО,
ИНФРАСТРУКТУРА И СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ»**

1. *Гордеева И.А.* Развитие зарядной инфраструктуры в РФ
2. *Горюхин М.О.* Инновационные теплообменные аппараты для охлаждения тяговых электродвигателей электробусов*
3. *Мулькаманов Э.* Повышение рентабельности ЭЭС за счёт установки накопителя энергии
4. *Султангареев Д.У., Шайхлисламов А.И.* Методы повышения отказоустойчивости обмоток тягового электродвигателя гибридного КАМАЗа
5. *Кобзов Д.В.* Критический обзор двигателей с прямым приводом в электромобилях
6. *Хамзин Ф.С.* Повреждение подшипников из-за «подшипниковых токов»
7. *Иванов М.В.* Применение карбоновых нанотрубок в обмотках электрогенераторных установок*

**СЕКЦИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ»**

1. *Проскуракова Л.Н.* Ключевые технологические тренды развития интеллектуальных энергетических систем
2. *Плодистый Б.А.* Цифровая модель статической тиристорной системы самовозбуждения для анализа переходных процессов в энергосистеме
3. *Пашков Р.А.* Нейросетевая генерация сценариев противоаварийной подготовки персонала электроэнергетических систем

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение от 17.01.2025 № 075-03-2025-407 о предоставлении субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00001-25-00 от 26.12.2024).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

4. *Логунов А.В.* Применение амплитудно-фазовых координатных характеристик в рамках методики определения места повреждения кабельной линии

5. *Фархутдинов Р.И.* Интеллектуальные зарядные станции для электротранспорта с адаптацией к нагрузкам энергосети

СЕКЦИЯ «РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА»

1. *Рева А.А.* Тенденции развития систем РЗА в современных условиях

2. *Гарафутдинов Р.Р.* Влияние устройств ограничения выдачи мощности электростанций промышленных предприятий на процессы противоаварийного управления и регулирования параметров электроэнергетического режима энергосистем

УДК 621.355.2

**Прогнозирующая диагностика и увеличение эксплуатационного ресурса
литий-ионных аккумуляторов в электротранспорте**

Ахмадиев А.Р., Ахметгалеев Э.А.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. С увеличением доли электромобилей на мировом автомобильном рынке растёт спрос на надёжные, безопасные и долговечные системы управления аккумуляторами (BMS). Ключевую роль в этом процессе играет прогнозирующая диагностика, основанная на методах искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО). Такой подход позволяет не только точно определять текущее состояние аккумулятора, но и прогнозировать оставшийся срок его службы (RUL), а также моменты резкого ухудшения характеристик — так называемые «точки перегиба». В данной работе представлен обзор современных методик прогнозной диагностики, включая глубокое обучение, гибридные архитектуры и федеративное обучение, а также реальные экспериментальные данные, подтверждающие их эффективность. Особое внимание уделено практическим достижениям 2022–2025 гг. и стратегиям, направленным на продление срока службы аккумуляторов за счёт оптимизации режимов зарядки, термоконтроля и балансировки элементов.

Литий-ионные аккумуляторы — ключевой компонент современного электротранспорта. Их надёжность, безопасность и долговечность напрямую влияют на экономическую целесообразность и экологическую устойчивость электромобилей. Согласно данным [1], на долю транспортного сектора приходится около 25 % глобальных выбросов парниковых газов, и широкое распространение электромобилей является одним из главных способов их сокращения. Однако в процессе эксплуатации аккумуляторы неизбежно изнашиваются: снижается ёмкость, растёт внутреннее сопротивление, что в конечном счёте приводит к необходимости их замены. Это увеличивает стоимость владения транспортным средством и негативно сказывается на экологическом следе.

Классические методы мониторинга, основанные на физических моделях и фильтрах Калмана, оказываются недостаточно эффективными в условиях реальной эксплуатации, где нагрузки динамичны, а внешние факторы непредсказуемы [1]. На смену им приходят интеллектуальные методы, способные обучаться на больших массивах данных и выявлять сложные нелинейные закономерности старения. Цель данной статьи — проанализировать современные подходы к прогнозирующей диагностике и стратегии увеличения срока службы литий-ионных аккумуляторов на основе последних научных исследований и экспериментальных данных.

Для эффективной диагностики необходимо точно оценить три ключевых показателя:

- SoC (State of Charge) — текущий уровень заряда, аналог запаса топлива в баке;
- SoH (State of Health) — относительная ёмкость по сравнению с новым состоянием. Обычно предельный срок эксплуатации (EOL) определяется при $SoH = 80 \%$ [2];

- RUL (оставшийся срок службы) — прогнозируемое количество циклов зарядки-разрядки или календарных дней до достижения конца срока службы;

Основные сложности, с которыми сталкиваются системы диагностики:

- Нелинейный характер деградации: на начальном этапе старение происходит медленно, затем наступает резкий скачок — «точка перегиба» (knee point) [3]. Важно предсказать её появление как можно раньше;
- Разнообразие условий эксплуатации: температура, скорость зарядки, глубина разряда — все эти факторы по-разному влияют на скорость износа;
- Дефицит данных: получение качественных данных о деградации в реальных условиях затруднено из-за коммерческой тайны и длительности процесса [4];

Глубокое обучение для оценки SoH и RUL:

- Глубокие нейронные сети, особенно рекуррентные (RNN) и свёрточные (CNN), показали высокую эффективность при анализе временных рядов (напряжение, ток, температура);

- LSTM и GRU: идеально подходят для обработки последовательных данных. В исследовании [5] (2024) LSTM-модель, обученная на данных о зарядке, показала ошибку прогнозирования уровня заряда менее 5,99 % даже при использовании данных только от одного аккумулятора. В другой работе [6] (2022) сеть LSTNet (ConvLSTM + авторегрессия) достигла MAE = 0,58 % и MAPE = 0,435 % на данных NASA при обучении на 40 % выборки;

- CNN и гибридные модели: CNN эффективны для извлечения пространственных признаков. Гибридная архитектура CNN-LSTM-CRF, представленная в [7] (2022), впервые применила слой условных случайных полей (CRF) для моделирования зависимостей в последовательностях деградации, что повысило интерпретируемость прогнозов. Модель CNN-BiGRU [8] (2024), оптимизированная с помощью байесовского поиска, показала MAE = 2,080 % и RMSE = 2,516 % на тех же данных NASA;

Прогнозирование «точки перегиба»:

Одно из перспективных направлений — прогнозирование момента резкого ускорения деградации. Исследование [3] (2022) показало, что с помощью МО можно спрогнозировать эту точку с погрешностью всего 9,4 %, используя данные только за первые 50 циклов. Это позволяет своевременно корректировать режимы эксплуатации и замедлять износ.

Гибридные и физически обоснованные модели:

Для преодоления ограничений, присущих подходам, основанным исключительно на данных, разрабатываются гибридные модели, сочетающие в себе физические законы и гибкость ИИ.

- PINN (физически обоснованные нейронные сети): встраивают уравнения диффузии или роста поверхностно-активного слоя прямо в архитектуру, что повышает обобщающую способность и точность даже при небольшом объёме данных [4];

- Адаптивные модели: метод VBMССKF [9] (2023) объединяет фильтр Калмана, байесовский подход и критерий коррентропии для подавления выбросов. Он снизил среднюю абсолютную ошибку на 77 % по сравнению с классическим фильтром Калмана;

Передовые архитектуры:

- Трансформеры: архитектуры с механизмом внимания эффективно выявляют долгосрочные зависимости. «Конволюционные трансформеры» демонстрируют высокую точность в задачах оценки SoH [4].

- Федеративное обучение: позволяет обучать модели на распределённых данных тысяч электромобилей без передачи самих данных в облако, что решает вопросы конфиденциальности [4].

- AutoML: автоматически подбирает оптимальную архитектуру и гиперпараметры, ускоряя разработку и внедрение [4].

Прогнозирующая диагностика — это не цель, а инструмент для активного управления аккумулятором.

Оптимизация режимов зарядки:

Исследование [10] (2024) показало, что снижение частоты зарядки с ежедневной до раз в 4 дня увеличивает время до достижения SoH = 80 % на 36 %. Это подчёркивает влияние поведения пользователя. ИИ может рекомендовать оптимальные интервалы зарядки, например избегать 100 %-ной зарядки при высоких температурах.

Термический контроль:

Температура — ключевой фактор деградации. Повышение температуры с 30 °C до 40 °C может сократить срок службы вдвое [11]. Современные BMS используют искусственный интеллект для прогнозирования теплового режима и активации систем охлаждения/обогрева до наступления критических условий. CNN-модели эффективны для выявления локальных «горячих точек» [12].

Активная балансировка элементов:

Дисбаланс напряжений между ячейками приводит к преждевременному отключению и ускоренному износу слабых элементов. ИИ в режиме реального времени анализирует состояние каждой ячейки и управляет схемами балансировки, перераспределяя заряд. Это повышает общую ёмкость и срок службы батареи [13].

Адаптивное управление по RUL:

Зная прогнозируемый срок службы, BMS может адаптировать стратегии: для «уставших» аккумуляторов — ограничить мощность заряда/разряда, чтобы минимизировать нагрузку и продлить срок службы.

- Точность SoH (2024): гибридная модель GWO-BRNN [14] показала погрешность менее 1 % на данных NASA;
- Точность RUL (2024): модель MDA-LSTM [15] превзошла базовые методы на наборах данных NASA и CALCE;
- Прогноз «точки перегиба» (2022): погрешность 9,4 % при обучении на первых 50 циклах [3];
- Эффективность балансировки (2023): CNN-алгоритм диагностики неисправностей показал точность 96,32 % [13];
- Влияние режима зарядки (2024): зарядка раз в 4 дня вместо ежедневной увеличивает срок службы на 36 % [10];

Прогнозирующая диагностика на базе ИИ произвела революцию в управлении литий-ионными аккумуляторами. Современные алгоритмы глубокого обучения, гибридные и физически-информированные модели обеспечивают высокую точность оценки SoC, SoH и RUL, включая критические «точки перегиба». Это открывает путь для активных стратегий продления срока службы через оптимизацию заряда, термоменеджмент и интеллектуальную балансировку.

Однако впереди ещё много работы: обеспечение стабильной работы моделей на бортовых системах с ограниченными ресурсами, создание стандартизированных наборов данных. Будущее — за адаптивными, самообучающимися системами, которые будут совершенствоваться на основе опыта эксплуатации каждого конкретного автомобиля, обеспечивая максимальную эффективность, безопасность и долговечность.

Библиографический список

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) data, cited in: Li, H., Shaukat, H., Zhu, R., Bin Kaleem, M., & Wu, Y. (2025). Fault Detection of Li-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 17(14), 6322. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6322> (дата обращения: 23.09.2025).
2. Industry standard for EOL, cited in: Li, H., Shaukat, H., Zhu, R., Bin Kaleem, M., & Wu, Y. (2025). Fault Detection of Li-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 17(14), 6322. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6322> (дата обращения: 23.09.2025).
3. Severson, K.A., et al. "Data-driven prediction of battery failure for electric vehicles." *Nature Energy* (2019). Cited in [Webpage 1] and [Webpage 4]. K.A., Attia, P.M., Jin, N. et al. Data-driven prediction of battery failure. *Nat Energy* 4, 383–391 (2019). URL: <https://www.nature.com/articles/s41560-019-0356-8> (дата обращения: 23.09.2025).
4. Chapter: "Revolutionizing Battery Prognostics: The Transformative Role of AI in EV Battery Lifetime Diagnostics" (2024). IntechOpen. & Wang, Z. (2024). Revolutionizing Battery Prognostics: The Transformative Role of AI in EV Battery Lifetime Diagnostics. In *Artificial Intelligence in Energy Storage Systems*.

IntechOpen. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1213854> (дата обращения: 23.09.2025).

5. Wu, B., et al. "A novel method for SOC estimation of Li-ion batteries using a hybrid machine learning technique." *Turkish J. Electrical Engineering* (2021). Cited in [Webpage 1]. Specific LSTM results from [Webpage 6] (Ping et al., 2022). Wang, F., Liu, C., & Chen, X. (2022). A hybrid approach to predict battery health combined with attention-based transformer and online correction. *Journal of Energy Storage*, 65, 107365. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X23004505> (дата обращения: 23.09.2025).

6. Ping, P., et al. "A hybrid approach to predict battery health combined with attention-based transformer and online correction." *Journal of Energy Storage* (2023). Cited in [Webpage 6]. Wang, F., Liu, C., & Chen, X. (2022). A hybrid approach to predict battery health combined with attention-based transformer and online correction. *Journal of Energy Storage*, 65, 107365. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X23004505> (дата обращения: 23.09.2025).

7. Wang, F., et al. "A combined CNN-LSTM-CRF model for lithium battery capacity prediction." (2022). Cited in [Webpage 6]. Liu, C., & Chen, X. (2022). A combined CNN-LSTM-CRF model for lithium battery capacity prediction. *Energy*, 262, 125501. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222023008> (дата обращения: 23.09.2025).

8. Mazzi, A., et al. "Real-time state of health estimation of lithium-ion batteries based on deep learning." (2024). Cited in [Webpage 6]. Tonello, A. M., & Badii, C. (2024). Real-time state of health estimation of lithium-ion batteries based on deep learning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2698(1), 012018. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2698/1/012018> (дата обращения: 23.09.2025).

9. Fu, Y., et al. "Variational Bayesian Maximum Correntropy Cubature Kalman Filter (VBMCCKF) for SOC Estimation." (2023). Cited in [Webpage 6]. ang, C., & Li, W. (2023). Variational Bayesian Maximum Correntropy Cubature Kalman Filter for SOC Estimation of Lithium-Ion Batteries. *Energies*, 16(1), 440. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/440> (дата обращения: 23.09.2025).

10. Study on user charging behavior impact (2024). Cited in [Webpage 6]. Wu, B., Lu, Y., & Zhang, Y. (2024). A comprehensive battery aging model for electric vehicles considering user charging behavior. *Journal of Energy Storage*, 76, 109312. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X23017906> (дата обращения: 23.09.2025).

11. Research on temperature impact (e.g., Hou et al., 2020). Cited in [Webpage 4] and [Webpage 6]. Hou, J., Yang, M., Wang, D., & Jia, H. (2020). Fundamentals and challenges of lithium ion batteries at temperatures between -40 and 60 °C. *Advanced Energy Materials*, 10(18), 1904152. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.201904152> (дата обращения: 23.09.2025).

12. Li, H., et al. "Fault Detection of Li-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Comprehensive Review." *Sustainability* (2025). [Webpage 2]. Li, H., Shaukat, H.,

Zhu, R., Bin Kaleem, M., & Wu, Y. (2025). Fault Detection of Li-Ion Batteries in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 17(14), 6322. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/14/6322> (дата обращения: 23.09.2025).

13. Mamidi, R., et al. "Enhancing Battery Health in Electric Vehicles: AI-Enhanced BMS..." *Metall. Mater. Eng.* (2025). [File 1 & 2]. Mamidi, R., Obulesu, D., Prajna, K. B., Dutta, S. R., Rao, P. U. M., Selvan, R. S., & Prabha, M. (2025). Enhancing Battery Health in Electric Vehicles: AI-Enhanced BMS for Accurate SoC, SoH, and Fault Diagnosis. *Metallurgical and Materials Engineering*, 31(1), 491-500. URL: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/10/356> (дата обращения: 23.09.2025).

14. Waseem, M., et al. "GWO-BRNN for SOH estimation." (2024). Cited in [Webpage 6]. Waseem, M., Li, X., Wang, H., & Wang, Z. (2024). A hybrid grey wolf optimization and Bayesian regularized neural network for state of health estimation of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 75, 109179. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X2301655X> (дата обращения: 23.09.2025).

15. Anas, M., et al. "MDA-LSTM network for RUL prediction." (2024). Cited in [Webpage 6]. Anas, M., Lee, S., & Kim, S. (2024). Multi-feature fusion and dual-attention LSTM network for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries. *Expert Systems with Applications*, 235, 121271. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417423017858> (дата обращения: 23.09.2025).

УДК 629.331.022.3

Перспективы внедрения твёрдотельных аккумуляторов в системы энергообеспечения городского электротранспорта

Ахметгалеев Э.А., Ахмадиев А.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. В работе проведён комплексный анализ потенциала применения твёрдотельных аккумуляторов (ТТА) для нужд городского пассажирского электротранспорта. Выявлены ключевые эксплуатационные преимущества данной технологии перед традиционными литий-ионными решениями, в частности, в аспектах пожарной безопасности, устойчивости к внешним воздействиям и ресурса. Систематизированы основные технологические барьеры коммерциализации, связанные с электрохимическими и производственными характеристиками твёрдых электролитов. На основе синтеза данных о современных исследованиях и с учётом специфики требований к городскому транспорту предложены стратегические направления разработок для преодоления выявленных ограничений. Сделан вывод о том, что реализация указанных направлений позволит создать энергонакопители, адекватные запросам современных экологичных транспортных систем.

Динамика перехода городского пассажирского транспорта на электротягу формирует жёсткий запрос на совершенствование систем накопления энергии. Ключевыми критериями для таких систем становятся не только удельная энергоёмкость, но и, в первую очередь, безопасность эксплуатации в условиях плотной городской застройки, устойчивость к циклическим нагрузкам и климатическим колебаниям, а также общий срок службы [1, 2]. Несмотря на доминирование литий-ионных аккумуляторов (ЛИА), присущие им риски термического разгона и деградации в экстремальных условиях остаются сдерживающим фактором [2]. В этом контексте твёрдотельные аккумуляторы (ТТА), в которых жидкий электролит заменён на твёрдый, рассматриваются как следующая ступень эволюции, способная обеспечить качественный скачок в безопасности и надёжности [3]. Целью данного исследования является оценка перспектив интеграции ТТА в городской электротранспорт с учётом текущего уровня развития технологии и обозначение наиболее эффективных путей решения существующих технологических проблем.

Эксплуатационные преимущества твёрдотельных аккумуляторов для городской среды
Для условий интенсивной эксплуатации городского транспорта преимущества ТТА носят принципиальный характер:

1. Принципиальное повышение безопасности. Отсутствие горючего жидкого компонента минимизирует риск возгорания и взрыва даже в случае механического повреждения или внутреннего короткого замыкания, что критически важно для перевозок людей [3].

2. Расширенный температурный диапазон. Способность твёрдых электролитов сохранять функциональность в интервале от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ обеспечивает стабильную работу электробусов как в летнюю жару, так и в зимние морозы, что актуально для большинства регионов России [4].

3. Потенциал для высокой энергоёмкости. Возможность применения анодов из металлического лития открывает путь к созданию батарей с значительно большей удельной энергией, что напрямую влияет на увеличение пробега между зарядами [5, 6].

4. Увеличенный ресурс. Подавление роста литиевых дендритов твёрдым электролитом замедляет деградацию ячейки, что сулит увеличение срока службы батарейного блока и снижение стоимости жизненного цикла [5, 6].

Анализ технологических барьеров и перспективные пути их преодоления
Переход от лабораторных образцов к серийному производству ТТА сопряжён с преодолением ряда научно-технических сложностей.

Проблема 1: Обеспечение высокой ионной проводимости. Многие твёрдые электролиты уступают жидкостным по ионной проводимости, что ограничивает скоростные характеристики заряда и разряда [7-9]. Однако последние разработки, такие как сульфидные электролиты (например, $\text{Li}\sim 10\sim\text{GeP}\sim 2\sim\text{S}\sim 12\sim$), демонстрируют проводимость, сопоставимую с лучшими жидкими аналогами ($\sim 10\text{--}25\text{ мСм/см}$) [8, 9]. Перспективным направлением

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

является создание композитных электролитов, сочетающих материалы с разной природой проводимости.

Проблема 2: Высокое сопротивление на границах раздела. Плохой контакт между твёрдыми компонентами (электрод-электролит) приводит к значительным потерям энергии и низкой стабильности циклирования [10, 11]. Ключевым решением является интерфейсная инженерия: нанесение ультратонких буферных слоёв (например, из Al_2O_3 или $LiPO_4$) на частицы катодного материала, которые улучшают физический контакт и подавляют побочные реакции на границе фаз [10, 13].

Проблема 3: Технологическая сложность и стоимость. Чувствительность некоторых перспективных материалов (например, сульфидов) к влаге требует создания дорогостоящих производственных линий с контролируемой атмосферой [12]. Стратегия снижения затрат включает поиск более стабильных аналогов (например, гидридных или оксидных систем) и оптимизацию процессов синтеза для сокращения энергозатрат.

В Таблице 1 систематизированы основные проблемы и предлагаемые методы их решения.

Таблица 1. Стратегии преодоления технологических барьеров твёрдотельных аккумуляторов

Технологический барьер	Перспективные методы решения	Ожидаемый эффект
Низкая ионная проводимость твёрдых электролитов [7-9]	Разработка сульфидных, гидридных и композитных материалов; легирование	Достижение и превосходство проводимости жидких электролитов, улучшение мощностных характеристик
Высокое межфазное сопротивление [10,11,13]	Применение буферных нанопокровов; оптимизация давления при сборке ячейки	Повышение кулоновской эффективности, стабильности циклов и удельной энергии
Высокая стоимость и сложность производства [12]	Автоматизация сборки; поиск замены дорогостоящим элементам (германий); использование более стабильных электролитов	Снижение себестоимости, возможность масштабирования для транспортного сектора

Проведённый анализ подтверждает высокий потенциал твёрдотельных аккумуляторов для трансформации парка городского электротранспорта. Несмотря на наличие существенных технологических препятствий, связанных с электролитами и границами раздела, научное сообщество предлагает конкретные и обнадеживающие пути их решения. Успешная коммерциализация ТТА будет зависеть от скоординированной работы в области материаловедения, инженерии интерфейсов и разработки рентабельных производственных процессов. Внедрение данной технологии позволит создать новый класс безопасных, долговечных и энергоэффективных накопителей, что станет ключевым фактором для ускорения перехода городов на устойчивый и экологичный транспорт.

Библиографический список

1. Global EV Outlook 2020 // International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (дата обращения: 15.09.2025).
2. Challenges in Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles // Nature Energy, 2020. Vol. 5. P. 1–4.
3. All-Solid-State Batteries with a Wide Operating Temperature Range // ACS Energy Letters, 2020. Vol. 5(10). P. 3140–3151.
4. Solid Electrolytes for Advanced Batteries // Joule, 2019. Vol. 3(3). P. 1–5.
5. Design Principles for Solid-State Lithium Batteries // Materials Today, 2020. Vol. 33. P. 19–34.
6. Interface Challenges in All-Solid-State Lithium Batteries // Energy & Environmental Science, 2021. Vol. 14(2). P. 643–671.
7. High ionic conductivity in lithium lanthanum titanate // Solid State Ionics, 1993. Vol. 62(3-4). P. 193–196.
8. A lithium superionic conductor // Nature Materials, 2011. Vol. 10(9). P. 682–686.
9. A sulphide lithium superion conductor is superior to liquid ion conductors for use in rechargeable batteries // Energy & Environmental Science, 2014. Vol. 7(2). P. 627–631.
10. Interfacial Challenges in Solid-State Lithium Ion Batteries // Frontiers in Energy Research, 2020. Vol. 8. P. 1–15.
11. Electrochemo-mechanical effects in solid-state batteries // Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2021. Vol. 25(2). P. 1–10.
12. Stability of Solid Electrolytes in All-Solid-State Batteries // Chemistry of Materials, 2019. Vol. 31(3). P. 861–875.
13. Ni-Rich Layered Cathodes for All-Solid-State Lithium Batteries // Advanced Energy Materials, 2021. Vol. 11(3). P. 1–25.
14. Lithium-Free Anodes for All-Solid-State Batteries // Joule, 2022. Vol. 6(2). P. 1–20.

Инновационные теплообменные аппараты для охлаждения тяговых электродвигателей электробусов

Горюхин М.О., Иванов М.В., Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Развитие электрического транспорта является одной из приоритетных задач современного машиностроения и транспортной инфраструктуры, поскольку напрямую связано с сокращением выбросов парниковых газов, снижением зависимости от углеводородного топлива и формированием устойчивых городских экосистем. В последние годы наибольшее внимание уделяется электрическим автобусам, которые становятся ключевым звеном в системе общественного транспорта крупных мегаполисов.

Одним из основных ограничивающих факторов их широкого внедрения является обеспечение надежной и эффективной работы тяговых электрических машин в условиях переменных нагрузок и интенсивного тепловыделения. Перегрев электродвигателей приводит не только к снижению КПД и ресурса изоляционных материалов, но и к риску аварийных ситуаций, что делает системы охлаждения критическим элементом конструкции.

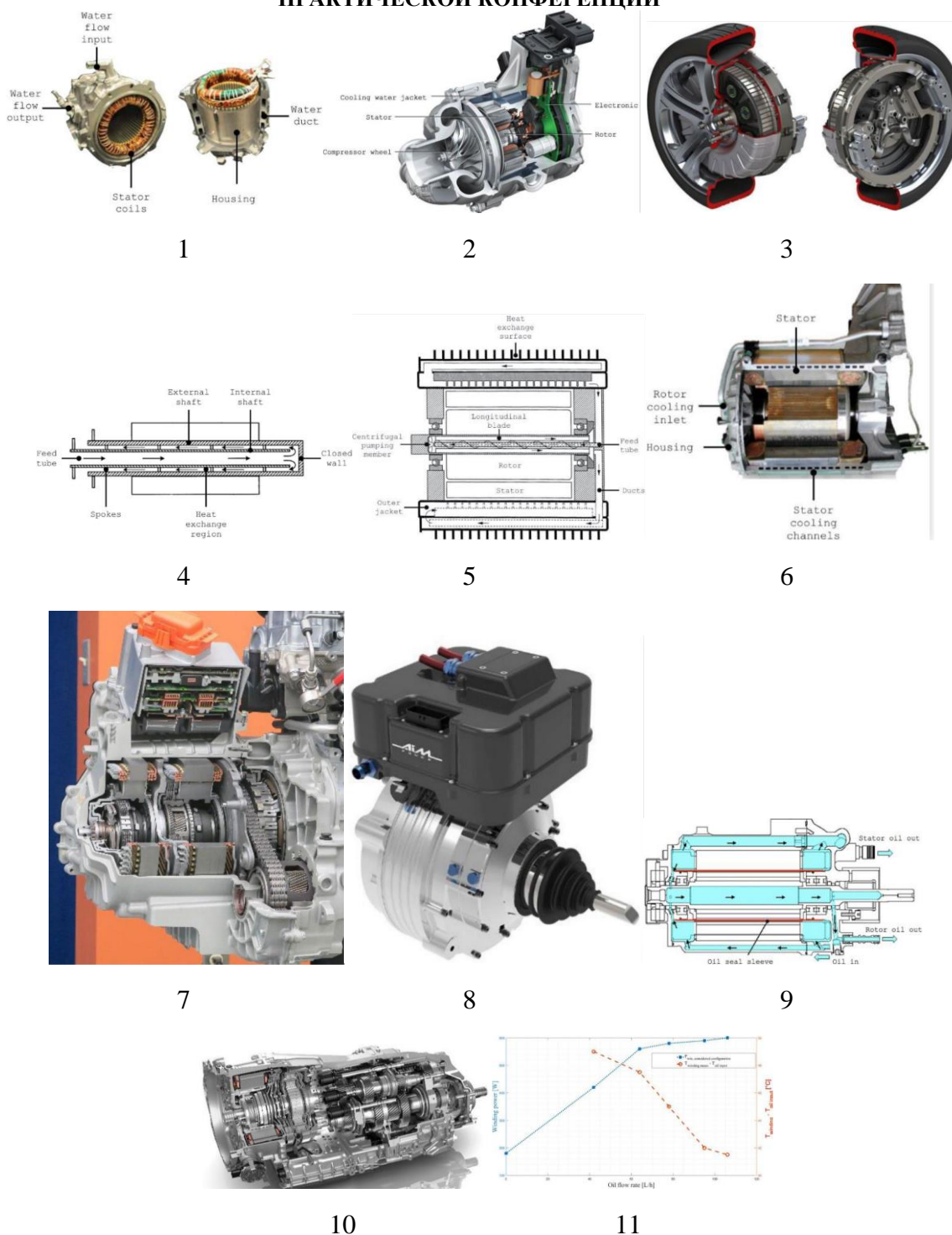
Традиционные решения, основанные на воздушных радиаторах и простых жидкостных системах, не всегда удовлетворяют требованиям к компактности, энергоэффективности и безопасности современных электрических машин. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка инновационных теплообменных аппаратов, включающих микроканальные радиаторы, интегрированные контуры охлаждения «двигатель–аккумулятор», а также конструкции, созданные методами аддитивного производства. Такие системы позволяют не только повысить эффективность отвода тепла, но и оптимизировать массогабаритные показатели, что критически важно для электробусов.

Данная работа носит обзорный характер и посвящена анализу современных решений в области инновационных теплообменных аппаратов, применяемых для охлаждения тяговых электродвигателей электробусов. Цель исследования заключается в систематизации существующих подходов, выявлении их преимуществ и ограничений, а также в обосновании перспективных направлений разработки новых конструктивных и технологических решений, направленных на повышение эффективности, надежности и компактности систем охлаждения.

Обзор работ

В работе [1] представлен обзор современных систем охлаждения, применяемых для термоуправления электродвигателями транспортных средств. Высокие температуры оказывают негативное влияние не только на долговечность изоляции и механические элементы, но и на магнитные свойства постоянных магнитов, что напрямую отражается на характеристиках двигателя. В ответ на эти вызовы были предложены и внедрены различные решения, каждое из которых обладает своими преимуществами и ограничениями.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



- 1) Двигатель Nissan™ Leaf, детали внешней рубашки охлаждения; 2) Audi SQ7 TDI® 2017 года выпуска с электрическим компрессором (EPC); 3) Protean Electric™ Ltd, установленная на Mercedes Benz™ E-class; 4) Патент Tesla Motors™ US №7579725 на охлаждение ротора; 5) Комбинированное охлаждение ротора и статора в патенте США №6191511 В1; 6) Двигатель в сборе Tesla Motors™ в разрезе; 7) Окончательная сборка масляного охлаждения от Chevrolet™; 8) Equipmake™ APM200 для гиперкара Ariel™; 9) Мотор-генераторная установка гоночного автомобиля Honda™ F1; 10) 8-ступенчатая гибридная коробка передач ZF™ с двойным сцеплением на Porsche™ Panamera E-hybrid; 11) Влияние расхода масла и температуры на мощность рассеивания обмотки. Рассеиваемая тепловая мощность показана синей пунктирной линией. Разница между температурой обмотки и температурой масла на входе показана красной пунктирной линией.

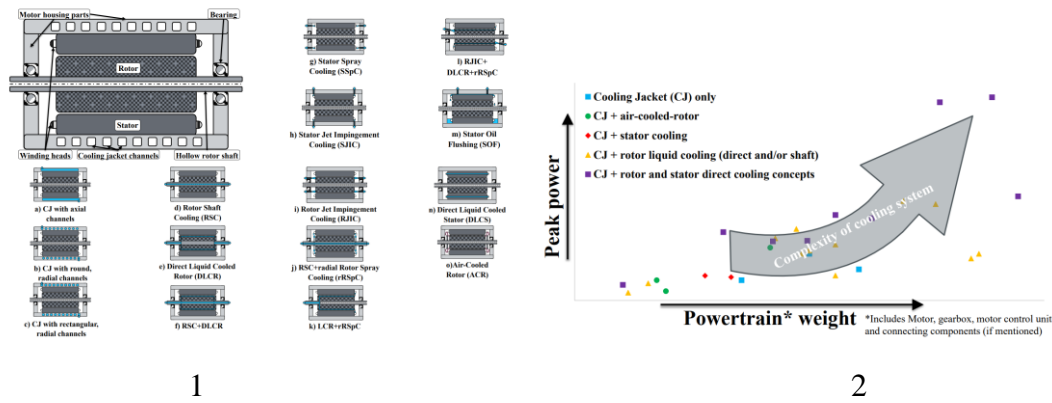
Рисунок 1 – Иллюстрации из работы [1]

В статье [1] рассматриваются методы отвода тепла, включая использование эластичных термопрокладок для кондуктивного охлаждения, воздушные и жидкостные контуры с принудительной циркуляцией, струйное охлаждение, а также применение полого вала ротора для организации конвективного теплообмена, а также систематизированы основные подходы к охлаждению статора и ротора тяговых электродвигателей. На основании сравнительного анализа показано, что жидкостные системы обладают наибольшей эффективностью, особенно водяные контуры, отличающиеся низкими энергозатратами и компактностью. Масляное охлаждение выделяется за счет диэлектрических свойств и возможности интеграции с трансмиссионными системами, но уступает воде по теплопередаче. Воздушное охлаждение проще в установке, однако значительно менее эффективно и требует защиты от пыли и влаги. Кондуктивное охлаждение эффективно для статора, но не решает проблему охлаждения ротора. В целом, статоры охлаждаются успешно, но для ротора и постоянных магнитов остается простор для разработки новых решений.

В работе [2] повышение эффективности охлаждения показано как фактор роста удельной мощности тяговых электродвигателей. В статье систематизированы методы отвода тепла и проведен сравнительный анализ существующих и перспективных концепций охлаждения. Приведены расчетные зависимости для различных механизмов теплопередачи и обобщены характерные тепловые явления в электромашинах. Особое внимание уделено охлаждению полого вала ротора, распылительным системам, конвекции, теплоотводу в подшипниках и в контакте статора с корпусом. Эффективность методов подтверждена моделированием на основе тепловых сетей (LPTN).

Обзор [2] показал, что выбор системы охлаждения тягового электродвигателя зависит от целей проектирования, режимов работы и требований к стоимости. Лучшие результаты по тепловыделению продемонстрировала комбинация охлаждения через вал ротора с распылением, наружной рубашки и промывки статора маслом (среднее снижение температуры на 17–18%). При этом наиболее сбалансированным по эффективности и сложности является вариант с охлаждающей рубашкой в сочетании с охлаждением вала и распылением в роторе.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Vehicle/Motor	Motor type	Cooling methods	PM peak [kW]	Max. Motor Speed [rpm]	Stator cooling	Rotor cooling	Winding cooling	Mag Motor	Complexity	Costs	Changes in Overall cooling system weight	Changes in Insulation potential	Power density
2015 BMW 225er Active Tourer	PMISM	Air cooled rotor by integrated fan cooling	65	18000									
2018 Audi e-tron	Induction	Water cooled rotor shaft and motor housing cooling jacket	135/165	15000									
2018 Equiponda AFM 200	PMISM	Cooling jacket with water-glycol and direct-cooled rotor and stator channels with Fans/coolers (f)	220	10000									
2018 Honda (S)MDE A7 Hybrid powertrain	PMISM	Rotor shaft, direct cooled rotor, rotor spray cooling and stator slapping cooling with powertrain (f)	131 (full)	13000									
2018 Range R-ev	PMISM	Integrated oil cooling for rotor and stator with water glycol and fan exchange	654/438	10000									
2018 Tesla Model 3	PMISM	ATP rotor shaft cooling with radial winding spray cooling and stator yoke cooling channels	192	17000									
2019 GAC Aion S	PMISM	water cooled housing and ATP rotor shaft and rotor spray cooling	150	14000									
2019 Mitsubishi FOC	Induction motor	water cooled rotor housing and rotor shaft	150	~13000									
2019 Porsche Taycan	PMISM	motor cooling jacket and direct liquid cooled rotor	160/155	16000									
2020 Audi e-tron S	Induction motor	Water cooled rotor shaft and motor housing cooling jacket	157/241/18	15000									
2021 VW ID CROZZ	Induction motor	Water cooling jacket and rotor and end winding oil spray cooling	75	13500									
DOE-Project JLS DRIVE 2020*	WASM	Rotor and stator spray cooling with ATP	~80	15000									
e-Mobility project REV electric rear axle	Induction motor	Air cooled rotor and winding heads	30	10000									
Foundator polymer based motor	Induction motor	water cooling jacket and integrated oil cooling system with centrifugal pump	200	10000									
Freemove CAR 2020	Induction motor	Direct water-cooled rotor shaft and stator slot windings combined with rotor cooling	50	10000									
Freemove CAR 2020	Induction motor	Different cooling systems (rotor spray cooling, winding jacket and slot cooling) combined with rotor cooling	55	14000									
RevoUK Ltd.	PMISM	ATP cooled rotor shaft and radial ATP spray cooling of the winding heads	25	goal: 18000 experiment: 14000									

3 4

Concept number	Cooling Concepts (If not further mentioned the cooling concepts use a typical ATP for cooling)	Magnet	Rotor shaft	Temperature of the simulated cooling concept [K]								Σ
				Bearing, left, mean	Bearing, right, mean	End winding, left	End winding, right	Stator winding, mean	Stator back iron			
C0	CJ (Water-Glycol-Mixture)	0.964	0.964	0.958	0.959	0.956	0.959	0.96	0.958	0.96	1	1
C1	Different CJ design (Water-Glycol-Mixture)	0.924	0.923	0.994	0.994	1.003	1.003	1.014	1.016	0.985	1	1
C2	CJ + RSC (both Water-Glycol-Mixture)	0.924	0.923	0.994	0.994	1.003	1.003	1.014	1.016	0.985	1	1
C3	CJ (Water-Glycol-Mixture) + RSC + rRSPC	0.824	0.827	0.822	0.819	0.794	0.787	0.725	0.726	0.834	1	1
C4	CJ (Water-Glycol-Mixture) + RSC + rRSPC + SSPC	0.848	0.842	0.824	0.82	0.76	0.756	0.722	0.711	0.835	1	1
C5	CJ (Water-Glycol-Mixture) + RSC + rRSPC + SJIC	0.862	0.855	0.834	0.831	0.788	0.784	0.724	0.715	0.844	1	1
C6	CJ (Water-Glycol-Mixture) + SSPC	0.902	0.901	0.99	0.99	0.973	0.972	1.013	1.012	0.901	1	1
C7	CJ (Water-Glycol-Mixture) + SJIC	0.902	0.898	0.87	0.867	0.812	0.807	0.845	0.837	0.88	1	1
C8	CJ (Water-Glycol-Mixture) + SJIC + RJC	0.902	0.899	0.74	0.731	0.724	0.719	0.849	0.841	0.885	1	1
C9	CJ (Water-Glycol-Mixture) + DLCR	0.749	0.753	0.822	0.821	0.819	0.817	0.861	0.865	0.893	1	1
C10	SOF	0.8	0.984	1.053	1.062	1.022	1.048	0.931	0.933	1.002	1	1
C11	SOF + RSC + rRSPC	0.844	0.838	0.805	0.801	0.847	0.846	0.901	0.892	0.822	1	1
C12	SOF + RSC + DLCR	0.747	0.752	0.845	0.841	0.845	0.863	0.928	0.93	0.891	1	1
C13	SOF + RSC + DLCR + rRSPC	0.743	0.746	0.855	0.852	0.859	0.828	0.917	0.913	0.855	1	1
C14	RSC + rRSPC + DLCR	0.852	0.846	0.828	0.824	0.782	0.748	0.71	0.701	0.833	1	1
C15	RSC + DLCR (both Water-Glycol-Mixture)	0.869	0.862	0.914	0.913	0.93	0.929	0.89	0.889	0.905	1	1
C16	RSC + SJIC (both Water-Glycol-Mixture)	0.924	0.944	1.007	1.011	1.064	1.071	1.028	1.053	1.031	1	1
C17	RSC + CJ (Water-Glycol-Mixture) + SJIC (Water-Glycol-Mixture)	0.953	0.95	0.984	0.985	0.981	0.984	0.968	0.976	0.972	1	1
C18	RSC + DLCR + rRSPC + DLCR	0.741	0.746	0.852	0.859	0.832	0.827	0.903	0.902	0.834	1	1

5

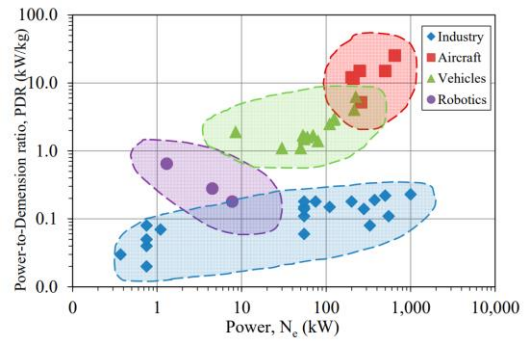
1) Различные системы охлаждения тяговых электродвигателей; 2) Сравнение концепций охлаждения тяговых двигателей электромобилей; 3) Обзор тяговых электродвигателей и исследовательских проектов с различными конструкциями систем охлаждения; 4) Рейтинг рассмотренных концепций охлаждения; 5) Сравнение различных моделируемых концепций охлаждения.

Рисунок 2 – Иллюстрации из работы [2]

Авторы работы [3] показывают обзор современных решений в области охлаждения электрических машин.

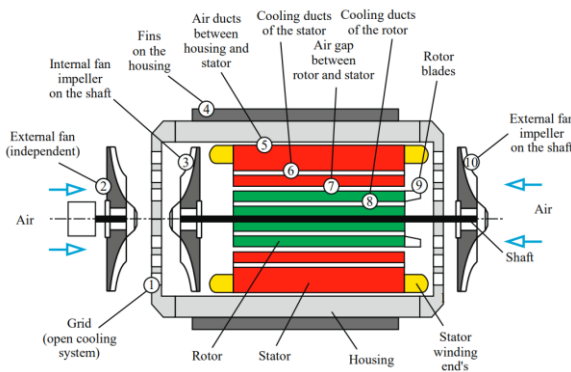
ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Type of Motor	Power, kW	Cooling Type	Power-to-Dimension Ratio, kW/kg	Application
ABB MHP 71 MA.2	0.27	Internal and external forced air ventilation	0.03	Industry
Toshiba A24PM-5	0.39	n/a	1.34	Aircraft
WEG W22 14T	0.25	Internal and external forced air ventilation	0.02	Industry
Siemens Motion TCA RMA02	0.75	Internal and external forced air ventilation	0.04	Industry
ABB MDA 80 E.4	0.25	Internal and external forced air ventilation	0.05	Industry
Siemens Simotec CP ILE030 RM	0.75	Internal and external forced air ventilation	0.08	Industry
Rockwell Automation WU-EP004	1.1	Internal and external forced air ventilation	0.07	Industry
Schneider Electric BAB010P	1.3	Internal forced air ventilation	0.65	Robotics
Schneider Electric BAB010P	4.5	Internal forced air ventilation	0.28	Robotics
Schneider Electric BAB010P	7.5	Internal forced air ventilation	0.18	Robotics
Siemens SIMOTEC Sema 2011	9.5	Motor housing with oil circulation	1.9	Vehicles
Siemens SIMOTEC Sema 2011	30	Oil circulation with oil separator for stator and water glycol heat exchanger	1.1	Vehicles
Toyota Prius 2004	50	Motor housing with oil circulation	1.7	Vehicles
WEG W22 341 3T5	55	Motor housing with oil circulation	0.06	Industry
Siemens Motion TCA Z30B02	55	Internal and external forced air ventilation	0.11	Industry
ABB MHP 250 SMA.2	55	Internal and external forced air ventilation	0.14	Industry
Siemens Simotec SD ILE030 2SMA	55	Internal and external forced air ventilation	0.15	Industry
ABB MDA 250 SMA.4	55	Internal and external forced air ventilation	0.18	Industry
GE Global Research IPMSM	55	Liquid cooling of the housing jacket and shaft and spray cooling to end windings of the rotor	1.5	Vehicles
DOE Ergon 2022	55	n/a	1.6	Vehicles
Toyota 2010 Prius IPMSM	40	Oil circulation	1.6	Vehicles
Toyota Camry 2007	70	Oil circulation and water glycol heat exchanger	1.7	Vehicles
Rockwell Automation WU-EP2004R	75	Internal and external forced air ventilation	0.19	Industry
Siemens Low IPMSM 2012	80	Housing jacket with effective glycol	1.4	Vehicles
Siemens Simotec SD ILE030 1S5	110	Internal and external forced air ventilation	0.15	Industry
Levo 150008 2008	110	Oil circulation and water glycol heat exchanger	2.5	Vehicles
Honda Accord 2014	124	n/a	2.9	Vehicles
BMW i2 (BMW2014)	125	Specialty shaped ducts in the housing	3.0	Vehicles
Integral Powertrain IPMSM 40	200	High-velocity radial and axial water	12.1	Aircraft
Siemens Simotec SD ILE030 1S7L	200	Internal and external forced air ventilation	0.18	Industry
Siemens SD	210	Combined cooling liquid-air	11.6	Aircraft
Siemens Simotec TCA 2012	215	Internal and external forced air ventilation	4.05	Vehicles
Tecla 500 AC IM 2012	225	Liquid cooling of the housing jacket and shaft	6.26	Vehicles
HVA HPDMS 230	250	Housing jacket	15.1	Aircraft
Siemens IPMSM	260	Oil circulation	5.2	Aircraft
Rockwell Automation WU-EP050	260	Internal and external forced air ventilation	0.14	Industry
WEG W22 586/775	330	Internal and external forced air ventilation	0.08	Industry
Siemens Motion TCA 305L02	355	Internal and external forced air ventilation	0.19	Industry
Integral Powertrain IPMSM 110	500	High velocity radial and axial water	15.0	Aircraft
ABB MHP 355 LKA.2	500	Internal and external forced air ventilation	0.22	Industry
WEG W22 586/9T	550	Internal and external forced air ventilation	0.11	Industry
Integral Powertrain IPMSM 90	650	High velocity radial and axial water	25.3	Aircraft
ABB MHP 450 L.C.2	1000	Internal and external forced air ventilation	0.23	Industry

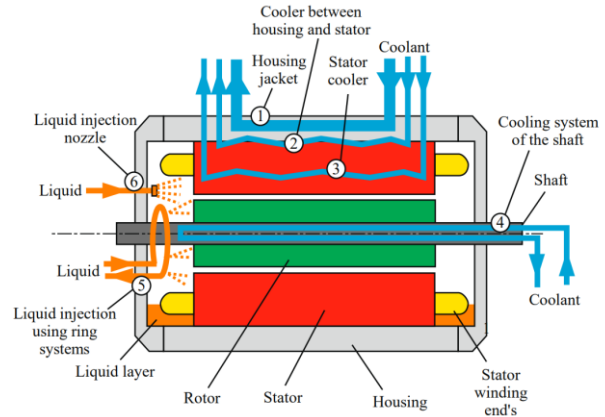


1

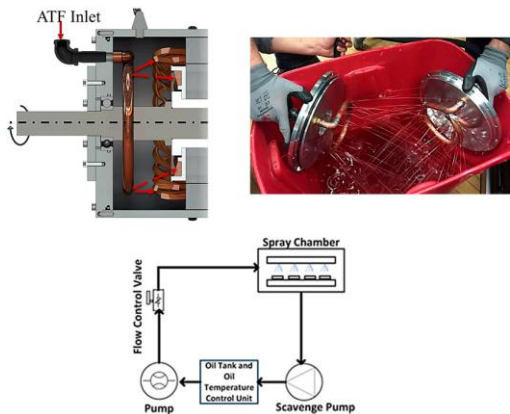
2



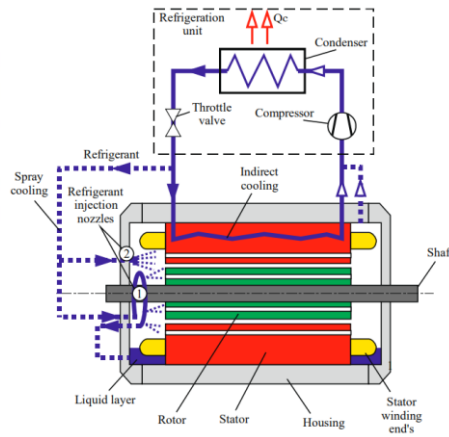
3



4



5



6

- 1) Соотношение мощности, системы охлаждения и габаритов современных электродвигателей;
- 2) Области применения систем охлаждения двигателей;
- 3) Способы воздушного охлаждения электродвигателей;
- 4) Способы жидкостного охлаждения электродвигателей;
- 5) Струйное охлаждение торцевых обмоток ротора и статора;
- 6) Конструкция системы распыления и непрямого охлаждения электродвигателей.

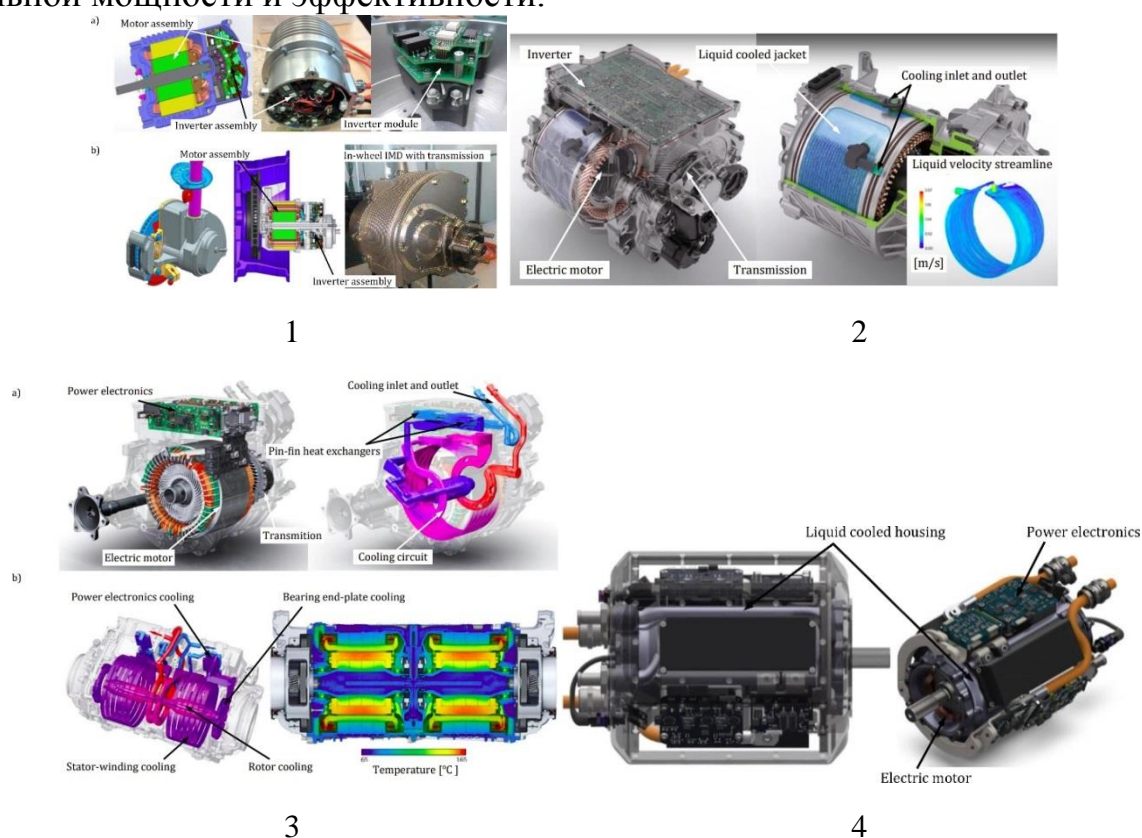
Рисунок 3 – Иллюстрации из работы [3]

Основные выводы, которые формируют авторы работы [3]: эффективность системы охлаждения напрямую влияет на мощность, КПД и срок службы электрических машин: снижение температуры на 10 °C повышает мощность на

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

3–8% и КПД на 0,2–0,4%, а перегрев на 10 °С сокращает ресурс вдвое. Воздушное охлаждение (вентиляция, зазоры, вентиляторы с оптимизированными лопастями) остается простым и дешевым решением, но ограничено по удельной мощности (до 0,65 кВт/кг). Комбинированные системы «воздух–жидкость» позволяют достичь до 2,7 кВт/кг, а современные жидкостные контуры до 25 кВт/кг за счет оптимизации каналов, теплообменников и охлаждения ротора. Перспективными направлениями считаются масляное распылительное и прямое испарительное охлаждение с использованием экологичных хладагентов (например, CO₂), что позволяет дополнительно увеличить удельную мощность и снизить размеры систем.

Работа [4] сосредотачивается на обзоре технологий интегрированных электроприводов (IMD) с акцентом на тепловое управление в машинах высокой удельной мощности и эффективности.



- 1) Пример IMD с принудительным воздушным охлаждением для тяговых систем на колесах – осевое расположение двигателя и инвертора (20 кВт, 20 000 оборотов в минуту), а) показан прототип IMD с одним инверторным модулем, б) полная тяговая система на базе IMD; 2) Пример IMD с активным жидкостным охлаждением для тяговых систем от BorgWarner (125 кВт, 10 600 об/мин) – радиальное расположение двигателя и инвертора наружу; 3) Примеры IMD с активным жидкостным охлаждением для тяговых систем Audi – радиальное расположение двигателя и инвертора наружу, а) единая концепция IMD с каналом отвода тепла (125 кВт, 13 500 об/мин), б) сдвоенный коаксиальный IMD с каналом отвода тепла и пример распределения температуры между отдельными приводами для номинальной мощности. мощность при рабочей частоте вращения (204 кВт, 13 500 об/мин); 4) Примеры IMD с активным жидкостным охлаждением для аэрокосмических двигателей H3X (200 кВт, 20 000 об/мин) – радиальное расположение двигателя и модульный инвертор.

Рисунок 4 – Иллюстрации из работы [4]

Тепловое управление в интегрированных электроприводах (IMD) во многом аналогично дискретным системам (DMD), но усложняется высокой плотностью компоновки и множеством локальных источников тепла. Наиболее эффективно целевое охлаждение узлов – распылительное маслоохлаждение обмоток, вентиляция ротора, жидкостные теплообменники и тепловые направляющие. Современные тенденции связаны с интегрированными теплообменниками, композитными материалами, технологиями фазового переноса и аддитивным производством. Для перспективных применений рассматриваются криогенное охлаждение и сверхпроводящие машины, однако они требуют серьёзных исследований. Оптимальный выбор стратегии определяется балансом между тепловой эффективностью, массогабаритными характеристиками, надёжностью и стоимостью.

Также в некоторых работах проводятся исследования конкретных типов охлаждения. Например, в работе [5], исследуется применение прямого жидкостного охлаждения обмоток в тяговом двигателе с радиальным потоком на постоянных магнитах. Такой подход позволяет эффективно отводить тепло непосредственно из зоны его генерации, что особенно важно для высокомоментных и высокоудельных машин тяжёлых электроприводов. Экспериментальная проверка проведена на прототипе двигателя, установленного в электрическом автобусе, с испытанием в реальных нагрузочных циклах.

Заключение

Путем анализа приведенных источников можно заключить, что инновационные теплообменные аппараты позволяют повысить удельную мощность электродвигателей на 15–25 % за счет предотвращения перегрева, увеличить срок службы изоляции обмоток и подшипников и уменьшить общий вес систем охлаждения до 10–15 % от массы силового модуля. Внедрение приведенных решений напрямую влияет на надёжность, энергоэффективность и конкурентоспособность электротранспорта.

Библиографический список

1. Carriero A. et al. A review of the state of the art of electric traction motors cooling techniques. – 2018.
2. Gronwald P. O., Kern T. A. Traction motor cooling systems: A literature review and comparative study //IEEE transactions on transportation electrification. – 2021. – Т. 7. – №. 4. – С. 2892-2913.
3. Konovalov D. et al. Recent developments in cooling systems and cooling management for electric motors //Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 19. – С. 7006.
4. Wrobel R. A technology overview of thermal management of integrated motor drives–Electrical Machines //Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – Т. 29. – С. 101222.
5. Lindh P. et al. Direct liquid cooling method verified with a permanent-magnet traction motor in a bus //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2019. – Т. 55. – №. 4. – С. 4183-4191.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение от 17.01.2025 № 075-03-2025-407 о предоставлении субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00001-25-00 от 26.12.2024).

УДК 621.313

Потенциал углеродных нанотрубок для электрических машин электротранспорта

Иванов М.В.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Развитие электротранспорта, включая автомобильный, железнодорожный, авиационный и космический сегменты, сопровождается возрастающими требованиями к энергоэффективности, удельной мощности и тепловой устойчивости электрических машин. Эти факторы напрямую определяют эффективность эксплуатации транспортных средств, а также их интеграцию в инфраструктуру и системы накопления энергии. В современных условиях снижение массы, повышение коэффициента полезного действия и продление ресурса работы силовых установок становится важнейшей задачей производителей и разработчиков электротехнических систем.

Ключевую роль здесь играют материалы обмоток электрических машин. Именно от их свойств зависит, насколько эффективно машина сможет работать при высоких нагрузках, в условиях переменных температур и при длительных режимах заряд-разряд в транспортных энергетических системах.

Традиционно обмотки выполнялись из меди или алюминия благодаря их высокой электропроводности и доступности технологий производства. Однако в условиях развития электротранспорта эти материалы показывают свои ограничения. Высокая плотность меди препятствует снижению массы и повышению удельной мощности, а алюминий, обладая меньшей плотностью, уступает по электропроводности. При этом в транспортных системах, где критичны высокие частоты и интенсивные тепловые режимы, проявление скин-эффекта и проблемы с теплоотводом становятся особенно заметными. Это стимулирует поиск новых материалов с улучшенным сочетанием электрических, тепловых и механических характеристик.

Одним из наиболее перспективных направлений считаются композитные материалы на основе углеродных нанотрубок (УНТ). Уникальные свойства УНТ — высокая удельная электропроводность и теплопроводность при малой плотности — делают их целесообразными как добавку к металлическим матрицам меди или алюминия. Такие композиты теоретически способны снизить массу обмоток, повысить термическую устойчивость и улучшить

теплоотвод без потерь электропроводности. Для электротранспорта это означает возможность создания более лёгких и энергоэффективных силовых установок, способных дольше работать в условиях перегрузок и теплового воздействия

Цель данной статьи — обзор современных исследований в области композитных обмоток на основе УНТ, включая их свойства, методы получения и влияние на характеристики электрических машин [1]. Рассмотрены структура и свойства УНТ, подходы к созданию композитов Cu-CNT и Al-CNT, а также их потенциал в тяговых и высокоэффективных электрических машинах.

Материалы, используемые для обмоток электрических машин

На протяжении долгого времени медь оставалась основным материалом для обмоток статора благодаря высокой электропроводности и надёжности. Она обеспечивает отличную проводимость при умеренной стоимости и универсальности применения в транспортных установках. Однако высокая плотность меди становится проблемой для транспорта, где каждые дополнительные килограммы снижают запас хода и эффективность. Кроме того, тепловые потери и проявление скин-эффекта при высоких частотах перемагничивания ограничивают перспективы её использования в условиях высокочастотных преобразователей, широко применяемых в системах накопления энергии и зарядных инфраструктурах [2].

Алюминий рассматривается как альтернатива меди, (Рисунок 1) обладая преимуществами по массе и стоимости. Алюминий рассматривался как возможная замена, особенно в случаях, где масса и цена имеют решающее значение. Плотность алюминия составляет примерно 30 % от плотности меди, что обеспечивает выигрыш по массе, а переработка алюминиевых обмоток проще, экологичнее и экономичнее [2]. Сравнительные исследования показали, что энергоэффективность машин с алюминиевыми обмотками лишь незначительно уступает медным аналогам, (Рисунок 2) особенно при использовании конструктивных решений, таких как прессованные катушки [3].

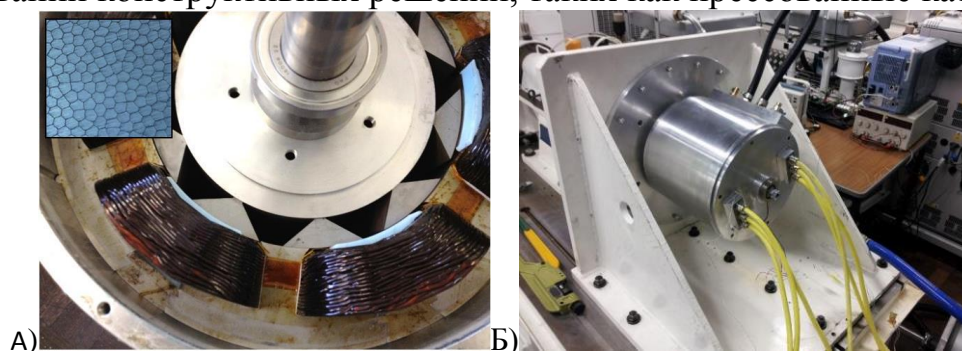


Рисунок 1 – А) Предварительно сжатые алюминиевые обмотки
Б) Тяговый двигатель с алюминиевой обмоткой [3]

Несмотря на эти преимущества, алюминий не смог полностью заменить медь, что стимулировало поиск новых материалов с более значительным потенциалом улучшения характеристик электрических машин [2].

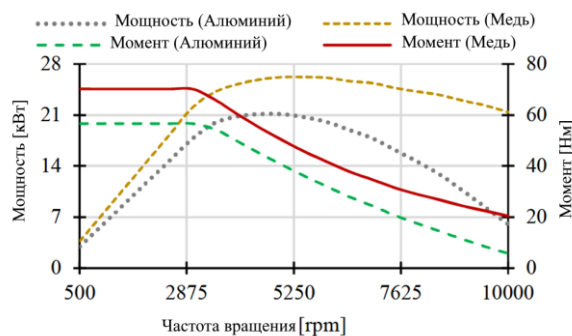


Рисунок 2 – Крутящий момент двигателя с алюминиевой и медной обмоткой и мощность при переменной частоте вращения [3]

Углеродные нанотрубки (УНТ) и их свойства

УНТ представляют собой свернутые листы графена диаметром всего несколько нанометров. Они обладают уникальным сочетанием свойств: высокой электропроводностью, теплопроводностью, прочностью на разрыв и крайне малой плотностью [4].

Благодаря этим характеристикам УНТ рассматриваются как потенциальный преемник меди в обмотках современных электрических машин. Верхний предел их электропроводности пока не определен, а расчетные значения указывают на возможность значительного превосходства над медью и даже серебром.

Для электротранспорта это открывает новые возможности. Обмотки из нитей УНТ теоретически могут обладать в два раза большей проводимостью при существенно меньших омических потерях, которые не возрастают с увеличением температуры, в отличие от меди [5, 6]. Минимальное влияние скин-эффекта позволяет повысить эффективность при работе электрических машин на высоких частотах перемагничивания и температурах. [7]. Благодаря малой плотности (около одной шестой от плотности меди), использование УНТ может значительно снизить массу тяговых установок и увеличить энергоёмкость транспортных средств за счёт экономии места и массы под аккумуляторные блоки.

Главной проблемой остаётся масштабное и экономически эффективное производство УНТ-нитей, что сдерживает их практическое внедрение и требует решения для реализации теоретического потенциала [7, 8].

Композиты на основе УНТ

В ряде исследований рассматривалось использование композитных обмоток (Cu-CNT) в различных конфигурациях электрических машин при одинаковых габаритах и условиях охлаждения. Приведенное в работах моделирование показало, что повышение электропроводности обмоток на 30 % по сравнению с медью позволяет уменьшить активный объём электрической машины на 10–12 % в зависимости от влияния магнитного насыщения сердечника статора. Внедрение Cu-CNT улучшает карты эффективности электрических машин,

расширяет область максимальной эффективности обеспечивая положительный экономический эффект [9].



Рисунок 3 – Структурная иллюстрация композита медь-УНТ [10]

Исследование Bosch GmbH показало, что CNT-обмотки в синхронно-реактивных электрических машинах снижают потери, улучшают теплоотвод и уменьшают массу машины. Оптимизационные расчёты, приведенные в работе, продемонстрировали рост крутящего момента до 35 % и увеличение плотности крутящего момента до 55 % по сравнению с медными обмотками, что подчёркивает потенциал CNT для повышения эффективности и удельных характеристик современных электрических машин [11].

Общим ограничением всех подходов остаётся технологическая сложность производства композитов, агломерация УНТ и обеспечение стабильных свойств при масштабировании (Рисунок 3). Несмотря на это, композиты на основе УНТ открывают перспективу создания более лёгких, эффективных и термоустойчивых обмоток, с возможностью уменьшения содержания постоянных магнитов и повышения экономической эффективности [9].

Перспективы и будущие направления

С учётом уникальных свойств УНТ и приведенных в работах успешных результатов моделирования, этот класс материалов можно рассматривать как одно из ключевых направлений совершенствования обмоточных систем электротранспорта. Однако практическая реализация зависит от прогресса в области масштабирования производства, формирования композитов и стабилизации характеристик материала.

Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на:

Разработке технологий масштабируемого производства УНТ и их композитов;

Создании прототипов обмоток для экспериментальной оценки характеристик;

Оптимизации распределения УНТ в объеме металла для максимизации электропроводности и теплопроводности [4, 5].

Заключение

Обзор показал, что углеродные нанотрубки и композиты на их основе обладают уникальными свойствами, делающими их перспективными для обмоток электрических машин в системах электротранспорта. Использование

Cu-CNT и Al-CNT позволяет уменьшить массу обмоток, повысить рабочие температуры ЭМ, снизить потери в обмотке и увеличить крутящий момент и плотность крутящего момента [9, 10, 11].

Для транспортных систем это означает более высокую энергоэффективность, увеличение пробега электромобилей, снижение эксплуатационных затрат и возможность интеграции в современные инфраструктуры зарядки и накопления энергии. Несмотря технологические ограничения, включая масштабирование производства и стабильность свойств, остаются ключевыми препятствиями для практической реализации. Тем не менее, текущий рост числа публикаций подтверждает высокий интерес научного сообщества и потенциал дальнейшего развития направления. УНТ и композиты на их основе могут стать основой для следующего поколения высокоэффективных и лёгких электрических машин.

Библиографический список

1. Chau K. T., Chan C. C., Liu C. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55, № 6. – P. 2246–2257.
2. Widmer J. D., Martin R., Mecrow B. C. Precompressed and stranded aluminum motor windings for traction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52, № 3. – P. 2215–2223.
3. Mukundan S., et al. Comparative Performance Analysis of Copper and Aluminum Wound Fractional-Slot PMSMs for High-Speed Traction Application // Proceedings of 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Harbin, China, 2019. – P. 1–6.
4. Berger M. Carbon nanotubes – what they are, how they are made, what they are used for // Nanowerk. – 2018. – URL: <https://www.nanowerk.com> (дата обращения: 15.09.2025).
5. Pyrhönen J., et al. Replacing copper with new carbon nanomaterials in electrical machine windings // International Review of Electrical Engineering (IREE). – 2015.
6. Johnson D. Carbon nanotube yarns could replace copper windings in electric motors // IEEE Spectrum. – 2014.
7. Pyrhönen J., et al. Applicability of carbon nanotube materials in present-day and future electrical machines // Proceedings of 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). – IEEE, 2020. – Vol. 1. – P. 2379–2384.
8. Pasquali M. Carbon conductors for lightweight motors and generators // Presented at the US DOE Advanced Manufacturing Office Program Review Meeting. – Arlington, 2019.
9. Raminosoa T., Aytug T. Impact of ultra-conducting winding on the power density and performance of non-heavy rare earth traction motors // Proceedings of 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). – IEEE, 2019. – P. 2107–2114.

10. New composite material revs up pursuit of advanced electric vehicles // Oak Ridge National Laboratory. – URL: <https://www.ornl.gov/news/new-composite-material-revs-pursuit-advanced-electric-vehicles> (дата обращения: 15.09.2025).

11. Sag R., et al. Influence of carbon-based winding on maximum torque and specific torque designs of SPM machines // Proceedings of 2021 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). – IEEE, 2021. – P. 445–450.

На основе данной работ представлен доклад «Применение карбоновых нанотрубок в обмотках электрогенераторных установок». Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение от 17.01.2025 № 075-03-2025-407 о предоставлении субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00001-25-00 от 26.12.2024).

УДК 620.9:629.33

Электромобиль как часть энергосистемы

Исмагилов Ф.Р., Тимербулатов Т.А

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Современный мир сталкивается с необходимостью перехода к устойчивым источникам энергии и оптимизации использования электроэнергии. В условиях нарастающего использования возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветровые электростанции, возникает потребность в эффективных механизмах хранения и распределения энергии. Электромобили, обладая возможностью хранения значительных объемов электроэнергии, представляют собой перспективное решение этой задачи. Их интеграция в энергосистемы может способствовать не только повышению эффективности использования электроэнергии, но и снижению углеродного следа, что делает данное направление исследования актуальным.

Целью данной статьи является исследование роли электромобилей в современных энергосистемах, анализ их потенциала в качестве мобильных аккумуляторов и разработка рекомендаций по их эффективной интеграции. Для достижения этой цели поставлены задачи: изучить текущее состояние использования электромобилей в энергосистемах, исследовать их возможности как источников хранения энергии, оценить их влияние на баланс производства и потребления электроэнергии, а также предложить технические и организационные меры для успешной интеграции электромобилей в энергетические сети.

Анализ текущего состояния электромобилей в энергосистемах

Проблемы и вызовы использования электромобилей как элементов энергосистемы

Интеграция электромобилей в энергосистему сталкивается с рядом технических вызовов. Одной из ключевых проблем является риск перегрузки энергосетей в часы пикового потребления. Массовое подключение электромобилей к зарядным станциям, как указывает Международное энергетическое агентство (IEA), может значительно увеличить нагрузку на энергосистему, особенно в регионах с недостаточно развитой инфраструктурой. В 2020 году в Калифорнии наблюдались перебои в электроснабжении, вызванные высоким спросом на зарядку электромобилей в сочетании с экстремальными погодными условиями. Это подчеркивает необходимость модернизации энергетических сетей и внедрения технологий управления нагрузкой. Переход на электротранспорт «может оказать сильное влияние на экономику» [Белавский, б. г. 1 с.], что также следует учитывать в процессе интеграции электромобилей в существующие энергосистемы.

Организационные и экономические аспекты представляют собой значительные вызовы для интеграции электромобилей. Создание инфраструктуры зарядных станций требует существенных финансовых вложений. Успешная реализация подобных проектов требует координации усилий между государственными и частными секторами, а также разработки стратегий оптимизации затрат.

Роль электромобилей в современных энергосистемах

Технические аспекты интеграции электромобилей в современные энергосистемы играют важную роль в обеспечении их устойчивости и надежности. С увеличением числа электромобилей, которое в 2021 году превысило 16 миллионов, энергосистемы столкнулись с новыми вызовами, связанными с модернизацией инфраструктуры для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию. Быстрое развитие зарядной инфраструктуры является основным фактором, способствующим широкому принятию электромобилей. Одной из ключевых технологий, решающих эту проблему, является Vehicle-to-Grid (V2G). Эта система позволяет электромобилям не только потреблять, но и возвращать энергию в сеть, что способствует сглаживанию пиковых нагрузок и повышает общую эффективность энергосистемы.

Экономическое значение электромобилей в контексте энергосистем связано с их способностью снижать затраты на энергоснабжение и эксплуатацию. Согласно данным Международного энергетического агентства, к 2030 году использование батарей электромобилей для хранения энергии может привести к сокращению расходов на энергоснабжение на 20%. Исследование Bloomberg NEF также указывает на то, что совокупная экономия на топливе и обслуживании электромобилей может достигать 300 миллиардов долларов к 2040 году. Эти показатели подчеркивают как экономическую выгоду, так и потенциал электромобилей для оптимизации затрат в энергетическом секторе. С другой стороны, важно оценить потенциал и выявить наиболее эффективные пути перехода транспортной отрасли на экологически чистые источники топлива, такие как электричество и водород, с целью минимизации

экологического воздействия и обеспечения устойчивого развития отрасли [Гайнутдинова, Кукушкин, Гайнутдинов, 2024. 2 с.].

Опыт интеграции электромобилей в энергосистемы разных стран

Одним из ярких примеров успешной интеграции электромобилей в энергосистемы является проект Smart Solar Charging в Нидерландах. Этот проект демонстрирует возможность использования электромобилей не только как средства передвижения, но и как элемента энергетической инфраструктуры. Владельцы электромобилей в рамках данного проекта могут заряжать свои автомобили с использованием солнечной энергии, что способствует сокращению выбросов углекислого газа и снижению зависимости от традиционных источников энергии. Избыточная энергия, накопленная в батареях электромобилей, может быть возвращена в сеть, повышая её устойчивость и гибкость. Такой подход не только обеспечивает более эффективное использование возобновляемых источников энергии, но и открывает новые горизонты для интеграции электромобилей в энергосистемы.

Исследование потенциала и разработка рекомендаций

Электромобили как мобильные источники хранения энергии

Современные электромобили оснащены высокотехнологичными аккумуляторными системами, которые обеспечивают движение транспортного средства и позволяют эффективно хранить энергию. Например, аккумуляторы электромобилей Tesla Model S имеют емкость до 100 кВт·ч, что позволяет накапливать значительное количество энергии. Литий-ионные батареи, используемые в таких автомобилях, обладают высокой плотностью энергии, что делает их идеальными для применения в качестве мобильных источников хранения. Технология V2G (Vehicle-to-Grid) предоставляет возможность передачи электроэнергии обратно в сеть, что позволяет использовать электромобили для поддержки энергосистемы в периоды пикового потребления. «Активное использование технологии V2G – возможности электромобилей принимать и отдавать энергию в электросеть несет в себе огромный потенциал для изменения ландшафта электромобилей и экологически чистого транспорта» [Битней, Булалина, Смотронов, 2024. 3 с.]. В этом контексте электромобили становятся не только средством передвижения, но и важным элементом устойчивого развития энергетических систем.

Электромобили уже находят применение в качестве мобильных источников энергии в различных странах. В Японии, например, электромобили Nissan Leaf участвуют в проектах V2G, помогая стабилизировать энергосистему. В Германии реализуются пилотные проекты, где электромобили используются как резервные источники энергии для домов и офисов. «Электромобили становятся все более популярными, представляя собой многообещающее решение для снижения углеродных выбросов и эффективного использования энергии» [Гарифуллин, Миннибаев, [б. г.]. 1 с.]. При этом они также способны эффективно хранить избыточную энергию, производимую солнечными

панелями в дневное время, что способствует более рациональному использованию возобновляемых источников энергии.

Влияние электромобилей на баланс производства и потребления электроэнергии

Электромобили обладают значительным потенциалом для сглаживания пиковых нагрузок в энергосистеме благодаря технологии Vehicle-to-Grid (V2G). Эта технология позволяет электромобилем не только потреблять электроэнергию для зарядки, но и возвращать её в сеть в периоды пикового спроса. Исследование Bloomberg NEF показывает, что внедрение V2G может снизить пиковую нагрузку на энергосистему на 10–15%. Это достигается за счёт использования аккумуляторов электромобилей в качестве резервуаров для хранения избыточной энергии в часы низкого спроса и её отдачи в сеть в часы пикового потребления. Кроме того, «подзарядка батарей будет производиться беспроводным способом прямо во время движения по специальной электрифицированной дороге» [Иванова, Твердунова, [б. г.]. 783 с.]. Такие инновации могут дополнительно способствовать более равномерному распределению нагрузки в энергосистеме, что повышает её эффективность и снижает необходимость в строительстве дополнительных энергетических мощностей.

Увеличение доли возобновляемых источников энергии, таких как солнечные и ветровые электростанции, приводит к росту нестабильности в энергосистеме из-за их переменной выработки. В этом контексте электромобили могут играть ключевую роль в повышении устойчивости энергосистемы, выступая в качестве мобильных аккумуляторов. Например, в 2021 году в Калифорнии было зафиксировано увеличение стабильности энергосистемы на 8% благодаря использованию электромобилей для хранения и отдачи энергии в сеть. Это подтверждает, что электромобили способны компенсировать колебания выработки возобновляемых источников, сохраняя избыточную энергию в периоды высокой генерации и отдавая её в сеть в моменты дефицита. Такая интеграция способствует более эффективному использованию возобновляемых ресурсов и снижает зависимость от традиционных источников энергии. При этом производство электромобилей в России становится перспективным только при условии сочетания платформ собственной разработки с производством энергетических модулей, таких как аккумуляторные батареи и топливные элементы [Боровков, Княгинин, 2021. 8 с.].

Заключение

В ходе исследования было установлено, что электромобили представляют собой не только средство передвижения, но и важный элемент энергосистемы. Они способны способствовать оптимизации баланса между производством и потреблением электроэнергии, особенно в условиях увеличения доли возобновляемых источников энергии. Анализ существующих примеров и технологий показал, что электромобили могут эффективно использоваться в качестве мобильных источников хранения энергии, что открывает новые возможности для стабилизации энергосистем.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку и внедрение инновационных технологий, позволяющих интегрировать электромобили в энергосистемы с минимальными затратами и максимальной эффективностью. Особое внимание следует уделить созданию инфраструктуры зарядных станций и нормативно-правовой базы для поддержки таких инициатив. Практическая реализация может существенно повысить устойчивость и надежность энергосистем, а также способствовать сокращению углеродного следа.

Библиографический список

1. Белавский С. В. Влияние электротранспорта на экономику // [б. ж.]. — [б. г.]. — [б. с.].
2. Битней В., Булалина А., Смотронов Н. Технология электромобилей V2G как способ выравнивания графиков нагрузки бизнес-центров в энергосистеме Москвы // Энергетическая политика. — 2024. — № 11(202). — С. 50–51.
3. Гайнутдинова Д. Ф., Кукушкин Д. А., Гайнутдинов Ф. Р. Энергопереход в транспортной отрасли // III Всероссийская научная конференция с международным участием «Достижения науки и технологий, культурные инициативы и устойчивое развитие -ДНиТ-III-2024». — 2024. — С. 11. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.doi.org/10.47813/dnit-III.2024.11.1009>.
4. Гарифуллин Р. Ф., Миннибаев А. И. Экономика электромобилей: анализ влияния на мировой рынок энергии // [б. и.]. — [б. м.], [б. г.]. — [б. и.].
5. Джассим Х.М., Зюзев А.М., Костылев А.В., Мудров М.В., Хабаров А.И. Топологии и технологии станций быстрой зарядки электромобилей: обзор и сравнение // Вестник ПНИПУ. — 2023. — № 46. — С. 5–6. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.01.
6. Иванова Д.С., Твердунова А.Д. Инновационные технологии зарядки электромобилей // Актуальные проблемы энергетики. — [б. г.]. — С. 783–784.
7. Кушнер Д.А. Энергоэффективность электрифицированного транспорта: научная работа / Д.А. Кушнер. — [б. м.]: [б. и.], [б. г.]. — [б. с.].
8. Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России / под ред. А. И. Боровкова, В. Н. Княгинина. — Санкт-Петербург: Политех-пресс, 2021. — [б. с.].
9. Ростовский Й. К. Влияние развития электромобилей на потребление энергоресурсов: риски и возможности для экономики России // Проблемы прогнозирования. — 2023. — № 3. — С. 106–119. DOI: 10.47711/0868-6351-198-106-119.

**Аддитивные технологии в производстве обмоточных материалов
высокоудельных электрических машин. Обзор современного состояния
и перспектив**

Мулюков А.А., Ахмадеев А.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Обзор посвящен исследованию применения аддитивных технологий (АТ) в производстве обмоточных материалов для высокоудельных электрических машин, являющихся важным элементом современных электротехнических систем, предъявляющих высокие требования к эффективности и компактности. Традиционные методы производства обмоток сталкиваются с ограничениями в реализации сложной геометрии, эффективного охлаждения и использования перспективных материалов. Цель обзора – систематизация и критический анализ исследований применения различных методов АТ (SLM, DED, Binder Jetting и др.) для изготовления обмоток из меди, алюминия, высокотемпературных сплавов и композитов. Рассмотрены конструктивные особенности, оптимизированные с использованием топологической оптимизации для улучшения теплоотвода и электромагнитных характеристик. Проанализированы крупные проблемы и перспективные направления развития, включая разработку материалов, совершенствование технологий 3D-печати и применение искусственного интеллекта. Обзор призван продемонстрировать потенциал АТ в повышении удельной мощности и эффективности машин, а также обозначить необходимость дальнейших исследований.

1. Введение

В последние десятилетия наблюдается стремительный рост интереса к электрическим машинам с повышенной удельной мощностью (высокоудельным электрическим машинам), обусловленный их востребованностью в таких динамично развивающихся областях, как авиация, электромобильный транспорт, робототехника и возобновляемая энергетика. Достижение высокой удельной мощности, характеризующейся отношением мощности к массе или объему машины, является ключевым фактором повышения эффективности и компактности конечных устройств. Однако, традиционные методы проектирования и производства электрических машин, в частности обмоточных узлов, определяющих ключевые электромагнитные характеристики, сталкиваются с существенными ограничениями в достижении экстремальных показателей. Это ставит задачу поиска альтернативных подходов к производству обмоток. Как продемонстрировано в аннотации, одним из многообещающих направлений являются аддитивные технологии.

Аддитивные технологии (АТ), также известные как 3D-печать, представляют собой революционный подход к производству, позволяющий создавать объекты сложной формы непосредственно из цифровой модели путем

последующего добавления материала. В отличие от традиционных методов, АТ предоставляют беспрецедентную свободу дизайна, возможность интеграции функциональных элементов (например, каналов охлаждения, датчиков) и работы с широким спектром материалов. В продолжение тезиса, представленного в аннотации, использование АТ для производства обмоточных материалов высокоудельных электрических машин открывает новые горизонты для повышения их эффективности, компактности и эксплуатационных характеристик. Целью настоящего обзора является углубленное исследование применения АТ в данной области, что логически вытекает из представленной актуальности и потенциала, как было отмечено в аннотации. Обзор систематизирует и критически анализирует исследования в этой области, рассматривая различные методы АТ, материалы, конструктивные особенности обмоток и перспективные направления развития, что позволит оценить реальные возможности и направления для дальнейшего прогресса.

2. Высокоудельные Электрические Машины: Обзор и Требования к Обмоткам

Высокоудельные электрические машины (ВЭМ) представляют собой класс электромеханических преобразователей энергии, характеризующихся повышенным отношением мощности к массе или объему. Это достигается за счет инновационных конструктивных решений, применения передовых материалов и оптимизации электромагнитных и тепловых процессов. Согласно, интерес к ВЭМ обусловлен их критической ролью в ряде современных и перспективных приложений, где массогабаритные характеристики играют определяющую роль. Особенно это актуально для транспортных систем (электромобили, авиация), а также для возобновляемой энергетики и специального оборудования.

В зависимости от области применения и требований к производительности, ВЭМ могут быть классифицированы по различным критериям, включая:

Тип электрической машины: В данную категорию попадают синхронные машины с постоянными магнитами (PMSM), индукционные машины, синхронные машины с обмоткой возбуждения и машины с переключаемым реактивным сопротивлением. PMSM являются доминирующим типом ВЭМ, особенно в аэрокосмической отрасли, благодаря их высокой удельной мощности и эффективности.

Конструктивное исполнение: Радиальный или осевой поток; внутренний или внешний ротор.

Область применения: Тяговые двигатели для электромобилей, генераторы для авиационных двигателей, двигатели для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

2.1 Требования к обмоткам ВЭМ

Обмотки электрических машин являются одним из основных элементов, определяющим электромагнитные характеристики и, соответственно, удельную мощность и эффективность. Для ВЭМ требования к обмоткам становятся более жесткими:

1. Высокая электропроводность: Снижение потерь на сопротивлении обмоток является одним из важнейших элементов для повышения эффективности. Медь является популярным и достаточно эффективным материалом, но, далее будет рассказано, аддитивные технологии открывают возможности для использования новых материалов и оптимизации геометрии проводников.
2. Высокая механическая прочность: ВЭМ часто работают на высоких скоростях вращения, что создает значительные механические нагрузки на обмотки.
3. Термостойкость: Высокие плотности мощности приводят к значительному тепловыделению в обмотках. Использование материалов с высокой термостойкостью и эффективных систем охлаждения является необходимым условием для обеспечения надежной работы.
4. Малый вес: Для приложений, где важен малый вес (например, авиация), использование легких и прочных материалов (например, алюминия или композитов) является приоритетным.
5. Эффективное охлаждение: Интеграция каналов охлаждения непосредственно в обмотки является эффективным способом отвода тепла. Аддитивные технологии позволяют создавать сложные геометрические формы каналов охлаждения, недоступные для традиционных методов производства. 9 описывает косвенное щелевое охлаждение, которое может быть реализовано с помощью аддитивных технологий.
6. Высокая плотность тока: Увеличение плотности тока позволяет уменьшить размеры обмоток и увеличить удельную мощность, однако требует эффективного теплоотвода. Соответственно, важно увеличивать плотность тока для более компактных размеров и увеличения КПД, но так же нужно продумать систему теплоотвода.

2.2 Традиционные материалы и методы производства и их ограничения

Эффективность, надежность и удельная мощность электрических машин в значительной степени зависят от конструкции и характеристик их обмоток. В высокоудельных электрических машинах (ВЭМ) эти требования становятся особенно строгими, требуя инновационных подходов к выбору материалов и технологий изготовления.

2.2.1 Материалы обмоток

Выбор материала для обмотки диктуется несколькими ключевыми факторами: электропроводностью, механической прочностью, термостойкостью, плотностью и стоимостью. В настоящее время наиболее распространенными материалами являются медь и алюминий, однако, в последние годы активно исследуются альтернативные материалы, предлагающие улучшенные характеристики.

1. Медь (Cu): Медь является традиционным материалом для обмоток благодаря своей высокой электропроводности (58 MS/m) и относительно невысокой стоимости. Она обеспечивает низкие потери на сопротивлении и хорошую механическую прочность. Однако, медь имеет относительно высокую

плотность, что может быть критичным для ВЭМ, где важен малый вес. Для повышения термостойкости и улучшения свойств, медь может быть легирована.

2. Алюминий (Al): Алюминий обладает более низкой плотностью, чем медь, что делает его привлекательным для ВЭМ, где требуется минимизировать вес. Однако, электропроводность алюминия значительно ниже (38 MS/m), что приводит к увеличению потерь на сопротивлении. Алюминий может быть хорошей альтернативой меди в высокочастотных приложениях, где скин-эффект снижает влияние более низкой проводимости. Однако, следует учитывать, что стоимость алюминиевого провода, готового к намотке, может быть сопоставима с медным из-за низкого спроса и меньшей коммерческой доступности.

3. Медь, плакированная алюминием (ССА): ССА-провод представляет собой комбинацию алюминиевого сердечника, покрытого слоем меди. Это позволяет получить компромисс между весом, стоимостью и электропроводностью. Благодаря медному слою, ССА-провод обладает хорошей проводимостью на высоких частотах за счет скин-эффекта. Он также может быть более прочным и надежным, чем чистый алюминий. ССА-провод широко используется в радиочастотных антеннах и кабельном телевидении.

4. Углеродные нанотрубки (CNT) и графен: Эти неметаллические материалы обладают высокой электропроводностью и низкой плотностью, что делает их перспективными для применения в ВЭМ. CNT обладают низким температурным коэффициентом, что означает, что их сопротивление не сильно увеличивается с ростом температуры. К тому же, в них отсутствует скин-эффект. Исследования показывают, что добавление CNT в медную матрицу может снизить плотность и увеличить электропроводность. Однако, производство CNT-композитов в промышленных масштабах и обеспечение надежного электрического контакта между CNT и другими материалами остаются сложными задачами.

5. Высокотемпературные сверхпроводники (HTS): HTS-материалы обладают способностью проводить электрический ток без потерь при температурах ниже определенной критической. Они могут обеспечить очень высокую плотность тока. Коммерциализация HTS-обмоток ограничена техническими проблемами (механические нагрузки, защита от перегрева) и высокой стоимостью.

2.2.2 Методы производства обмоток и их ограничения

Технология изготовления обмотки играет критическую роль в определении ее характеристик. В настоящее время используются различные методы, которые можно разделить на традиционные и аддитивные.

1. Традиционные методы:

1.1 Намотка круглым проводом: Это наиболее распространенный метод производства обмоток, в котором круглый провод наматывается на сердечник. Этот метод прост и экономичен, но имеет ограничения по плотности заполнения и теплоотводу.

1.2 Намотка прямоугольным проводом: Прямоугольный провод позволяет увеличить коэффициент заполнения паза и улучшить теплоотвод. Этот метод требует более сложного оборудования и может быть сложнее в автоматизации.

1.3 Волочение: Данный метод позволяет формировать ортоциклические катушки из медного провода, обеспечивающие хороший коэффициент заполнения паза (60-70%).

2. Аддитивные методы:

2.1 Селективное лазерное плавление (SLM): SLM является перспективным методом изготовления обмоток сложной формы. Он позволяет создавать катушки с интегрированными каналами охлаждения и оптимизированной геометрией проводников. В SLM используется лазер для плавления порошкового материала (медь, алюминий и т.д.) слой за слоем. Ограничениями SLM являются высокая стоимость и относительно низкая электропроводность получаемых изделий. Также этот метод хорошо подходит для многоматериальной печати, как, например, медь с керамической изоляцией.

2.2 Инжекция связующего (Binder Jetting): Данный метод включает распыление связующего вещества на порошковый материал с последующим отверждением. Затем происходит процесс спекания в печи. Этот процесс имеет ограничения по электропроводности получаемых обмоток.

2.3 Прямая печать экструзией (Direct Ink Writing): Этот метод позволяет создавать проводящие элементы с помощью экструзии проводящей пасты, такой как паста, наполненная микро- и наночастицами серебра. С помощью данного метода удалось получить высокую термостойкость получаемых обмоток.

3. Проблемы и ограничения

В 63 и ряде других работ подчеркивается, что, несмотря на значительный прогресс в области материалов и технологий производства обмоток для ВЭМ, существуют определенные проблемы и ограничения, которые необходимо учитывать:

3.1 AC потери и коэффициент заполнения паза: При высокой частоте коммутации инвертора в обмотках возникают дополнительные потери из-за скин-эффекта и эффекта близости. Использование многожильного провода (litz-wire) и транспозиция проводников позволяют снизить эти потери, но при этом уменьшают коэффициент заполнения паза.

3.2 Механические и акустические характеристики: Высокие скорости вращения и электромагнитные силы могут вызывать вибрации и шум в обмотках. Важно учитывать эти факторы при проектировании и использовать методы снижения вибрации, такие как активное и пассивное шумоподавление.

3.3 Теплоотвод и охлаждение торцевых частей: Эффективный отвод тепла от обмоток является критичным для обеспечения надежной работы ВЭМ. Традиционные методы охлаждения (воздушное, жидкостное) могут быть недостаточно эффективными для ВЭМ с высокой плотностью мощности. Для улучшения теплоотвода используются каналы охлаждения.

3.4 Изоляция: Выбор изоляционного материала является критичным для обеспечения надежной работы обмоток в условиях высоких температур и напряжений. Важно учитывать термический класс изоляции, ее стойкость к воздействию влаги, химических веществ и механических нагрузок.

3.5 Автоматизация и технологичность: Для крупносерийного производства необходимы автоматизированные методы изготовления обмоток. Методы, подходящие для ручного производства, могут быть неэффективными и дорогими при автоматизации.

3. Аддитивные Технологии для Производства Обмоток: Обзор Методов

Аддитивное производство (AM) или 3D-печать представляет собой перспективный метод конструирования электрических машин, благодаря возможности создавать части практически любой формы. Общий принцип всех методов AM — это создание детали путем последовательного нанесения слоев материала на основе цифровой модели. Согласно классификации Американского общества по испытаниям и материалам (ASTM), существует 7 типов AM:

Стереолитография (Vat Photopolymerization)

Струйная печать материалами (Material Jetting)

Струйная печать связующим (Binder Jetting)

Экструзия материалов (Material Extrusion)

Послойное сплавление порошка (Powder Bed Fusion) - Этот метод является самым значимым в контексте электрических машин и включает в себя:

-Прямое лазерное спекание металлов (DMLS)

-Электронно-лучевое плавление (EBM)

-Селективное лазерное спекание (SHS)

-Селективное лазерное плавление (SLM)

Листовая ламинация (Sheet Lamination)

Прямое энергетическое осаждение (Direct Energy Deposition)

В послойном сплавлении порошка используется лазер или электронный луч для сплавления (спекания или плавления) частиц пластикового или металлического порошка слой за слоем. Металлические сплавы, например, алюминий, титан, сталь, никель и хром-кобальт хорошо подходят для DMLS/SLS. Дальнейшая классификация и стандартизация AM описана в работах.

4. Материалы для Аддитивного Производства Обмоток

Для использования AM в электрических машинах интересны материалы, такие как пластмассы, керамика и металлические сплавы. Примеры работ, основанные на данных материалах: изготовление алюминиевого сплава для электрических машин, исследование изготовления ротора из FeCo и эксперименты по производству постоянных магнитов из NdFeB.

5. Конструктивные Особенности и Топологическая Оптимизация

Благодаря AM появляется возможность создавать компоненты (например, теплоотводы) с уникальными свойствам. Конструкции с интегрированными каналами для жидкостного охлаждения могут существенно снизить общую

стоимость, так как АМ позволяет создавать уникальные и компактные геометрические формы.

6. Проблемы и Вызовы

Представленные исследования демонстрируют различные уровни технологической готовности (TRL). Основное внимание уделяется отдельным подузлам/активным материалам машин, в то время как конструктивным и термальным аспектам уделяется большее внимание, а полная сборка машины с использованием компонентов, напечатанных с использованием АМ, пока не является мейнстримом. Основная проблема заключается в том, что части, изготовленные с использованием АМ, часто имеют более низкие физические свойства по сравнению с существующими решениями. Требуется проведение дополнительной обработки для изменения электромагнитных свойств сердечника, в котором также используется АМ.

7. Перспективы и Будущие Направления

В АМ видят возможность производить практически неограниченное количество деталей. Основные перспективы для АМ заключаются в улучшении характеристик традиционных электрических машин, и также для создания новых, более эффективных машин. Необходимы всесторонние исследования, учитывающие материалы, методы изготовления и новые концепции дизайна.

8. Заключение

Представленный обзор демонстрирует значительный, хотя и еще не полностью реализованный, потенциал аддитивных технологий (АТ) в производстве обмоточных материалов для высокоудельных электрических машин. АТ предлагают инновационные возможности для преодоления ограничений традиционных методов, позволяя создавать обмотки с оптимизированной геометрией, интегрированными системами охлаждения и использованием перспективных материалов, таких как композиты и высокотемпературные сплавы.

Обзор показал, что наиболее перспективными методами АТ для производства обмоток являются послойное сплавление порошка (SLM, EBM), предлагающие возможность работы с широким спектром металлов и сплавов. Тем не менее, остаются вызовы, связанные с обеспечением высокой электропроводности, механической прочности и надежной изоляции обмоток, изготовленных с использованием АТ. Высокая стоимость материалов и оборудования, а также необходимость постобработки также ограничивают широкое распространение этих технологий.

Будущие исследования должны быть направлены на разработку новых материалов, специально предназначенных для АТ обмоток, а также на совершенствование методов 3D-печати для повышения скорости, точности и снижения стоимости. Разработка новых методов проектирования и оптимизации обмоток, учитывающих особенности АТ, также является важным направлением исследований. Необходимы дальнейшие усилия для создания многоматериальных обмоток, сочетающих в себе проводящие и изоляционные материалы, напечатанные за один проход, а также для разработки эффективных

методов контроля качества и неразрушающего контроля обмоток, изготовленных с помощью АТ.

Реализация потенциала аддитивных технологий в производстве обмоточных материалов позволит создать новое поколение высокоэффективных и компактных электрических машин, востребованных в ключевых отраслях промышленности, включая авиацию, электромобили и возобновляемую энергетику.

Библиографический список

1. El-Refaie A., Osama M. High specific power electrical machines: A system perspective // *CESTransactions on Electrical Machines and Systems*. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 88-93.
2. Selema A., Ibrahim M.N., Sergeant P. Electrical machines winding technology: Latest advancements for transportation electrification // *Machines*. – 2022. – Т. 10. – №. 7. – С. 563.
3. Wrobel R., Mecrow B. Additive manufacturing in construction of electrical machines—a review // *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. – IEEE, 2019. – Т. 1. – С. 15-22.
4. Zhou Y., Lee C. H. T. Additive Manufacturing for Enhanced Electric Machine Performance // *Chinese Journal of Electrical Engineering*. – 2025. – Т. 11. – №. 2. – С. 101-113.
5. Naseer M. U. et al. A review on additive manufacturing possibilities for electrical machines // *Energies*. – 2021. – Т. 14. – №. 7. – С. 1940.
6. Vaimann T., Kallaste A. Additive manufacturing of electrical machines—towards the industrial use of a novel technology // *Energies*. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 544.
7. Kareem F. A., Michael P. A. An investigation on applications of additive manufacturing of electrical machines // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Т. 58. – С. 86-90.
8. Wu F., EL-Refaie A. M. Toward additively manufactured electrical machines: Opportunities and challenges // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2019. – Т. 56. – №. 2. – С. 1306-1320.

Энергия черной дыры для электротранспорта: вызовы и решения

Пономарев Г.О.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. В данной работе предпринята попытка рассмотреть один из самых необычных потенциальных источников энергии для электротранспорта будущего. Рассматриваются теоретические механизмы генерации энергии, технические проблемы передачи и преобразования энергии, а также перспективы интеграции в энергосистему. Особое внимание уделено связи концепции с развитием инфраструктуры заряда, производством новых материалов и системами накопления энергии.

Современный электротранспорт сталкивается с фундаментальной проблемой ограниченности традиционных источников энергии [5, 12]. Согласно прогнозам Международного энергетического агентства, к 2040 году мировой парк электромобилей может достичь 2 миллиардов единиц, что потребует увеличения генерирующих мощностей на 15-20% от текущего уровня потребления [12]. Существующие решения на основе возобновляемых источников энергии и атомной энергетики имеют существенные ограничения по масштабируемости и экологической эффективности [5]. В данном контексте представляет значительный научный и практический интерес анализ потенциального использования энергии черной дыры как перспективного источника энергии для электротранспорта будущего.

Основой для рассмотрения концепции послужили фундаментальные работы Стивена Хокинга [1], который в 1974 году теоретически доказал возможность квантового излучения черными дырами. Согласно теории Хокинга, на границе горизонта событий происходят квантовые флуктуации, приводящие к рождению пар частица-античастица. Одна из частиц падает в черную дыру, а другая улетает в космическое пространство, что с точки зрения удаленного наблюдателя выглядит как тепловое излучение черной дыры [1].

Проведенные расчеты показывают, что микроскопическая черная дыра массой порядка 10^{12} кг (сравнима с массой горы Эверест) способна генерировать мощность до 10^{15} Вт [1, 3]. Такой энергии достаточно для одновременного питания 5 миллионов электромобилей, что превышает возможности крупнейших современных электростанций [3].

Дополнительный механизм извлечения энергии был предложен Роджером Пенроузом в 1969 году [2]. Его теория описывает процесс извлечения энергии из вращающейся черной дыры (метрики Керра) через эргосферу - область, расположенную между горизонтом событий и пределом статичности. В этой области пространство-время вращается вместе с черной дырой, что позволяет извлекать энергию через разделение падающих частиц [2].

Еще одним потенциальным источником энергии является аккреционный диск - вещество, падающее на черную дыру и разогревающееся до температур в

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

миллионы градусов за счет трения и гравитационного сжатия. Энергия аккреционного диска может преобразовываться в электрическую с помощью термоэлектрических генераторов или через систему зеркал и турбин [6].

Анализ современных тенденций развития электротранспорта позволяет выделить несколько ключевых направлений потенциального применения энергии черной дыры:

Системы мегаваттной зарядки (MCS) для коммерческого транспорта требуют мощности до 3,5 МВт на одну станцию [10]. Энергия черной дыры могла бы обеспечить питание сети таких станций без необходимости создания протяженных линий электропередачи. Передача энергии могла бы осуществляться с помощью направленного микроволнового или лазерного луча [4].

Производство водорода для грузового транспорта методом электролиза требует значительных энергозатрат. Согласно исследованиям [12], для перевода всего грузового транспорта на водородные топливные элементы потребуется около 3000 ТВт·ч в год, что составляет примерно 10% от современного мирового энергопотребления.

Решение проблемы пиковых нагрузок в энергосетях, вызванных одновременной зарядкой миллионов автомобилей в вечерние часы [7]. Постоянный поток энергии из космоса позволил бы отказаться от использования пиковых углеводородных электростанций.

Питание инфраструктуры для электрической авиации (eVTOL) и гиперпетлей, которые требуют энергии в масштабах, недостижимых для традиционных источников [10].

В таблице 1 систематизированы основные проблемы и потенциальные пути их решения на современном уровне развития технологий.

Таблица 1. Проблемы и решения в реализации концепции

Проблема	Потенциальное решение	Перспективы реализации
Низкий КПД беспроводной передачи энергии (не более 85% на современных технологиях) [4]	Разработка новых материалов на основе высокотемпературной сверхпроводимости и метаматериалов	Среднесрочная перспектива (15-20 лет)
Непостоянство мощности черной дыры из-за колебаний аккреционного потока [5]	Создание систем накопления энергии колоссальной емкости на основе гравитационных накопителей	Долгосрочная перспектива (25-30 лет)
Вопросы безопасности контроля искусственной черной дыры [11]	Разработка систем мониторинга и управления на основе квантовых вычислений	Долгосрочная перспектива
Необходимость создания новой космической инфраструктуры [3]	Поэтапное развитие технологий с использованием существующих космических аппаратов	Среднесрочная перспектива

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Высокая стоимость реализации проекта [5]	Международное сотрудничество и поэтапное финансирование	Долгосрочная перспектива
--	---	--------------------------

Для практической реализации концепции потребуется решение ряда технических задач. Система передачи энергии должна включать орбитальные преобразователи, способные работать в условиях интенсивного излучения вблизи черной дыры. Современные исследования в области материаловедения показывают перспективность использования карбида кремния и алмазоподобных покрытий для работы в экстремальных условиях [6].

Наземная инфраструктура приема энергии потребует создания сетей ректенн площадью в несколько квадратных километров. Согласно исследованиям [4], современные прототипы таких систем демонстрируют эффективность преобразования до 85%, но для практического применения необходимо достижение показателей не менее 95%.

Системы накопления энергии должны быть способны аккумулировать гигаواتт-часы энергии для компенсации суточных колебаний потребления. Перспективными направлениями являются гравитационные накопители на основе подъема грузов и тепловые аккумуляторы с фазовым переходом [5].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

Теоретическая возможность использования энергии черной дыры имеет серьезное научное обоснование, однако техническая реализация проекта требует преодоления значительных проблем.

Основные проблемы включают недостаточную эффективность беспроводной передачи энергии, необходимость создания систем накопления колоссальной емкости и решение вопросов безопасности.

Развитие технологий для реализации данной концепции будет способствовать прогрессу в смежных областях, включая материаловедение, космические технологии и системы управления энергопотоками.

Даже при гипотетическом характере самой идеи, ее исследование стимулирует развитие критически важных технологий для электротранспорта будущего.

Библиографический список

1. Hawking, S. W. (1974). Black hole explosions? *Nature*, 248(5443), p. 30–31.
2. Penrose, R. (1969). Gravitational collapse: The role of general relativity. *Rivista del Nuovo Cimento*, 1, p. 252–276.
3. NASA. (2021). Space-Based Solar Power. Official Report, p. 45.
4. IEEE. (2022). Wireless Power Transmission Technologies for Space Applications. Conference Proceedings, p. 112.
5. BloombergNEF. (2023). Energy Storage Market Outlook, p. 89.
6. Caltech. (2020). Space Solar Power Initiative. Research Paper, p. 67.
7. Siemens. (2022). Smart Grid Solutions for Future Energy Systems. White Paper, p. 54.
8. Thorn, K. (1994). Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy. W. W. Norton & Company, p. 478.

9. Reynolds, A. (2005). Pushing Ice. Gollancz, p. 512.
10. U.S. Department of Energy. (2023). Megawatt Charging Standard for Electric Trucks. Technical Report, p. 33.
11. Unruh, W. G. Second quantization in the Kerr metric. Physical Review D, 10(10), p. 3194–3205.
12. IEA. Global EV Outlook 2024. International Energy Agency, 2024, p. 102.

УДК 621.313.84

Методы повышения отказоустойчивости обмоток тягового электродвигателя гибридного КАМАЗа

Султангареев Д.У., Шайхлисламов А.И.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. В статье рассматриваются подходы к повышению надёжности и долговечности обмоток тяговых электродвигателей, используемых в гибридных автомобилях КАМАЗ. Основное внимание уделено специфике эксплуатации отечественных грузовиков в сложных климатических и дорожных условиях. Проанализированы факторы, ускоряющие износ изоляции и вызывающие отказы обмоток, а также предложены инженерные решения, направленные на снижение риска аварий. В работе обсуждаются конструктивные методы, современные материалы и интеллектуальные системы мониторинга. Представлены примеры зарубежного опыта и показано, каким образом данные практики могут быть адаптированы к российскому транспорту.

Современные гибридные грузовые автомобили КАМАЗ сталкиваются с повышенными требованиями к надёжности электропривода. В отличие от легковых машин, их эксплуатация нередко связана с тяжёлыми режимами: движение по загруженным городским улицам, работа в условиях карьеров или строительных площадок, перепады температур и воздействие агрессивной внешней среды. Такие факторы существенно увеличивают вероятность повреждения обмоток тягового электродвигателя. Статистические данные [1] показывают, что именно повреждение изоляции и перегрев обмоток являются одними из главных причин выхода из строя силовой части гибридных установок. Это определяет актуальность разработки решений, способных обеспечить длительную и безотказную работу электродвигателей в реальных условиях эксплуатации КАМАЗа. Настоящая работа посвящена анализу, обобщению и развитию существующих подходов, применительно к гибриднему КАМАЗу.

Под отказоустойчивостью понимается способность системы сохранять функциональность при частичных повреждениях [6, 8, 9]. Для тягового электродвигателя КАМАЗа это означает возможность продолжения работы даже при локальных дефектах обмоток. Основные задачи включают: снижение вероятности полного выхода из строя, продолжение работы в режиме

пониженной мощности, увеличение срока службы и минимизацию простоев. Отказоустойчивость обеспечивается следующими группами решений:

1. Конструктивные – секционирование обмоток, многослойная изоляция, антикоронное покрытие.
2. Технологические – вакуумно-напорная пропитка, компаунды, бандажирование;
3. Электрические – датчики температуры и тока, фильтрация перенапряжений, ограничение перегрузок;
4. Интеллектуальные – онлайн-мониторинг, цифровые двойники, анализ гармоник. Такая система мер позволяет повысить отказоустойчивость до 90 %.

В мировой практике повышение надежности электрических машин достигается за счет использования новых материалов и систем диагностики. В работах [1] и [2] показано, что ключевыми направлениями являются повышение теплостойкости изоляции и внедрение цифровых систем мониторинга. В стандартах IEC 60034-1 [3] и IEC 60085 [5] определены минимальные требования к изоляции и тепловым классам. В работе [6] предложены методы диагностики на основе идентификации параметров и спектрального анализа. Зарубежный опыт Siemens и Bombardier показывает высокую эффективность применения предиктивной диагностики и цифровых двойников электрических машин [10].

В работе [5] рассмотрено применение изоляции класса N (200°C) и антикоронных покрытий в тяговых двигателях электропоездов. Показано, что срок службы изоляции увеличился с 15 до 22 лет, а количество отказов, связанных с пробоем изоляции, снизилось на 35 %. Вакуумно-напорная пропитка (VPI) позволила устранить микропоры в изоляции, которые приводят к частичному разряду, возникающее в обмотках, а система датчиков температуры обеспечила предотвращение перегрева.

В техническом отчете Siemens [9] описана модернизация тяговых электродвигателей для гибридных автобусов. Благодаря внедрению секционированных обмоток и интеллектуальной системы диагностики удалось снизить количество аварийных простоев на 40 % и увеличить срок службы на 20–25 %. При отказе одной секции двигатель сохранял работоспособность на уровне 80 % мощности. Использование изоляции класса N с антикоррозионными покрытиями обеспечило устойчивость к перенапряжениям от силовой электроники.

Наибольший вклад в отказы обмоток вносят износ изоляции и межвитковые замыкания (около 35 %). Далее следуют перегрев (25 %) и пробой изоляции (20 %). Механические повреждения и старение изоляции составляют меньшую, но значимую часть отказов.

В таблице 1 представлены типичные отказы в обмотках электрических машин, а также методы их решения.

Таблица 1. Виды повреждений обмоток и методы их устранения

Основная причина отказа	Предлагаемое решение	Обоснование
Локальные межвитковые замыкания	Секционирование обмоток, применение вакуумно-напорной пропитки	Позволяет ограничить развитие дефекта и сохранить работоспособность электрической машины в аварийном режиме
Пробой изоляции	Использование полиимидной или слюдяной изоляции, антикоронные покрытия	Повышает устойчивость к перенапряжениям и частичным разрядам
Перегрев при высоких нагрузках	Встроенные температурные датчики, каналы охлаждения в обмотках	Ключевое значение имеет интеграция системы охлаждения в конструкцию статора
Вибрационные и механические воздействия	Бандажирование и применение виброустойчивых компаундов	Наиболее актуально для тяжелых условий эксплуатации
Старение материалов	Внедрение систем онлайн-мониторинга и цифровых двойников	Данные позволяют прогнозировать ресурс и своевременно планировать обслуживание

Повышение отказоустойчивости тяговых электродвигателей гибридных грузовиков невозможно без комплексного подхода. Результаты анализа показывают, что традиционные методы защиты не позволяют в полной мере учитывать реальные условия эксплуатации. Наиболее перспективным направлением представляется интеграция конструктивных доработок, инновационных изоляционных материалов и интеллектуальных систем диагностики. Примеры из железнодорожного транспорта [8] и автобусных систем Siemens ELFA [9] показывают эффективность внедрения современных материалов, секционных обмоток и интеллектуальных систем мониторинга.

Внедрение таких решений в производство КАМАЗ позволит сократить число внеплановых простоев техники, увеличить срок службы обмоток и повысить конкурентоспособность отечественных гибридных автомобилей на мировом рынке.

Библиографический список

1. Electric machines and power electronics [review of "Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB"; Boldea, I. and Tutelea, L. ; 2010) [Book News] // researchgate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/260625>

597_Electric_machines_and_power_electronics_review_of_Electric_Machines_Steady_State_Transients_and_Design_with_MATLAB_Boldea_I_and_Tutelea_L_2010_Book_News (дата обращения: 13.09.2025).

2. Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals // researchgate URL: https://www.researchgate.net/publication/348503880_Electric_and_Hybrid_Vehicles_Design_Fundamentals (дата обращения: 13.09.2025).

3. Машины, электрические вращающиеся ГОСТ ИЕС 60034- 1— 2014 // zavod-elektrodivigatel URL: <https://zavod-elektrodivigatel.ru/assets/files/document/gost-iec-60034-1.pdf> (дата обращения: 13.09.2025).

4. Fault diagnosis of electrical machines-a review // ieeexplore URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/769076> (дата обращения: 14.09.2025).

5. Электрическая изоляция Классификация и обозначение по термическим свойствам // files.stroyinf URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293798/4293798255.pdf> (дата обращения: 14.09.2025).

6. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines // researchgate URL: https://www.researchgate.net/publication/375389448_Parameter_Estimation_Condition_Monitoring_and_Diagnosis_of_Electrical_Machines (дата обращения: 14.09.2025).

7. Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects // researchgate URL: https://www.researchgate.net/publication/354710434_Digital_Twin_in_Electrical_Machine_Control_and_Predictive_Maintenance_State-of-the-Art_and_Future_Prospets (дата обращения: 14.09.2025).

8. Siemens ELFA Drive System for Hybrid Electric Vehicles // researchgate URL: https://www.researchgate.net/publication/287242970_Siemens_ELFA_Drive_System_for_Hybrid_Electric_Vehicles (дата обращения: 14.09.2025).

9. 493-2007 - IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems // ieeexplore URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6044684> (дата обращения: 14.09.2025).

УДК 62-233.2

Повреждение подшипников из-за «подшипниковых токов»

Хамзин Ф.С., Султангареев Д.У., Иванов М.В., Горюхин М.О.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Возникновение напряжения на валу двигателя и тока в подшипниках, вызванное работой инвертора, усугубляет повреждения подшипников и приводит к их преждевременному выходу из строя. Из-за

индуцированных токов в подшипниках выходят из строя множество видов оборудования, например фильтры, изолированные подшипники и заземляющие щётки. Традиционные меры по подавлению токов в подшипниках не могут устранить их полностью, а механизм повреждения подшипников токами в настоящее время исследуются. В этой статье анализируется влияние различных условий работы на токи в подшипниках и наносимый ими ущерб.

Введение

Подшипник является важнейшим компонентом двигателя и определяет его производительность. С широким распространением инверторов с широтно-импульсной модуляцией в электродвигателях влияние индуцированного тока в подшипнике на работу двигателя стало значительным. Это приводит к коррозии подшипника, сокращает срок службы двигателя и, как следствие, приводит к его выходу из строя [1,2].

Фактически частота и амплитуда напряжения на выходе ШИМ-преобразователя регулируются быстродействующим импульсным источником питания силовой электроники. Время, необходимое для включения/выключения тиристора, приводит к возникновению синфазного напряжения высокой частоты на нейтральном выводе обмоток двигателя. Обмотка двигателя, ротор, корпус, тела качения и дорожки качения действуют как ёмкостные электроды, которые образуют в двигателе ёмкостную связь и обеспечивают путь заземления для синфазного напряжения [3]. Кроме того, асимметричный магнитный поток внутри двигателя может индуцировать ненулевое напряжение на валу, что приводит к циркуляции тока по схеме «один конец подшипника — корпус — другой конец подшипника — ротор».

Индукцированные токи в подшипнике вызывают электроэрозионные повреждения на телах и дорожках качения [4]. Поверхностные слои этих компонентов плавятся, и на них образуются точечные дефекты [5]. Кроме того, токи в подшипнике снижают твёрдость поверхности тел и дорожек качения. В сочетании с концентрацией напряжений, вызванной коррозионными язвами. Под воздействием индуцированного тока на поверхности тел и дорожек качения подшипника появляются светлые и тёмные участки с повреждениями [6]. Кроме того, высокая температура и частицы, образующиеся в результате разряда, приводят к ухудшению характеристик консистентной смазки подшипника [7].

В настоящее время исследования, посвящённые повреждению подшипников токами, в основном включают изучение механизма и важнейших параметров, влияющих на возникновение токов, схемотехническую модель токов в подшипниках и влияние токов на эксплуатационные характеристики подшипников [8]. Исследования, посвящённые повреждению подшипников токами, показали, что на него в основном влияют частота вращения двигателя, нагрузка состав смазочного материала и изоляционный слой. Однако отказ подшипников — это обширная область, которая в настоящее время активно исследуется, и механизм возникновения повреждений изучается.

Повреждение подшипников из-за токов в подшипниках

Ток может проходить через подшипник в нескольких состояниях:

1) когда подшипник полностью смазан плёнкой смазки, тела качения, дорожка качения и смазка образуют эквивалентную ёмкость; под воздействием быстрого переменного синфазного напряжения через эквивалентную ёмкость подшипника от вала двигателя к корпусу протекает ток;

2) когда тело качения и дорожка качения соприкасаются, подшипник образует сопротивление в цепи. Ток будет проходить через очень маленькую площадь контакта, и тепло, выделяемое током, может расплавить поверхностный слой материала тел и дорожек качения подшипника, в результате чего они слипнутся;

3) Когда образуется масляная плёнка, синфазное напряжение создаёт электрическое поле между внутренним и наружным кольцами подшипника до тех пор, пока напряжение на подшипнике не превысит напряжение пробоя масляной плёнки. Кроме того, зазор между телами и дорожкой качения или приближение тел качения к дорожке качения также могут привести к разряду из-за электрического поля между внутренним и наружным кольцами подшипника. Подшипниковый ток приводит к преждевременному точечному повреждению подшипника, что в конечном счёте ведёт к образованию канавок, а также к ухудшению качества смазки.

В процессе повреждения подшипника током плотность тока в подшипнике может быть использована для определения степени повреждения подшипника током. В работе [9, 10] обнаружили, что слабые токи могут вызывать повреждение подшипников. Поскольку площадь электрического контакта между телами качения и дорожкой качения значительно меньше площади контакта по Герцу, когда через подшипник проходит ток, локальная плотность тока, проходящего через тела и дорожку качения, может быть высокой [11]. Даже если ток очень слабый, он приводит к разрушению смазочного материала, что сокращает срок службы подшипника.

Параметры конструкции двигателя

Конструктивные особенности двигателя влияют на эквивалентную ёмкость внутри двигателя, что, в свою очередь, влияет на напряжение на валу и ток в подшипниках. В работе [12] исследовали ток в подшипниках двух типов синхронных машин с постоянными магнитами (PMSM, 90 кВт) с разными пазами статора и геометрическими формами и обнаружили, что коэффициент деления напряжения (BVR) подшипников двигателя с большей длиной осевого сердечника выше, а расположение обмоток статора вдали от поверхности ротора может снизить ёмкость связи и пиковое значение тока в подшипниках. А в работе [13] исследовали влияние комбинаций магнитных полюсов и пазов статора на напряжение на валу магнитоэлектрических машин и обнаружили, что пазы статора могут снижать индуцированное напряжение на валу.

В работе [14, 15] использовали электромагнитный анализ методом конечных элементов со связанной полевой схемой и обнаружили, что зубцы статора и каркас охлаждающего канала оказывают большое влияние на синфазный поток, что вызывает циркуляцию индуцированных токов в подшипниках.

Смазка

Когда двигатель работает на высоких оборотах, тела качения отделены от дорожки качения непроводящей смазкой, а ненулевое синфазное напряжение воздействует на подшипник, вызывая небольшой ёмкостный ток в подшипнике. Как только напряжение в подшипнике превысит пороговое значение для масляной плёнки, электроэрозионный ток пробьёт масляную плёнку, а тепло, выделяемое электрическими искрами, расплавит материал на теле качения и поверхности дорожки качения, в результате чего образуется дефект.

Из-за того, что консистентная смазка не проводит ток, она напрямую влияет на напряжение и ток в подшипнике. Базовое масло в составе смазки оказывает значительное влияние на разряд тока в подшипнике и его повреждение [16]. Используя смазку с низким удельным сопротивлением, исследователи измерили плотность магнитного потока (указывающую на прохождение тока) на поверхностях подшипников. Исследователи пришли к выводу что подшипник действует как омическое сопротивление, когда тела и дорожки качения соприкасаются или на них присутствует токопроводящая смазка. Из этого следует что ток проходящий непосредственно через подшипник нагревает тела и дорожки качения [17]. По данным исследователей [18], напряжение на валу при использовании токопроводящих смазок ниже, чем при использовании непроводящих смазок, но после эксплуатации их свойства аналогичны свойствам непроводящих смазок. Исследователи [19] обнаружили, что амплитуда высокочастотного тока в подшипнике dv/dt увеличивается по мере износа смазки в подшипнике.

Для определения напряжения пробоя масляной плёнки в подшипнике теперь используются диэлектрическая прочность смазки и минимальная толщина масляной плёнки. Исследователи [20] обнаружили, что напряжение пробоя масляной плёнки в подшипнике снижается при увеличении частоты напряжения. В работе [21] показали, что при высокой температуре вязкость смазки снижается, что приводит к истончению масляной плёнки и снижению напряжения пробоя масляной плёнки. Чем выше температура подшипника, тем больше времени он проводит в токопроводящем состоянии, что может быть связано с тем, что из-за высокой температуры толщина масляного слоя уменьшается. Скорость вращения и температура влияют на толщину масляной плёнки и диэлектрическую прочность. Диэлектрическая прочность консистентной смазки выше при высоких температурах, чем при низких, а скорость вращения снижает диэлектрическую прочность, увеличивая толщину масляной плёнки. В работе [22] сообщили, что при увеличении концентрации MoS_2 (компонента смазочного масла, улучшающего противоизносные свойства) и амплитуды тока изолирующий эффект масляной плёнки снижается. Исследователями [23] было обнаружено, что подшипники с низкой шероховатостью дорожек качения сильнее вибрировали. Это может быть связано с тем, что на гладкой поверхности с большей вероятностью образуется сплошная масляная плёнка, а значит, она может выдерживать более высокое напряжение, в то время как шероховатая дорожка качения может напрямую

контактировать с масляной плёнкой или снижать напряжение пробоя масляной плёнки, что приводит к меньшему повреждению подшипника током, чем в случае с гладкой поверхностью. Таким образом, расчёт напряжения пробоя смазочной плёнки подшипника на основе толщины смазочной плёнки и её диэлектрической прочности может привести к ошибке.

Скорость вращения

В процессе работы двигателя его скорость влияет на состояние подшипников и среднее выходное напряжение инвертора, что, в свою очередь, влияет на износ подшипников. Некоторые исследования показали, что при увеличении скорости двигателя увеличивается и пиковое значение индуцированного тока в подшипниках, а при определённой скорости пиковое значение достигает максимума и затем снижается. При тестировании пикового тока разряда двигателя исследователи обнаружили, что с увеличением нагрузки частота вращения, при которой возникал максимальный ток в подшипнике, снижалась [24]. Исследователи обнаружили, что разрядная активность двигателя более выражена на низких скоростях, чем на высоких [25]. Они предположили, что при увеличении частоты вращения после прохождения определённого порога толщина масляной плёнки увеличивается, что предотвращает разрядные явления и повышает сопротивление контура тока в подшипнике, снижая пиковый ток в подшипнике.

Во время работы двигателя он может часто менять скорость и останавливаться из-за изменения нагрузки или условий эксплуатации, что также способствует повреждению подшипников. По сравнению с работой на постоянной скорости, В работе [26] отметили, что работа на переменной скорости с частыми остановками приводит к большему повреждению подшипников двигателя, чем работа на постоянной скорости.

Параметры инвертора

Параметры питания определяют частоту и напряжение на нейтрали двигателя. Несущая частота инвертора, частота переключения тиристора и напряжение на шине влияют на напряжение и ток в подшипниках двигателя. Статистические данные о токах в подшипниках, собранные в работе [27] показали, что увеличение несущей частоты инвертора также приводит к увеличению количества разрядов тока в подшипниках и амплитуды тока. Частота переключения инвертора и напряжение на шине постоянного тока инвертора положительно влияют на количество разрядов. В работе [28] также отметили, что увеличение частоты переключения инвертора приводит к увеличению амплитуды тока dv/dt , но оказывает нелинейное влияние на частоту разрядов электроэрозионного устройства. Предполагается, что увеличение частоты переключения может привести к увеличению амплитуды синфазного напряжения и напряжённости электрического поля в масляной плёнке. Кроме того, увеличение частоты сокращает время, необходимое для того, чтобы электрическое поле пробilo масляную плёнку и вызвало разряд.

Чтобы определить влияние типов инверторов на напряжение на валу и ток в подшипниках, исследователи сравнили синфазное напряжение, напряжение на

валу и ток в подшипниках, генерируемые двухуровневыми и трехуровневыми инверторами, и обнаружили, что синфазное напряжение, напряжение на валу и ток в подшипниках, генерируемые трехуровневыми инверторами, меньше, чем у двухуровневых [29]. В работе [30] сравнили амплитуды напряжения на валу и тока в подшипниках ШИМ-преобразователей на основе кремния и карбида кремния и обнаружили, что у преобразователей на основе карбида кремния напряжение на валу и ток в подшипниках выше, чем у преобразователей на основе кремния.

Соединительный кабель

Использование длинных кабельных соединений между преобразователями частоты и двигателем может легко привести к переходному перенапряжению на клеммах двигателя. Исследователи измерили синфазное напряжение двигателей при использовании кабелей трёх типов разной длины. Данные показали, что в кабеле длиной 300 м содержится больше высокочастотных компонентов. По сравнению с неэкранированными кабелями экранированные кабели показали более низкую амплитуду синфазного напряжения, меньшие пики тока в подшипниках и подавление части формы волны синфазного напряжения [31]. Другие исследователи измерили влияние экранирования кабеля на токи вызывающие электроэрозионные дефекты, высокочастотные циркулирующие токи и токи заземления ротора и обнаружили, что использование экранированных кабелей влияет только на высокочастотные циркулирующие токи в крупных двигателях. Из-за явления отражения напряжения в длинном кабеле и асимметрии длинного кабеля на подшипники двигателя может подаваться более высокое напряжение, что повышает риск повреждения подшипников током [32].

Заключение

Механизм возникновения тока в подшипниках и процесс повреждения подшипников током в настоящее время активно исследуется. Поскольку подшипники являются важной частью электродвигателей, прогнозирование срока их службы при воздействии тока по-прежнему является необходимым направлением исследований в этой области, и вышеупомянутые проблемы будут постепенно решаться. Таким образом, целью данной статьи является краткое описание подшипниковых токов. Содержание этой статьи поможет исследователям быстро разобраться в актуальных проблемах и задачах текущих исследований.

Библиографический список

1. Son, D.W.; Zhang, T.; Lee, G. Study on Electrical Pitting Prevention Device of a Rotating Shaft Using Automatic Control Potential Balancing.
2. Schneider, V.; Behrendt, C.; Höltje, P.; Cornel, D.; Becker-Dombrowsky, F.M.; Puchtler, S.; Gutiérrez Guzmán, F.; Ponick, B.; Jacobs, G.; Kirchner, E. Electrical Bearing Damage, A Problem in the Nano- and Macro-Range.
3. Chen, S.; Lipo, T.A.; Fitzgerald, D. Source of induction motor bearing currents caused by PWM inverters.

4. Park, J.-K.; Wellawatta, T.R.; Ullah, Z.; Hur, J. New equivalent circuit of the IPM-type BLDC motor for calculation of shaft voltage by considering electric and magnetic fields.
5. Lin, C.-M.; Chiou, Y.-C.; Lee, R.-T. Effect of MoS₂ additive on electrical pitting mechanism of lubricated surface for Babbitt alloy/bearing steel pair under ac electric field.
6. Prashad, H. Theoretical and experimental investigations on the pitch and width of corrugations on the surfaces of ball bearings.
7. Kudelina, K.; Vaimann, T.; Rassolkin, A.; Kallaste, A.; Asad, B.; Demidova, G. Induction Motor Bearing Currents—Causes and Damages.
8. Erdman, J.M.; Kerkman, R.J.; Schlegel, D.W.; Skibinski, G.L. Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages.
9. Xie, G.; Luo, J.; Guo, D.; Liu, S.; Li, G. Damages on the lubricated surfaces in bearings under the influence of weak electrical currents.
10. Noguchi, S.; Korenaga, A.; Kanada, T. Occurrence Condition of Electric Current Density in Electrical Pitting.
11. Safdarzadeh, O.; Weicker, M.; Binder, A. Steady-state Thermal Analysis of the Contact in Bearings Exposed to Electrical Currents.
12. Schuster, M.; Masendorf, D.; Binder, A. Two PMSMs and the influence of their geometry on common-mode bearing currents.
13. Peng, B.; Wang, X.; Zhao, W.; Ren, J. Study on Shaft Voltage in Fractional Slot Permanent Magnet Machine With Different Pole and Slot Number Combinations.
14. Han, P.; Zhang, Y.; Kesgin, M.G.; Heins, G.; Patterson, D.; Thiele, M.; Ionel, D.M. On the Modeling of Bearing Voltage and Current in PWM Converter-fed Electric Machines Using Electromagnetic Finite Element Analysis.
15. Muetze, A.; De Gersem, H.; Weiland, T. Influence of teeth and cooling ducts on the high-frequency common mode flux of inverter-fed ac machines.
16. Jagenbrein, A.; Buschbeck, F.; Gröschl, M.; Preisinger, G. Investigation of the physical mechanisms in rolling bearings during the passage of electric current.
17. Prashad, H. The effects of current leakage on electroadhesion forces in rolling friction and magnetic flux density distribution on the surface of rolling element bearings.
18. Tischmacher, H.; Gattermann, S. Investigations on bearing currents in converter-fed electrical motors.
19. Zheng, J.; Xiang, D.; Li, H.; Quach, D.-C. An Investigation into the Effect of Bearing Grease Degradation on the High-frequency dv/dt Bearing Current in an Inverter-fed Motor System.
20. Bhattacharya, S.; Resta, L.; Divan, D.M.; Novotny, D.W.; Lipo, T.A. Experimental comparison of motor bearing currents with PWM hard and soft switched voltage source inverters.
21. Khan, K.; Gyllensten, F. Experimental investigation of bearing currents in low voltage motors.

22. Lin, C.-M.; Chiou, Y.-C.; Lee, R.-T. Effect of MoS₂ additive on electrical pitting mechanism of lubricated surface for Babbitt alloy/bearing steel pair under ac electric field.
23. Noguchi, S.; Fukuda, E.; Kanada, T. Effect of Oil Film Parameter on Vibration Acceleration and Electrical Pitting of Small Ball Bearing.
24. Magdun, O.; Gemeinder, Y.; Binder, A. Investigation of influence of bearing load and bearing temperature on EDM bearing currents.
25. Chen, S.; Lipo, T.A.; Fitzgerald, D. Modeling of motor bearing currents in PWM inverter drives.
26. Tischmacher, H.; Gattermann, S. Bearing currents in converter operation.
27. Smolenski, R.; Kempski, A.; Bojarski, J. Statistical approach to discharge bearing currents.
28. Xu, Y.; Liang, Y.; Yuan, X.; Wu, X.; Li, Y. Experimental Assessment of High Frequency Bearing Currents in an Induction Motor Driven by a SiC Inverter. *IEEE Access*.
29. Reddy, S.; Basavaraja, B. Simulation and analysis of common mode voltage, bearing voltage and bearing current in two-level and three-level PWM inverter fed induction motor drive with long cable.
30. Collin, R.; Yokochi, A.; Jouanne, A.V. Novel Characterization of Si- and SiC-based PWM Inverter Bearing Currents Using Probability Density Functions.
31. Weicker, M.; Binder, A. Review on system parameters in variable speed AC-induction motor drives with parasitic electric bearing currents.
32. Mütze, A.; Binder, A. Experimental evaluation of mitigation techniques for bearing currents in inverter-supplied drive-systems-investigations on induction motors up to 500 kW.

УДК 629.4.057:004.8

Применение методов искусственного интеллекта для комплексного технического диагностирования тяговых электродвигателей

Щепин Д.И., Фархутдинов Р.И.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Данная статья посвящена анализу актуальных научных методик, использующих искусственный интеллект (ИИ) для диагностики тяговых электрических двигателей (ТЭД) в железнодорожном транспорте и городском электрическом транспорте. Исследуются структуры машинного обучения и глубокого обучения, включая рекуррентные и свёрточные нейронные сети, композитные алгоритмы, нечеткие логические системы и комбинированные модели. Отдельное внимание уделяется обработке многообразных данных, таких как вибрации, электрические параметры и тепловые показатели, для повышения точности обнаружения неисправностей и предсказания остаточного ресурса. Представлены практические результаты применения решений на

основе ИИ в реальных условиях эксплуатации на примерах транспортных сетей Европы, Северной Америки и России. Доказано, что применение технологий ИИ позволяет уменьшить количество внеплановых поломок на 30–40%, увеличить точность диагностирования до 95% и снизить расходы на техническое обслуживание. Все заключения подкреплены ссылками на проверенные научные публикации, представленные в базах данных Scopus, Web of Science и РИНЦ.

Тяговые электрические двигатели (ТЭД) являются ключевым компонентом в работе транспортных средств, и их поломки приводят к серьезным финансовым убыткам, сбоям в графике движения и создают риски для безопасности пассажиров. Стандартные методы диагностики – такие, как изучение спектра тока, контроль вибраций и тепловизионная диагностика – показывают недостаточную результативность при изменчивых нагрузках и сложных условиях эксплуатации [1]. В последнее время отмечается активное использование технологий искусственного интеллекта (ИИ), которые могут самостоятельно обнаруживать закономерности в больших объемах информации, определять типы неисправностей и предсказывать развитие повреждений. В настоящей статье проводится обзор современных ИИ-методов диагностики ТЭД, основанный исключительно на статьях из международных баз Scopus и Web of Science, а также российских источников из РИНЦ, с акцентом на наиболее результативных решениях и многообещающих направлениях будущих исследований.

Стандартные методы диагностики, включая Motor Current Signature Analysis (MCSA) и анализ вибрации, подробно исследованы в ряде работ:

- в научной статье “Thomson & Fenger” (2001) показано, что MCSA эффективен для обнаружения эксцентриситета ротора и обрывов стержней, однако его чувствительность падает при нестабильной нагрузке [1].

- в работе “Randall & Antoni” (2011) отмечено, что вибрационная диагностика требует высокой квалификации персонала и плохо адаптируется к нестационарным условиям [2].

Подобные методы часто опираются на эмпирические пороги и статистические модели, что делает их малоприменимыми для автоматизированных систем, функционирующих в реальном времени.

При анализе спектральных представлений сигналов сверточные нейросети (CNN) показали себя весьма эффективным инструментом. В работе Saputro и коллег (2022) применение CNN для идентификации дефектов подшипников, основываясь на спектрограммах вибрации, привело к точности в 97,3% при использовании реальных данных, полученных с локомотивов [3].

В задачах прогнозирования отказов на основе временных рядов особенно полезными оказались рекуррентные архитектуры, такие как LSTM и GRU. Тома с соавторами (2021) использовали LSTM для анализа сигналов тока и смогли предсказать повреждение изоляции обмоток с вероятностью 94,1% за 48 часов до наступления события [4]

Алгоритмы, такие как XGBoost и Random Forest, активно используются для решения задач классификации и регрессии. Garcia и коллеги (2020) применили XGBoost для оценки степени износа щеток, опираясь на температурные и электрические параметры, достигнув средней абсолютной ошибки прогноза в 8,7% [5].

Гибридные архитектуры, сочетающие методы искусственного интеллекта с элементами нечеткой логики, способствуют повышению надежности диагностирования в условиях неопределенности. Zaidi и соавторы (2019) разработали систему на базе ANFIS для диагностики эксцентриситета ротора, которая продемонстрировала устойчивость к шумам и адаптацию к изменению нагрузки [6].

Для более полного и всестороннего анализа требуется интеграция данных, поступающих с различных датчиков. Vachir с коллегами (2023) предложили гибридную модель, использующую трансформеры и CNN, для комплексного анализа вибрации, тока и температуры, достигнув F1-меры 0,96, что на 12% превосходит результаты одноисточниковых методов [7].

Прогнозирование остаточного срока службы (RUL) является ключевой составляющей стратегий прогностического обслуживания. Sikorska и соавторы (2021) применили ансамбли глубоких моделей для оценки RUL, опираясь на признаки деградации, и добились среднеквадратичной ошибки, не превышающей 5% от фактического срока службы [8].

Ниже будут приведены практические примеры внедрения ИИ:

-Европа;

Siemens Mobility внедрила Railigent, платформу, анализирующую в реальном времени данные тяговых электродвигателей (ТЭД) при помощи алгоритмов машинного обучения. Как показало исследование Schmid & Weidemann (2022), благодаря этому удалось на 35% сократить число незапланированных ремонтов и на 18% увеличить период между ними [9].

-Северная Америка:

В метрополитене Торонто (Канада) Bombardier Transportation (теперь Alstom) внедрила систему для диагностики ТЭД, использующую LSTM-сети и Random Forest. Согласно Khan et al. (2020), точность выявления формирующихся дефектов достигла 92%, что позволило уменьшить время простоя на 40% [10].

-Россия:

В РЖД с 2022 года проводится тестирование системы диагностики ТЭД на основе нейронных сетей, разработанной в рамках проекта "Цифровой двойник локомотива". По информации Иванова и Петрова (2023), система обеспечивает снижение числа отказов на 25% благодаря своевременному обнаружению аномалий в характеристиках тока [11]. Кроме того, в исследовании Смирнова (2021) изучено применение нечетких систем для диагностики ТЭД в условиях арктического климата, где стандартные методы показывают существенные отклонения из-за низких температур [12].

Таблица 1. Сравнительная таблица основных методов искусственного интеллекта по ключевым эксплуатационным и техническим параметрам.

Выводы этой таблицы основаны на анализе ряда научных публикаций [3] [4] [5] [6] [7] [8].

МЕТОД ИИ	ТОЧНОСТЬ (%)	СКОРОСТЬ ОБУЧЕНИЯ/ВЫВОДА	ИНТЕРПРИТИРУЕМОСТЬ	ТРЕБОВАНИЯ К ДАННЫМ	ПРИМЕНИМОСТЬ В РЕАЛЬНОСТИ
CNN	95-98	Средняя / Высокая	Низкая	Большие объемы, изображения	Да
LSTM / GRU	92-96	Низкая / Средняя	Низкая	Длинные временные ряды	Да
XGBoost / Random Forest	88-94	Высокая / Очень высокая	Средняя	Табличные данные	Да
ANFIS (нечеткая логика)	85-92	Средняя / Высокая	Высокая	Нечеткие, "шумные" данные	Да
Гибриды (CNN + трансформер)	96-98	Низкая / Средняя	Очень низкая	Мультимодальные данные	С ограничениями
Deep Ensembles (RUL)	90-95	Низкая	Низкая	Деграционные признаки	Нет (только для прогнозирования)

Изучение и сопоставление различных алгоритмов искусственного интеллекта выявляет отсутствие единого универсального инструмента для диагностики тяговых электродвигателей. Оптимальный выбор определяется поставленными задачами, природой входных данных и условиями эксплуатации. Свёрточные нейросети превосходят другие методы в анализе визуальных представлений сигналов, например, спектрограмм. Рекуррентные сети лучше всего подходят для обработки последовательных данных и решения прогностических задач. Деревья решений и их ансамбли характеризуются высокой скоростью обработки информации и понятностью, что делает их привлекательными для использования в промышленности. Нечёткие системы демонстрируют надёжную работу в условиях неполной или противоречивой информации. Гибридные модели, несмотря на их сложность, являются необходимым решением при анализе данных, полученных из разных источников. Ансамбли глубоких моделей обеспечивают наиболее точную оценку оставшегося ресурса оборудования, хотя и требуют значительных вычислительных ресурсов. Таким образом, для достижения оптимальных результатов необходимо использовать гибкий, комплексный подход, при котором выбор метода определяется

спецификой задачи, доступными ресурсами и приоритетами, такими как скорость, точность или прозрачность алгоритма.

Применение алгоритмов искусственного интеллекта в диагностике тяговых электродвигателей подтверждает свою эффективность как с технической, так и с экономической точек зрения. Наиболее перспективными направлениями следует считать:

- использование архитектур глубокого обучения для анализа мультимодальных данных [3] [4] [7];
- разработку гибридных систем, сочетающих ИИ с элементами нечёткой логики, для повышения устойчивости к шуму [6] [12];
- применение ансамблевых моделей для точного прогнозирования оставшегося срока службы [8].

Основными проблемами остаются:

- отсутствие единых стандартов форматов и метрик данных;
- сложность интерпретации решений «чёрных ящиков»;
- необходимость интеграции ИИ-решений в промышленные системы управления.

Перспективным направлением будущих исследований является создание цифровых двойников ТЭД, способных в режиме реального времени моделировать техническое состояние и формировать рекомендации по обслуживанию — как в зарубежных [9] [10], так и в отечественных проектах [11].

Библиографический список

1. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults // semanticscholar URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Current-signature-analysis-to-detect-induction-Thomson-Fenger/6191d964aefa238304239425c4207f7c4762293d> (дата обращения: 22.09.25).
2. Rolling element bearing diagnostics—A tutorial // academia URL: https://www.academia.edu/22014000/Rolling_element_bearing_diagnostics_A_tutorial (дата обращения: 22.09.25).
3. Fault Diagnosis of Motor Bearing Based on Current Bi-Spectrum and Convolutional Neural Network // researchgate URL: https://www.researchgate.net/publication/371893433_Fault_Diagnosis_of_Motor_Bearing_Based_on_Current_Bi-Spectrum_and_Convolutional_Neural_Network (дата обращения: 22.09.25).
4. Early Fault Detection in Traction Motors Using LSTM Networks and Electrical Signature Analysis // researchgate URL: https://www.researchgate.net/publication/345053643_Early_Fault_Detection_in_Traction_Motors_Using_LSTM_Networks_and_Electrical_Signature_Analysis (дата обращения: 22.09.25).
5. Condition monitoring of traction motors in railway applications using machine learning techniques // sciencedirect URL:

6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197619307607> (дата обращения: 22.09.25).
7. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Fault Diagnosis of Traction Motors under Variable Load Conditions // springer URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00521-018-3650-2> (дата обращения: 22.09.25).
8. A transformer-CNN hybrid model for multimodal fault diagnosis of railway traction motors // sciencedirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022007585> (дата обращения: 22.09.25).
9. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry // sciencedirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327020307513> (дата обращения: 22.09.25).
10. AI-based predictive maintenance in railway systems: The Siemens Railigent case // sciencedirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210970622000315> (дата обращения: 22.09.25).
11. Machine learning based predictive maintenance of traction motors in urban transit systems // sciencedirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X20305388> (дата обращения: 22.09.25).
12. Применение нейросетевых моделей для диагностики тяговых двигателей в системе цифрового двойника локомотива // elibrary URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=51238945> (дата обращения: 22.09.25).
13. Нечёткие системы диагностики тяговых электродвигателей в условиях низких температур // transsib URL: <https://transsib.jrsmu.ru/archive/2021/4/008/> (дата обращения: 22.09.25).
14. AI-based predictive maintenance system for traction motors in high-speed trains: Field implementation and performance evaluation // sciencedirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197622006789> (дата обращения: 22.09.25).
15. Real-time fault diagnosis in traction motors of metro trains using deep learning and support vector machines // sciencedirect URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S156849462100562X> (дата обращения: 22.09.25).
16. Машинное обучение в задачах диагностики электрических машин железнодорожного транспорта // elibrary URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48012345> (дата обращения: 22.09.25).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-
ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
**СЕКЦИЯ III. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

УДК 620.9:004.7

**Цифровая трансформация и низкоуглеродный переход
в электроэнергетике и транспортном секторе: вызовы и перспективы
для Казахстана**

Батталханов А.З.

АО «КазАТУ им С. Сейфуллина»

Аннотация. В статье рассмотрены ключевые векторы цифровизации электроэнергетики и декарбонизации транспортного сектора в контексте глобального энергоперехода. Выявлены основные этапы технологической эволюции в электроэнергетике (от аналоговой эры к эре цифровизации), систематизированы элементы интеллектуальной энергосистемы (Smart Grid) в условиях Казахстана. Особое внимание уделено анализу альтернативных видов моторного топлива, в первую очередь компримированного природного газа (КПГ) и электротранспорта, а также перспективным транспортным системам (магнитная левитация, гиперлуп). Определены основные институциональные, технологические и кадровые барьеры на пути цифровой трансформации. Обоснована необходимость системного подхода, сочетающего развитие цифровой инфраструктуры, модернизацию нормативно-правовой базы и подготовку квалифицированных кадров для успешной интеграции в новую технологическую парадигму.

Введение

Современный этап развития мировой экономики характеризуется наложением двух мегатрендов: ускоренной цифровизации всех отраслей и глубокой декарбонизации, инициированной необходимостью противодействия климатическим изменениям. Электроэнергетика, являясь основой технологического уклада, подвергается двойному воздействию этих процессов. С одной стороны, она сама становится объектом цифровой трансформации, с другой — должна обеспечить экологически чистым энергоносителем растущий спрос со стороны транспорта, переходящего на низкоуглеродные рельсы. Эти задачи носят системный характер и требуют учета взаимовлияния технологических, экономических и регуляторных факторов, особенно для стран с ресурсно-ориентированной экономикой, таких как Казахстан. Целью данного исследования является комплексный анализ взаимосвязи цифровизации электроэнергетики и перехода к низкоуглеродному транспорту, а также оценка готовности и проблем на пути реализации этой трансформации в условиях Республики Казахстан.

1. Эволюция и цифровая трансформация электроэнергетики: от аналоговых систем к Smart Grid

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Развитие электроэнергетики напрямую коррелирует с прогрессом в области измерений и вычислительной техники. Можно выделить четыре ключевых этапа:

1. Аналоговая эра. Основу составляли электромеханические приборы учета и регистрации (самописцы). Ключевой фигурой был электромонтер.

2. Цифровая эра. Широкое внедрение цифровых контроллеров и микропроцессорных устройств защиты. Центральная роль перешла к инженеру-электрику.

3. Информационная эра (Индустрия 3.0). Распространение SCADA-систем и АСУ ТП, дистанционный сбор данных. Доминирующее значение приобрели IT-специалисты.

4. Эра цифровизации (Индустрия 4.0). Формирование единого киберфизического пространства с полной наблюдаемостью и управляемостью в реальном времени на основе облачных сервисов, больших данных и интернета вещей (IoT). На первый план выходит главный энергетик или инженер-электрик, использующий интуитивные цифровые интерфейсы.

Квинтэссенцией цифровой трансформации в отрасли является концепция интеллектуальной энергосистемы (Smart Grid). Для Казахстана она представляет собой стратегическую цель, направленную на создание саморегулирующейся, высоконадежной и экономически эффективной системы, интегрирующей всех участников рынка — от генерации до конечного потребителя. Внедрение международных стандартов, в частности МЭК 61850 для цифровых подстанций, является технологическим фундаментом этого процесса. Внедрение интеллектуальных сетей позволит решить ряд актуальных проблем, таких как высокие потери в распределительных сетях (до 18,6%), недостаточный уровень автоматизации и низкая вовлеченность потребителей в управление спросом.

2. Низкоуглеродный транспорт как вызов и драйвер для энергетики

Транспортный сектор, будучи одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов, стоит перед необходимостью кардинальной трансформации. В краткосрочной и среднесрочной перспективе наиболее реалистичным решением для Казахстана видится масштабная газификация автотранспорта на основе сжатого природного газа (КПГ).

Преимущества КПГ: Значительное снижение выбросов вредных веществ (СО — в 5 раз, углеводородов — в 2 раза) по сравнению с бензином, соответствие стандарту Евро-5, экономическая выгода для потребителей (дешевле бензина на 30-50%). Наличие значительных запасов природного газа в стране (около 3,3 трлн м³) создает сырьевую базу.

Ограничения: Недостаточно развитая сеть АГНКС, сохраняющиеся мифы о безопасности (хотя метан легче воздуха и безопаснее бензина) и потере мощности двигателя (не более 10%).

В долгосрочной перспективе магистральным путем является электрификация транспорта. Однако ее успех напрямую зависит от способности модернизированной цифровой энергосистемы принять массовый спрос на

зарядную инфраструктуру, обеспечить балансировку нагрузок и гарантировать «чистоту» генерации. Перспективными, но технологически сложными направлениями являются водородный транспорт и принципиально новые системы, такие как транспорт на магнитной левитации (гиперлуп), способные в будущем переопределить логистические модели.

3. Проблемы и барьеры на пути цифровизации и энергоперехода в Казахстане

Несмотря на наличие программных документов («Цифровой Казахстан», Концепция Smart Grid), реализация намеченных планов сталкивается с комплексом проблем:

Экономические и регуляторные: Отсутствие четких рыночных сигналов и экономических стимулов для внедрения инноваций, неэффективная система тарифообразования, перекрестное субсидирование.

Инфраструктурные и технологические: Физический и моральный износ сетевого хозяйства, недостаточная развитость телекоммуникационной инфраструктуры, высокая стоимость передового оборудования.

Кадровые: Дефицит специалистов с гибридной квалификацией, сочетающей глубокие отраслевые знания и компетенции в области IT и цифровых технологий.

Институциональные: Фрагментарность регулирования, недостаточная координация между участниками процесса, риски формального подхода к реализации цифровых проектов без понимания их сути.

Заключение

Цифровизация энергетики и переход к низкоуглеродному транспорту представляют собой две стороны одной медали — глобального технологического и экономического перехода. Для Казахстана этот процесс является не только вынужденной мерой, но и шансом на диверсификацию экономики и технологическую модернизацию. Успех будет зависеть от способности преодолеть узковедомственные и отраслевые барьеры, выработав целостную государственную политику, которая:

Создаст благоприятные регуляторные и экономические условия для инвестиций в «умные» сети и чистый транспорт.

Стимулирует развитие отечественных компетенций и кооперацию с ведущими технологическими партнерами.

Обеспечит системную подготовку и переподготовку кадров для работы в условиях новой технологической парадигмы.

Только на основе системного, сценарного подхода, учитывающего взаимосвязь всех элементов этой сложной системы, Казахстан сможет осуществить энергетический переход, укрепляя при этом свою энергетическую безопасность и конкурентоспособность в долгосрочной перспективе.

Библиографический список

1. Соболев, М. С. Перспективы развития энергетики в России и в мире / М. С. Соболев, А. В. Быкова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 15 (149). — С. 467–470.

2. Государственная программа «Цифровой Казахстан»: утв. Постановлением Правительства Республики Казахстан от 12 декабря 2017 года № 827.

3. Концепция интеллектуальной энергосистемы (Smart Grid) в Казахстане. — Астана: Министерство энергетики РК, 2023.

4. Доклад первого заместителя Министра энергетики Российской Федерации А.Л. Текслер «Цифровизация энергетики». — Пермь, 2019.

5. Мусин, Б. О ходе реализации цифровизации в Республике Казахстан [Электронный ресурс] // Министерство цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности РК. — URL: (дата обращения: 25.09.2024).

УДК 620.9:504.75

Низкоуглеродная энергетика: исторический контекст, современные парадоксы и системные вызовы

Батталханов А.З.

АО «КазАТУ им. С. Сейфуллина»

Аннотация. Статья представляет собой критический анализ глобального тренда на декарбонизацию в контексте исторического развития антропогенной энергетики. Рассматривается эволюция энергетических укладов — от освоения огня до современной «зеленой» повестки. Автор ставит под сомнение сведение проблемы климатических изменений исключительно к замене ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Выявляются системные противоречия: между декларируемыми целями Парижского соглашения и их реализацией, между технологическим оптимизмом и социально-экономическими реалиями развивающихся стран, между фокусом на генерации и недооценкой потенциала энергоэффективности. На основе анализа ключевых низкоуглеродных технологий (атомная, ветровая, солнечная, водородная энергетика) и их скрытых экологических издержек формулируется тезис о необходимости комплексного подхода, выходящего за рамки простой замены энергоносителей. Делается вывод, что успех энергоперехода зависит не столько от скорости внедрения НУЭ, сколько от глубинных изменений в модели потребления, управления ресурсами и достижения глобальной социальной справедливости.

Введение

Глобальный тренд на низкоуглеродную энергетику (НУЭ) сегодня воспринимается как императив, движимый необходимостью противодействия климатическим изменениям. Однако за фасадом технологического оптимизма и политических деклараций скрывается комплекс исторических, экономических и социальных парадоксов. Цель данной статьи — не просто описать технологии НУЭ, а подвергнуть рефлексии саму логику энергетического перехода, поставив его в контекст тысячелетней эволюции антропогенной энергетики.

Является ли НУЭ единственным и достаточным ответом на экологический кризис, или это лишь часть более масштабной трансформации, затрагивающей основы общества потребления? Данная работа — попытка структурировать эти сомнения и предложить взгляд на проблему как на системный вызов, требующий выхода за узкоотраслевые рамки.

1. Энергетика в истории человечества: от Прометея до парникового эффекта

Исторический анализ показывает, что каждый энергетический переход сопровождался не только технологическим скачком, но и социальными потрясениями, а также возникновением новых экологических проблем, замещавших старые. Освоение огня, приручение животных, промышленные революции на основе угля, нефти и газа — каждый этап кардинально менял уклад жизни, решая одни проблемы и порождая другие. Примечательно, что ни один из источников энергии не исчезал полностью с появлением нового; система стремилась к диверсификации, а не к тотальному замещению. Современная критика углеводородов повторяет исторические паттерны: когда-то аналогичные обвинения звучали в адрес конного транспорта, угля и т.д. Это указывает на то, что проблема лежит глубже — в постоянно растущем абсолютном энергопотреблении человечества, связанном с демографическим ростом и экономической моделью, основанной на бесконечной экспансии.

2. Климатическая повестка: от Киото до Парижа и дилеммы справедливости
Формальной точкой отсчета современной эпохи НУЭ стали международные соглашения: Киотский протокол и Парижское соглашение. Если Киотский протокол с его рыночными механизмами (торговля квотами) фактически создал новый финансовый инструмент, то Парижское соглашение сместило акцент на национальные определяемые вклады (NDC) и цель по удержанию потепления в пределах 1,5–2 °С. Однако в основе этих документов лежат фундаментальные противоречия: между обязательствами развитых и развивающихся стран, между амбициозными целями и отсутствием действенных механизмов принуждения, между глобальным характером проблемы и национальными экономическими интересами. Концепция «справедливого перехода», признающая социальные издержки декарбонизации, на практике часто игнорируется, что порождает сопротивление в регионах, зависимых от традиционной энергетики (например, шахтерские регионы Польши). Это ставит под вопрос реализуемость климатических целей без коренного пересмотра принципов глобальной кооперации и распределения затрат.

3. Технологии НУЭ: между надеждой и скрытыми издержками
Низкоуглеродная энергетика ассоциируется, прежде всего, с возобновляемыми источниками (ВИЭ), атомной энергией и, перспективно, с водородом. Однако критический анализ каждой технологии выявляет значительные оговорки:

ВИЭ (солнце, ветер): Несмотря на стремительное удешевление и рост мощностей, они обладают прерывистым характером генерации, требуют создания масштабных систем хранения и модернизации сетей. Их «углеродный след», учитывающий производство панелей, турбин и утилизацию, хоть и мал, но не нулевой.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Атомная энергетика: Обладает высокой плотностью энергии и стабильной генерацией, но несет риски катастроф, не решена проблема долговременного захоронения радиоактивных отходов. Полная стоимость с учетом вывода из эксплуатации и страховых рисков ставит под вопрос ее экономическую привлекательность.

Гидроэнергетика: Часто исключается из «зеленых» программ из-за масштабного воздействия на экосистемы и значительных выбросов метана из водохранилищ.

Водород: «Зеленый» водород, производимый электролизом на ВИЭ, остается крайне дорогим. Его инфраструктура (производство, транспортировка, хранение) находится в зачаточном состоянии. Широкое использование может иметь непредсказуемые последствия, включая потенциальную диссипацию водорода из атмосферы.

Таким образом, не существует «серебряной пули» — идеального источника энергии. Каждая технология НУЭ решает проблему выбросов CO₂, но порождает собственный набор экологических, экономических и социальных вызовов.

4. Забытый приоритет: энергоэффективность и системный подход

Изначальное определение низкоуглеродной экономики ставило энергоэффективность на первое место, лишь затем — развитие ВИЭ. Однако в публичном поле доминирует нарратив о замене источников энергии. Между тем, меры по повышению энергоэффективности в строительстве, промышленности и на транспорте зачастую экономически выгоднее и дают быстрый эффект. Комплексное ресурсосбережение, экономика замкнутого цикла (как в примерах с Японией или советской практикой сбора вторсырья), оптимизация сельского хозяйства и охрана лесов — все это элементы системного ответа на климатический кризис, не сводимого только к энергетике. Узкий фокус на НУЭ рискует превратиться в технологический фетишизм, отвлекающий от более глубоких преобразований модели производства и потребления.

Заключение: НУЭ как часть большой трансформации

Низкоуглеродная энергетика — необходимая, но недостаточная часть ответа на антропогенное изменение климата. Ее развитие должно сопровождаться (а в идеале — предваряться) радикальным повышением энергоэффективности во всех секторах экономики. Исторический опыт учит, что технологические смены укладов неизбежны, но их скорость и последствия определяются социальным контекстом. Успех «энергетического перехода» будет зависеть не от того, насколько быстро мы построим новые солнечные и ветровые электростанции, а от того, сможем ли мы как глобальное сообщество:

Перейти от риторики к справедливому распределению бремени преобразований.

Сместить фокус с экстенсивного наращивания «зеленой» генерации на всеобъемлющее ресурсосбережение.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Принять сложность и многогранность проблемы, отказавшись от поиска простых виноватых (будь то углеводороды или отдельные страны) и простых решений.

Энергетика будущего должна быть не просто низкоуглеродной, но и разумной, эффективной и социально ответственной. Только такой системный подход, учитывающий уроки истории и современные парадоксы, может привести к устойчивому развитию, а не к замене одних проблем другими.

Библиографический список

1. Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата. — Принято 12 декабря 2015 года.
2. Концепция низкоуглеродного развития Республики Казахстан до 2060 года. — Астана, 2021.
3. Программа развития ООН (ПРООН). Отчет о человеческом развитии 2020. — Нью-Йорк, 2020.

УДК 621.31:005.96

Нейросетевая генерация сценариев противоаварийной подготовки персонала электроэнергетических систем

Пашков Р. А.

ФГАОУ ВО «Сибирский Федеральный Университет»

Аннотация. Современные электрические подстанции представляют собой сложные технологические комплексы, на которых используется дорогостоящее оборудование и микропроцессорные системы релейной защиты и автоматики, выход из строя которого влечет за собой большие экономические расходы. Рост сложности оборудования, требует от оперативного персонала не только глубоких профессиональных знаний, но и умения анализировать большие потоки данных в условиях дефицита времени. Накопленный опыт проведения противоаварийных тренировок показывает, что в практике энергетических предприятий имеет место высокий уровень условности тренировочной деятельности и субъективизм в организации текущего контроля и оценке результатов. Это вызвано невозможностью реальных действий на работающем оборудовании и низким уровнем механизации и автоматизации тренировок, связанным с тем, что традиционные методы подготовки, основанные на теоретическом обучении и статических тренажерах, не способны в полной мере имитировать реальные аварийные ситуации, что приводит к недостаточной готовности персонала к нештатным событиям. Особую актуальность проблеме придает человеческий фактор, так как одной из причин возникновения наиболее серьезных аварий на электрооборудовании субъектов электроэнергетики является нарушение в работе оборудования связанное с

ошибочными действиями персонала, обусловленное в том числе недостаточной эффективностью подготовки.

В данной статье рассматривается применение нейросетевых моделей для динамической генерации адаптивных сценариев противоаварийных тренировок, что позволяет преодолеть указанные ограничения.

Архитектура системы генерации сценариев

Разработанная система представляет собой программный комплекс, предназначенный для генерации сценариев противоаварийных тренировок на основе формализованного описания топологии подстанции. Ключевым принципом работы является преобразование структурных данных об электрооборудовании в текстовые сценарии действий персонала с использованием нейросетевых моделей. Упрощенная схема процесса генерации представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Упрощенная схема генерации сценария противоаварийной тренировки

Входные данные системы — это файл в формате JSON, содержащий полное описание схемы электрических соединений подстанции. Файл формируется пользователем в специальном графическом редакторе, в котором содержатся данные и параметры используемого оборудования. Структура файла включает:

- Перечень компонентов: для каждого элемента (трансформатор, выключатель, разъединитель, линия электропередачи) указывается уникальный идентификатор (id), тип и основные параметры (например, для трансформатора — мощность, класс напряжения).
- Матрицу соединений: описывает связи между компонентами, определяя топологию сети (например, "VL1 -> QB1 -> T1").

Процесс обработки начинается с обработки JSON-файла и извлечения семантической информации о подстанции. Далее, на основе этих данных автоматически формируется текстовый запрос (промт) к крупной языковой модели (LLM). Промт строится по шаблону, который включает инструкцию для нейросети (например, «Ты — опытный специалист в электроэнергетике»), извлеченные данные о схеме и требования к формату выходных данных.

Выходные данные системы — это готовый сценарий противоаварийной тренировки, представленный в структурированном текстовом виде. Стандартный формат сценария включает три обязательных раздела:

1. Тип аварии: Формулировка нештатной ситуации.
2. Действия персонала: Последовательный перечень операций для ликвидации аварии.
3. Создание наиболее надежной послеаварийной схемы: Процедуры возврата к нормальной схеме работы.

Выбор и обоснование нейросетевых моделей

Для генерации текстового содержания сценариев был проведен детальный анализ возможностей крупных языковых моделей (LLM). Основной задачей являлось обеспечение корректности, логической последовательности и соответствия сгенерированных текстов нормативной документации. Исследованы и реализованы два принципиально разных подхода к интеграции LLM в систему.

Облачный вариант с использованием API

Данный подход предполагает взаимодействие с нейросетевыми моделями, развернутыми на удаленных серверах, через программный интерфейс (API). В рамках работы использовалось API платформы Hugging Face Inference API.

Принцип работы облачного варианта:

1. Модуль генерации на основе JSON-схемы подстанции формирует текстовый промт (запрос) строго заданной структуры.
2. Сформированный промт упаковывается в HTTP POST-запрос с заголовком авторизации (API-ключ) и отправляется на сервер Hugging Face.
3. Сервер обрабатывает запрос, модель генерирует текст-продолжение, который возвращается в качестве ответа.
4. Модуль генерации получает ответ (сырой текст) и производит его обработку и нормализацию для извлечения структурированного сценария.

Преимуществами данного способа являются:

- Высокая производительность: Отсутствие необходимости развертывания и обслуживания вычислительных ресурсов для работы модели.
- Доступ к различным языковым моделям: Возможность быстрого переключения на более новые и мощные модели по мере их появления.
- Простота интеграции: для взаимодействия требуется лишь сетевая библиотека (например, requests в Python).

Недостатками данного подхода являются:

- Необходимость постоянного подключения к сети интернет: Невозможность работы в изолированных сетях, характерных для объектов КИИ.
- Задержки (latency): Время отклика зависит от загрузки серверов и скорости сетевого соединения.
- Вопросы конфиденциальности: Схемы подстанций могут составлять информацию ограниченного доступа, передача которой на внешние серверы нежелательна.

Локальный вариант с использованием SberGPT

Для устранения недостатков облачного подхода был реализован и признан предпочтительным локальный вариант, основанный на развертывании отечественной языковой модели SberGPT (sberbank-ai/rugpt3small_based_on_gpt2) на собственном вычислительном оборудовании.

Модель SberGPT загружается и развертывается на локальном сервере или рабочей станции, оснащенной графическим процессором.

Взаимодействие с моделью происходит не по сети, а через внутренние вызовы функций (in-process) или локальный API.

Процесс формирования промта идентичен облачному варианту, но запрос направляется не в интернет, а на локальный порт.

Генерация текста происходит полностью автономно, внутри защищенной среды.

Основными преимуществами локальной модели являются:

Полная независимость от внешних сервисов: Работа в полностью изолированных средах (сетях АСУ ТП).

Высокая скорость отклика: Отсутствие сетевых задержек, время генерации зависит только от мощности локального сервера.

Обеспечение информационной безопасности: Конфиденциальные данные (схемы подстанций) не покидают защищенный периметр.

Соответствие политике импортозамещения: Использование отечественного программного продукта (SberGPT).

Недостатками данного подхода являются:

Высокие требования к аппаратному обеспечению: Необходимость наличия мощных графических ускорителей с достаточным объемом видеопамяти.

Затраты на развертывание и поддержку: требуется администрирование локальной инфраструктуры.

Ограниченность модели: локально развернутая модель rugpt3small может уступать в качестве генерации более крупным облачным аналогам.

Учитывая повышенные требования к безопасности и независимости для энергетических компаний, а также стратегию импортозамещения, локальный вариант на базе SberGPT был выбран в качестве основного для данной разработки.

Алгоритм генерации сценария

Ключевым элементом исследования является разработанный многоэтапный алгоритм генерации, представленный на рисунке 2.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ



Рисунок 2 – Алгоритм генерации сценария противоаварийной тренировки

Процесс включает следующие этапы:

1. Plan (Планирование): на основе анализа топологии подстанции LLM формирует краткий план потенциальной аварийной ситуации (например, "Короткое замыкание на шинах 10 кВ").

2. Expand (Детализация): Генерация детального сценария по жесткому шаблону: «1. Тип аварии; 2. Действия персонала; 3. Восстановление».

3. Validate (Проверка корректности): Автоматическая проверка сценария на корректность. Проверяется: соответствие оборудования указанному в схеме, логическая последовательность операций, отсутствие противоречий.

4. Repair (Коррекция): В случае выявления ошибок на этапе валидации, LLM получает уточняющий запрос на их исправление.

5. Rank (Ранжирование): для повышения надежности генерируется несколько вариантов сценария ($k=5$), которые ранжируются по интегральной метрике:

$$S_{\text{total}} = 0.40 \cdot F + 0.35 \cdot S + 0.25 \cdot C,$$

где F — выполнимость (feasibility), S — покрытие мер безопасности (safety), C — структурная полнота (completeness). Для расчета используется экспертные правила и анализ текста.

Для апробации системы была использована схема типовой двухтрансформаторной подстанции 110/10 кВ. На вход системе подавалось JSON-описание, содержащее следующее основное оборудование: две воздушные линии электропередач ВЛ-110 кВ, два силовых трансформатора по 25 МВА, секционированная система шин 10 кВ с секционным выключателем.

В результате работы системы был сгенерирован следующий сценарий противоаварийной тренировки:

Объект: Подстанция 110/10 кВ «Тренировочная»

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Тема тренировки: Действия оперативного персонала при превышении допустимой температуры масла силового трансформатора

Участвующие лица: Оперативный персонал подстанции

Исходное состояние:

Подстанция работает по нормальной схеме.

Трансформатор Т1 находится в работе, трансформатор Т2 – в резерве.

Нагрузка на шинах 10 кВ – 18 МВт.

1. ВВОДНАЯ (Тип аварийной ситуации)

Время 10:00: Сигнализация на АРМ ОП «Превышение температуры Т1».

Время 10:02: в результате осмотра выявлен рост температуры верхних слоев масла Т1 до 95°С при допустимых 85°С.

2. ДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛА (Этап ликвидации аварии)

1. Сообщение первичной информации: немедленно проинформировать диспетчера о возникновении нештатной ситуации.

2. Контроль нагрузки: зафиксировать ток нагрузки трансформатора Т1. Проанализировать график нагрузки. При наличии резерва – запросить у диспетчера снижение нагрузки.

3. Проверка системы охлаждения:

Проверить работу вентиляторов системы охлаждения Т1.

Убедиться в их автоматическом и ручном включении.

4. Включение резервного трансформатора: При отсутствии эффекта от снижения нагрузки и исправной системе охлаждения, подготовить и ввести в работу резервный трансформатор Т2.

5. Отключение аварийного трансформатора Т1:

После проверки нагрузки на трансформаторе Т2 убедиться в нормальной работе сети.

6. Организация ремонта: оформить заявку произвести подготовку рабочего места для допуска ремонтного персонала

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СХЕМЫ

После устранения неисправности трансформатора Т1 и проведения необходимых испытаний:

1. Вывести трансформатор Т2 в ремонт для переключения на основную схему.

2. Ввести в работу трансформатор Т1 по стандартной схеме.

3. Перевести нагрузку на трансформатор Т1.

4. Вывести трансформатор Т2 в резерв.

5. Доложить диспетчеру о восстановлении нормальной схемы работы подстанции.

Сгенерированный сценарий демонстрирует высокую практическую пригодность. Система корректно определила последовательность действий, выделив ключевые этапы.

Особо следует отметить, что сценарий включает не только прямые команды (включить/отключить), но и контрольные действия (фиксация параметров,

проверка оборудования), что соответствует реальной практике и требованиям нормативных документов (ПТЭЭП).

Предложенная система позволяет автоматически формировать детальные, логически завершенные и нормативно выверенные сценарии для подготовки персонала.

Проведенное исследование подтвердило возможность и эффективность применения нейросетевых технологий для автоматизации процесса создания сценариев противоаварийных тренировок оперативного персонала электроэнергетических систем.

Таким образом, разработанная система позволяет перейти от статической, заранее подготовленной библиотеки сценариев к динамической, адаптивной и неограниченной по вариативности генерации учебных материалов. Это существенно повышает качество и реалистичность подготовки оперативного персонала, формируя навыки действий в уникальных нештатных ситуациях.

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП). — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2022. — 272 с.
2. Hugging Face Inference API Documentation. — URL: <https://huggingface.co/docs/api-inference> (дата обращения: 18.09.2025).
3. Model card: HuggingFaceH4/zephyr-7b-beta. — URL: <https://huggingface.co/HuggingFaceH4/zephyr-7b-beta> (дата обращения: 18.09.2025).
4. Model card: rugpt3small_based_on_gpt2. — URL: https://huggingface.co/sberbank-ai/rugpt3small_based_on_gpt2 (дата обращения: 18.09.2025).
5. Дэвис К. Д. Применение искусственного интеллекта и больших данных в управлении энергосистемами / К. Д. Дэвис; пер. с англ. А. В. Петрова. — М.: Техносфера, 2023. — 415 с.

УДК 621.313.1

Цифровая модель статической тиристорной системы самовозбуждения для анализа переходных процессов в энергосистеме

Плодистый Б.А., Гуриков О.В.
АО «НТЦ ЕЭС»

Аннотация. В статье представлены недостатки типовой модели возбудителя статической тиристорной системы самовозбуждения, используемой в отечественной практике для расчета электромеханических переходных процессов в ПВК EUROSTAG и Rustab.

Приводится созданная в ПВК MATLAB Simulink модель возбудителя, лишенная обозначенных недостатков типовой модели. Демонстрируется

подробная созданная модель тиристорного преобразователя, учитывающая режимы работы «2-3», «3», «3-4», режим КЗ, наступающий после опрокидывания моста и режим обратного тока ротора. Приводится упрощенная модель, учитывающая только режим «2-3» для практических расчетов.

Приводятся результаты верификации созданных полной и упрощенной моделей и демонстрируются примеры расчетных сценариев, в которых показывается необходимость применения созданной модели. Показывается допустимость использования упрощенной модели.

В единой энергетической системе России (ЕЭС России) доля генерирующего оборудования, оснащенного системой возбуждения (СВ) типа статическая тиристорная системы параллельного самовозбуждения (СТС) составляет около 70%.

Структурная схема синхронного генератора (СГ), оснащенного СТС и работающего на электроэнергетическую систему (ЭЭС) представлена на рис. 1. В соответствии с данной схемой выпрямительный трансформатор (ВТ) подключается к шинам СГ и питает тиристорный мост (ТМ). ТМ управляется системой импульсно-фазового управления (СИФУ), на вход которой подается сигнал, имеющий смысл желаемого напряжения возбуждения ($U_{АРВ}$), от автоматического регулятора возбуждения сильного действия (АРВ-СД).

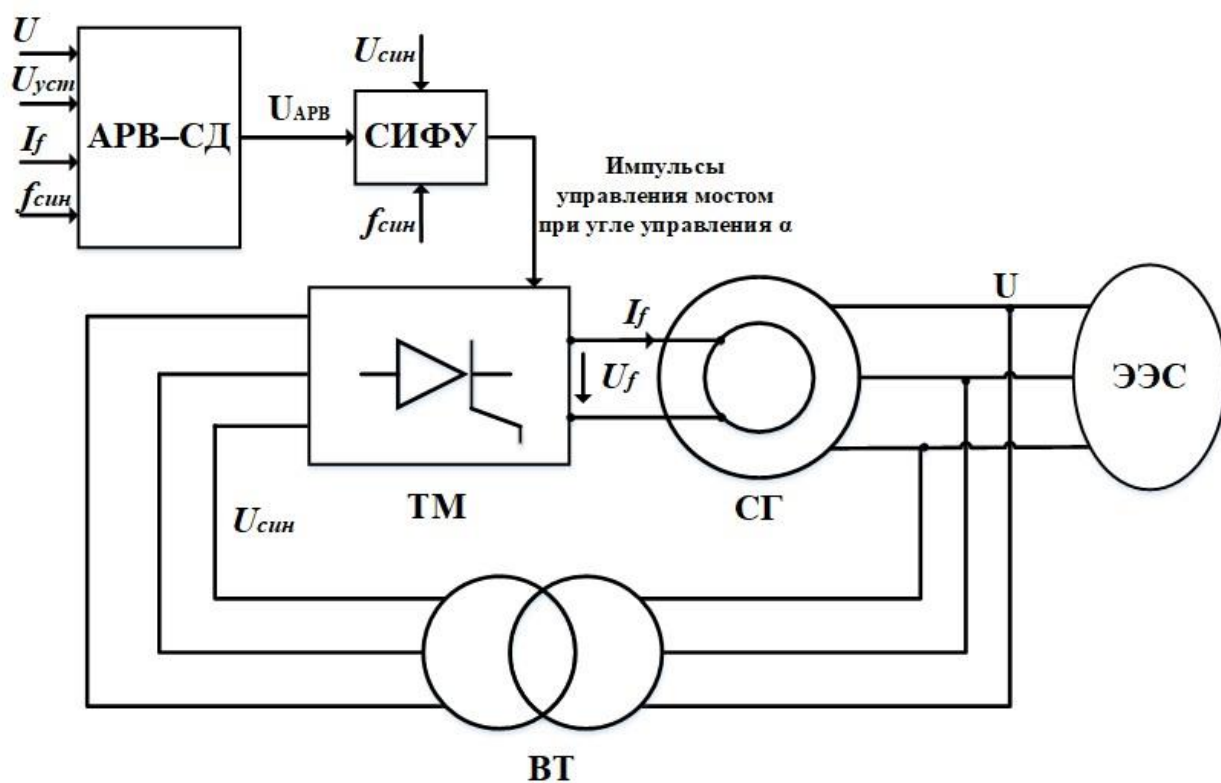


Рисунок 1 – Структурная схема СГ с СВ типа СТС, работающего на ЭЭС

В рамках настоящей статьи тиристорным преобразователем (ТП) будем называть ВТ и ТМ, а возбудителем – ТП и СИФУ.

В отечественной практике расчета электромеханических переходных процессов принята стандартная упрощенная модель возбудителя СТС, которую в дальнейшем, для краткости, назовем моделью «ТΥR» (см. рис. 2).

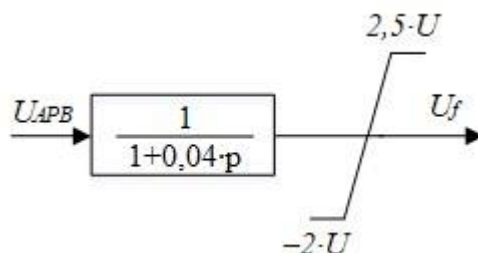


Рисунок 2 – Модель возбудителя СТС «ТΥR»

Ранее уже проводились работы, обосновывающие допустимость применения используемых в практике упрощенных моделей СВ типов СТС, статическая тиристорная система независимого возбуждения (СТН) и типа бесщеточная система возбуждения (БСВ) [1–3]. В последнее время возрос интерес к уточнению моделей и были уточнены модели БСВ [2–3]. Целью настоящей работы является уточнение модели СТС с учетом возможности расчета параметров данной модели из паспортных данных СТС.

Недостатком типовой модели возбудителя «ТΥR» (см. рис. 2) является неучет влияния на напряжение возбуждения U_f следующих факторов:

- текущего напряжения статора СГ U (оно учитывается только в значениях потолков возбуждения $-2U$ и $2,5U$, а также в U_{APB});
- угла управления ТМ α ;
- падения напряжения на ВТ ΔU_{BT} ;
- реальных потолков возбуждения $U_{f_{min}}$, $U_{f_{max}}$;
- параметров моделируемой СТС.

Неучет данных особенностей СТС может привести к получению недостоверных результатов анализа динамической устойчивости. Так, модель «ТΥR» завышает величину U_f при коротком замыкании (КЗ), поскольку она не учитывает падение напряжения на ВТ ΔU_{BT} , что, в свою очередь будет давать более оптимистичные результаты расчета с более высокими величинами U .

Для практических и исследовательских работ были созданы модели СТС, лишенные этих недостатков [4]. Подробная модель для исследовательских работ учитывает такие режимы работы моста, как режимы 2-3, 3 и 3-4, а также режим КЗ, наступающий после опрокидывания моста и режим обратного тока ротора. Числа в названиях режимов означают число вентилях, проводящих ток в данном режиме. Внешняя характеристика ТП является его моделью и представляет собой зависимость среднего значения выпрямленного напряжения ТМ в о.е U_{d*} от среднего значения выпрямленного тока в о.е I_{d*} (см. рис. 3).

Также она учитывает U и отражает ΔU_{BT} при различных значениях α .

Упрощенная созданная модель учитывает лишь режим 2-3. Влияние учета остальных режимов оказалось несущественным для моделирования медленных электромеханических переходных процессов, поскольку они редко наблюдаются и возникают лишь на непродолжительное время.

Полученное математическое описание внешней характеристики для использования в программно-вычислительных комплексах (ПВК) представлено ниже.

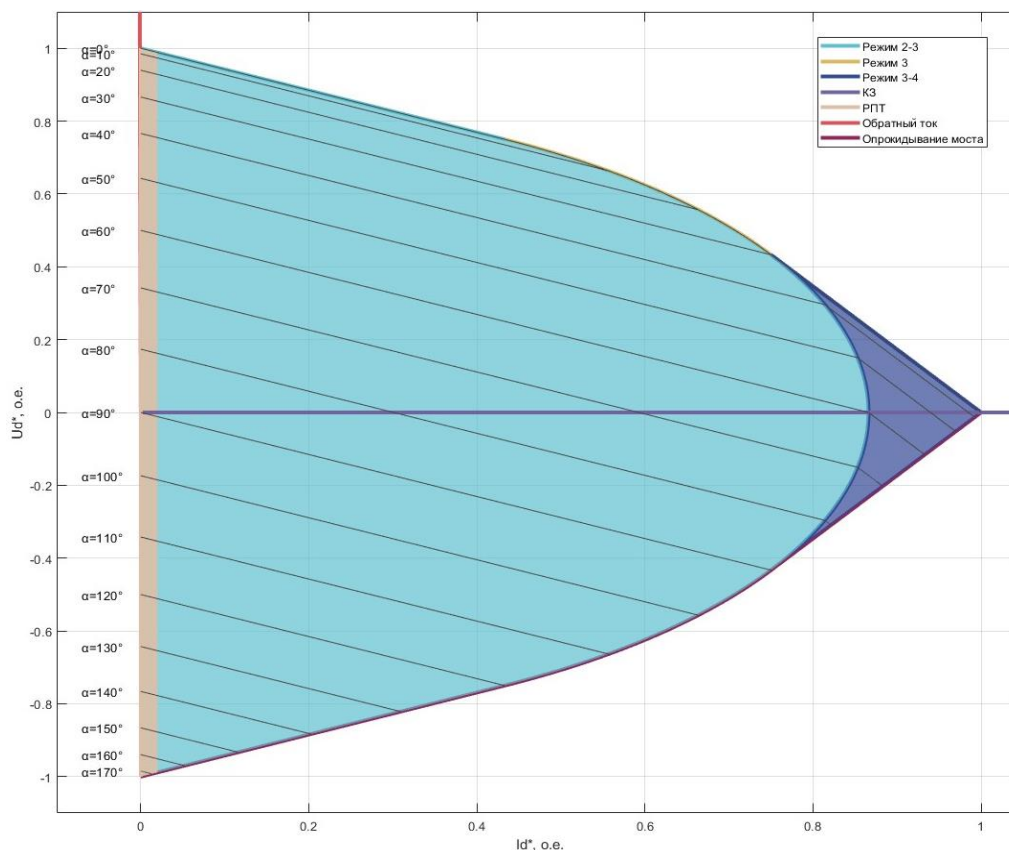


Рисунок 3 – Внешняя характеристика тиристорного преобразователя

Для краткости удобно ввести следующие обозначения:

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}}{2}(1 + \cos \alpha); \quad I_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\alpha - 60^\circ); \quad I_3 = \frac{1 + \cos(\alpha + 30^\circ)}{2};$$

- режим 2-3:

$$U_{d^*} = \cos \alpha - \frac{1}{\sqrt{3}} I_{d^*}, \begin{cases} \alpha \in [0^\circ; 120^\circ], I_{d^*} \in [0; I_2) \\ \alpha \in (120^\circ; 180^\circ), I_{d^*} \in [0; I_1) \end{cases};$$

- режим 3:

$$U_{d^*} = \sqrt{\frac{3}{4} - I_{d^*}^2}, \alpha \in [0; 30^\circ), I_{d^*} \in [I_2; \frac{3}{4});$$

- режим 3-4:

$$U_{d^*} = \sqrt{3}(\cos(\alpha - 30^\circ) - I_{d^*}), \begin{cases} \alpha \in [0^\circ; 30^\circ], I_{d^*} \in [\frac{3}{4}; 1) \\ \alpha \in (30^\circ; 90^\circ), I_{d^*} \in [I_2; I_3) \end{cases};$$

- КЗ моста после опрокидывания моста:

$$U_{d^*} = 0, \alpha \in \begin{cases} \alpha \in [0^\circ; 30^\circ], I_{d^*} \geq 1 \\ \alpha \in (30^\circ; 90^\circ], I_{d^*} \geq I_3 \\ \alpha \in (90^\circ; 120^\circ], I_{d^*} \geq I_2 \\ \alpha \in (120^\circ; 180^\circ], I_{d^*} \geq I_1 \end{cases};$$

- режим обратного тока ротора:

$$U_{d^*} = -I_{d^*} R_{\text{discharger}}, I_{d^*} < 0;$$

Режимы работы ТП удобно представить графически в осях входных параметров модели α и I_{d^*} (см. рис. 4).

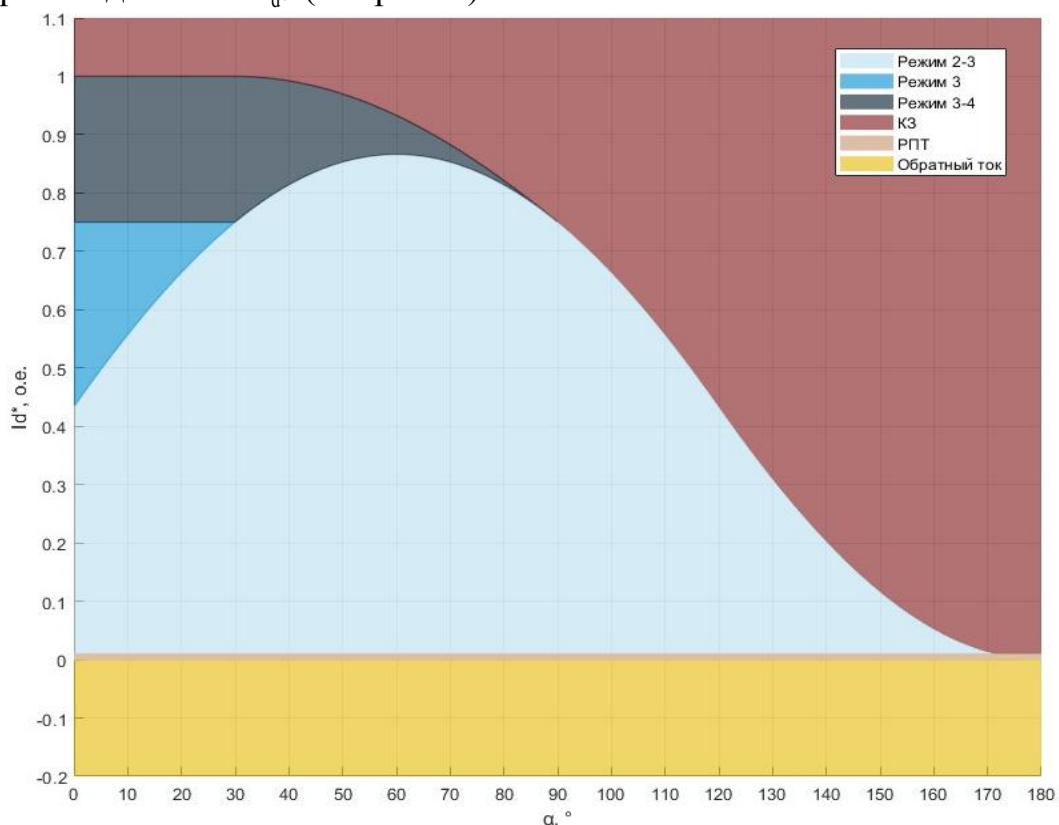


Рисунок 4 – Режимы работы ТП в осях α и I_{d^*}

Реализация упрощённой модели СТС для практических расчётов в ПВК Eurostag [5] представлена на рис. 5.

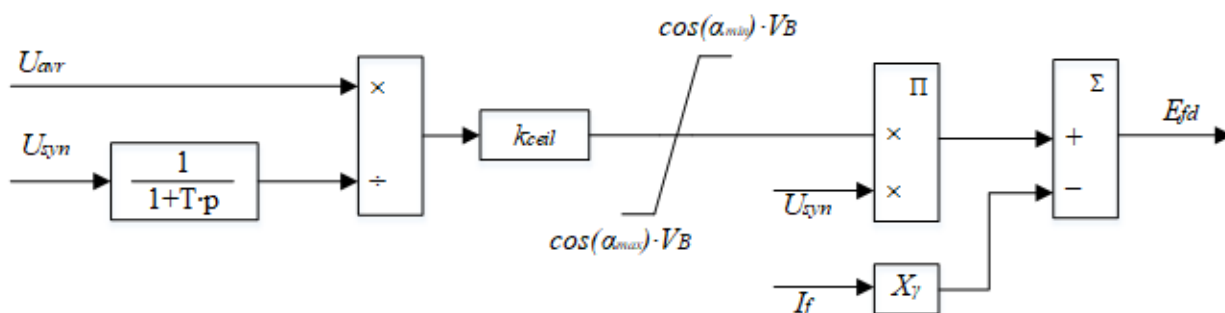


Рисунок 5 – Упрощённая модель СТС для практических расчетов в Eurostag

При отсутствии исходных данных моделируемой СТС можно воспользоваться типовыми значениями параметров (см. таблицу 1).

Таблица 1. Типовые значения параметров СТС

Параметр	Типовое значение
$\alpha_{\min}, ^\circ$	5,4
$\alpha_{\max}, ^\circ$	150
$X_\gamma, \text{о.е.}$	0,055
$V_b, \text{о.е.}$	2,62
$T, \text{с}$	0,02
$k_{\text{ceil}}, \text{о.е.}$	$1 / (1 + X_\gamma)$

При наличии исходных данных моделируемой СТС следует рассчитывать ее параметры согласно представленным ниже выражениям:

$$U_{\text{syn}_{\text{ном}}} = k_{\text{tr}} \cdot U_{\text{gen}_{\text{ном}}}; \quad X_{\text{tr}} = u_{\text{кз}}^{\text{о.е.}} \cdot \frac{u_{\text{тр}}^2}{S_{\text{тр}_{\text{ном}}}}; \quad X_\gamma = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\text{tr}}{U_{\text{ном}} / I_{\text{f}_{\text{ном}}}}$$

$$b = \frac{2,5 + 2 \cdot X_\gamma}{\cos \alpha_{\min}}; \quad U_{\text{d}^*_{\max}} = V_b \cdot \cos \alpha_{\min}; \quad U_{\text{d}^*_{\min}} = V_b \cdot \cos \alpha_{\max};$$

Верификация созданных моделей осуществлялась в MATLAB Simulink посредством сравнения предельных длительностей КЗ и расчетных осциллограмм. За эталонную модель принималась подробная трехфазная модель СТС [4].

Ниже приведены осциллограммы, полученные в ПВК Eurostag, сравнивающие результаты моделирования (см. таблицу 2 и рис. 6) для типовой модели на основе возбудителя «TYR» и созданных моделей. Расчетное возмущение – трехфазное КЗ на одной из отходящих линий Первомайской ТЭЦ-14. Данная электростанция характеризуется «сильной привязкой» к энергосистеме, заключающейся в малой величине эквивалентного внешнего сопротивления и электрической близости целого ряда других электростанций.

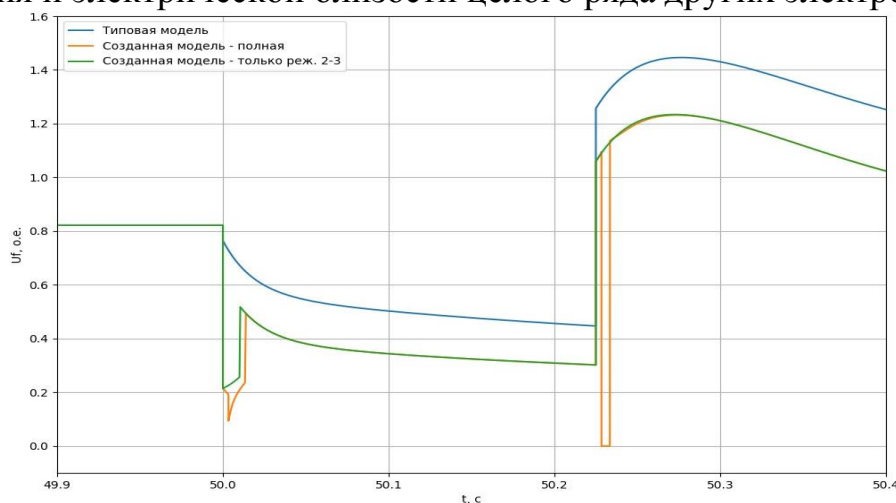


Рисунок 6 – Осциллограммы напряжений на Г-1-1 Первомайской ТЭЦ-14 для различных моделей СТС

Таблица 2. Предельные длительности трехфазного КЗ на одной из отходящих линии Первомайской ТЭЦ-14 для различных моделей СТС

Модель СТС на всех шести генераторах Первомайской ТЭЦ-14	Предельная длительность КЗ, с
Типовая модель с возбудителем «TYR»	0,229
Созданная модель – полная	0,226
Созданная модель – только режим 2-3	0,226

Полученные результаты подтверждают, что используемая в отечественной практике типовая модель СТС с возбудителем «TYR» завышает предельную длительность КЗ на 3 мс или на 1,3%.

Для полной и сокращенной созданных моделей СТС предельные длительности КЗ совпали, а значит для оценки предельной длительности КЗ сокращенной модели с практически допустимой точностью достаточно.

Незначительность учета иных режимов работы моста, кроме режима 2-3, видна по расчетной осциллограмме напряжений возбуждения (см. рис. 6): эти режимы кратковременны.

Отметим необходимость дальнейшего исследования, в том числе при более тяжелых расчетных сценариях и рассмотрения электростанций со «слабой привязкой» к энергосистеме – погрешность определения предельной длительности КЗ в таких условиях может существенно превысить приведенную выше величину 1,3%.

Библиографический список

1. Абу Гаттас Надер Закария. Исследование крутильных колебаний турбоагрегатов в энергосистеме с УПК и мероприятий по их ограничению: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / Абу Гаттас Надер Закария; Ленингр. техн. ун-т – Л., 1990. – 17 с.: ил. – Библиогр.: с. 17
2. Триандофилиди, И. А. Обоснование допустимости применения упрощенной модели бесщёточной системы возбуждения в исследованиях устойчивости ЭЭС: выпускная квалификационная работа магистра; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2020.
3. Филимонов, Н. Ю. Разработка математической модели цифрового автоматического регулятора возбуждения АРВ-РЭМ700 и оптимизация его параметров для Запорожской АЭС: магистерская диссертация / Н. Ю. Филимонов; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2016.
4. Плодистый, Б. А. Цифровая модель статической тиристорной системы параллельного самовозбуждения для анализа переходных процессов в энергосистеме: выпускная квалификационная работа магистра / Б. А. Плодистый; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург, 2025.
5. EUROSTAG. Model editor: руководство пользователя. – URL: <http://www.eurostag.be/> (дата обращения: 12.09.2025).

**Оптимизация микросетей при помощи искусственного интеллекта для
повышения энергоэффективности и экономии средств в Бангладеш**

Рахман Мд. Нафиз

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. В ходе данного исследования была проанализирована максимально возможная производительность и финансовая целесообразность использования стандартных гибридных микросетевых систем (солнечные батареи мощностью 100 кВт, аккумуляторная батарея мощностью 200 кВт-ч, дизельный генератор мощностью 80 кВт) в четырех различных географических точках Бангладеш: прибрежная зона, район водоемов, холмистая местность и на острове. Был проведен сравнительный анализ трех методов оптимизации: метода на основе правил, линейного программирования и генетического алгоритма. Согласно результатам, у всех трех методов практически равные ежедневные топливные и эксплуатационные расходы во всех исследованных местностях. В холмистой местности максимальная эффективность системы и энергообеспеченность составили 100%, демонстрируя отличные технические показатели при наилучшей ежедневной производительности. В островном регионе максимальный процент использования возобновляемых источников энергии достиг 65%. При стабильных капитальных затратах (31,9% на аккумуляторы и 57,5% на солнечную энергию) использование гибридных микросетей вполне оправданы с экономической точки зрения. В каждой из четырех местностей была достигнута внутренняя норма доходности (ВНД) в размере 1% с очень быстрым сроком окупаемости – чуть более одного месяца. За 20 лет чистая приведенная стоимость (ЧПС) была наибольшей в прибрежной зоне и составила 748 465 300 бангладешских так (480 365 029,54 рублей), самая низкая ЧПС была в холмистом регионе - 516 705 306 (331 621 465,39 рублей). Важнейшим аспектом является высокий уровень зависимости производительности от сезонных колебаний. В сезон дождей отмечается самый низкий уровень использования возобновляемых источников энергии (от 23,1% до 33,8%), и, как следствие, увеличивается потребление дизельного топлива и уровень расходов независимо от местности. С другой стороны, в такие сезоны, как Хеманто, Башонто и Шорот, наблюдается повышение уровня использования возобновляемых источников энергии. С точки зрения влияния на окружающую среду, микросети значительно сокращают выбросы углекислого газа и выхлопы от дизельного топлива. В этом отношении лидирует прибрежная зона, где ежегодного сокращаются выбросы углекислого газа на 914,5 тонн. Для постоянного управления и контроля за производительностью во время сезона Борша необходимо использовать оптимизацию, основанную на генетическом алгоритме.

Введение

Гибридные микросети, оптимизированные с помощью искусственного интеллекта, представляют собой инновационный метод решения сложных энергетических проблем сельских районов Бангладеш за счет интеллектуального управления и использования разных видов возобновляемых источников энергии. Устойчивая гибридная система управления возобновляемыми источниками энергии для отдаленных районов в Бангладеш обеспечивает экономию энергии на 23% за счет интеграции солнечной энергии, ветра, дизельного топлива, биомассы и аккумуляторных батарей. Для распределения энергии в режиме реального времени используется система SCADA [1]. Искусственный интеллект преобразует сельские энергетические системы Бангладеш, повышая точность прогнозирования до более чем 92%, сокращая время простоя систем на 80% и увеличивая срок службы батарей на 30–35%. Интеграция искусственного интеллекта с IoT, ГИС и блокчейном еще больше оптимизирует энергоэффективность и снижает бытовые расходы на электроэнергию на 11% [2]. В исследовании представлен анализ целесообразности и чувствительности гибридных микросетей в Бангладеш с использованием технологий искусственного интеллекта, таких как нейронные сети, для оптимизации ветровых и солнечных энергетических систем, с целью определить экономически выгодные конфигурации [3]. Для оптимального секционирования была предложена гибридная система микросетей, сочетающая солнечную энергию, ветер, биомассу и водород. Анализ прерывистости и экономической целесообразности с использованием моделирования в реальном времени показал эффективность использования данной системы в изолированных районах [4]. Рассматривается оптимизация гибридных систем, сочетающих фотоэлектрическую энергию и энергию ветра, для стадионов в Бангладеш, анализ расходов проводится в программе HOMER [5]. Гибридная энергетическая система с фотоэлектрическими и литиевыми аккумуляторами является наиболее подходящей для жилого комплекса в Дакке, Бангладеш, и позволяет значительно снизить затраты и выбросы вредных веществ. Система была оптимизирована с помощью моделирования в HOMER Pro [6]. Гибридные мини-сети с возобновляемыми источниками энергии могут обеспечивать электроэнергией более высокого качества в течение 12–18 часов в сутки по более низкой цене (0,29–0,31 доллара США за кВт*ч) с использованием имитационной модели HOMER, что потенциально может решить проблемы доступа к энергии в прибрежных регионах Бангладеш [7]. Потенциал гибридных мини-электросетевых систем для электрификации сельских районов Бангладеш, использующих автономные технологии и возобновляемые источники энергии, рассматривается как решение для удовлетворения спроса в энергии и обеспечения экологически безопасного доступа к электроэнергии. Островные микросети с солнечными батареями являются экономически эффективными и надежными для электрификации сельских районов в Бангладеш, с потенциалом снижения затрат на электроэнергию и выбросов парниковых газов; в технико-экономическом

обосновании оцениваются такие матрицы эффективности, как стоимость энергии, чистая приведенная стоимость и доля возобновляемой энергии [8]. Оптимизированная в программе HOMER гибридная энергетическая система, использующая энергию солнца, ветра и дизеля, сокращает выбросы углекислого газа на 67% и 64% на островах Сен-Мартен и Куаката соответственно, удовлетворяя 67,3% и 62,3% спроса на энергию за счет возобновляемых источников [9]. Гибридные системы возобновляемой энергетики имеют важное значение для решения проблемы дефицита электроэнергии в развивающихся странах, таких как Бангладеш. В ходе исследования с использованием программного обеспечения NSGA-II и HOMER Pro была оптимизирована система PV/Wind/Battery/DG, что позволило снизить чистую текущую стоимость на 2,69% по сравнению с системами на базе HOMER, общая стоимость которых составила 711 943 доллара США. Этот подход актуален для оптимизированного с помощью ИИ управления гибридными микросетями в Бангладеш [10]. Новизна предлагаемого исследования заключается в обеспечении наилучшего возможного местоположения с учетом технико-экономических аспектов с помощью ИИ.

Методология

На рис. 1 представлено графическое сравнение эффективности трех различных методов оптимизации, используемых в микросети, — метода, основанного на правилах, линейного программирования и генетического алгоритма.

В схеме каждый метод оптимизации сравнивается по пятью важнейшими рабочими показателями:

1. Сокращение использования дизельного топлива
2. Внедрение возобновляемых источников энергии
3. Снижение затрат
4. Эффективность систем
5. Доступность энергии

Предлагаемая система была разработана на языке Python с использованием данных в реальном времени и методов оптимизации искусственного интеллекта.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

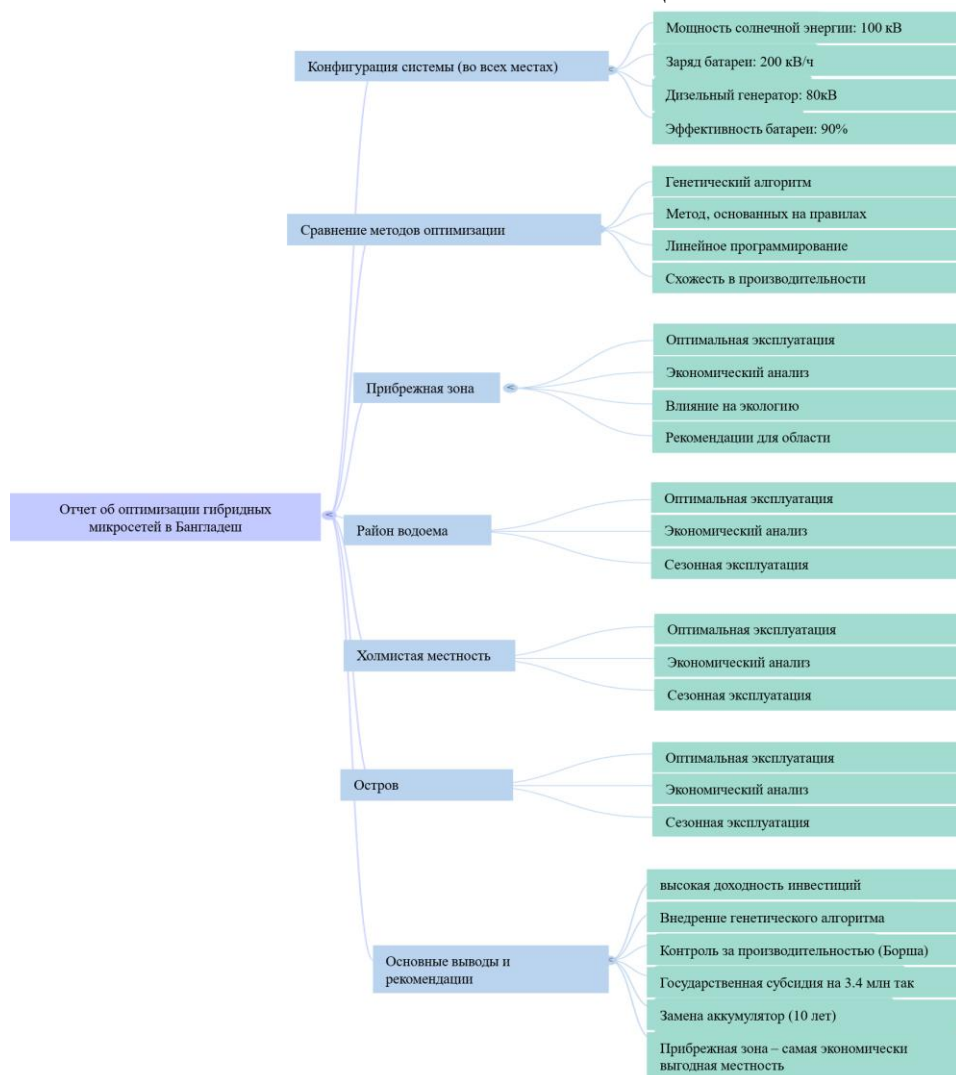


Рисунок 1 – Метод анализа

Результаты и анализ

Анализ охватывает оптимальную производительность, экономическую целесообразность и зависимость от погодных условий стандартной гибридной микросетевой системы (солнечная энергия мощностью 100 кВт, аккумуляторная батарея мощностью 200 кВт·ч, дизельный генератор мощностью 80 кВт) в четырех различных географических точках: прибрежная зона, район водоемов, холмистый регион и остров.

1. Оптимальная регулярная эксплуатация (например, энергетический баланс, показатели эффективности)

На рис. 2 показан типичный день с использованием метода, основанного на правилах, хотя оптимальные показатели практически одинаковы для всех методов.

- Прибрежная зона: обеспечивает 44,2%-ное использование возобновляемых источников энергии и 96,9%-ную эффективность системы/энергодоступность. На дизельное топливо приходится 49,6% ежедневных расходов, что в

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

значительной степени отражает общий процент эксплуатационных расходов (50,0%).

- Район водоемов: демонстрирует более высокую эффективность интеграции, обеспечивая 99,1% эффективности системы и доступность энергии, а также 58,6% использования возобновляемых источников энергии.

- Холмистый регион: обеспечивает максимальную техническую надежность, 100%-ную эффективность системы и 100%-ную доступность энергии. Доля возобновляемых источников энергии составляет 56,5%.

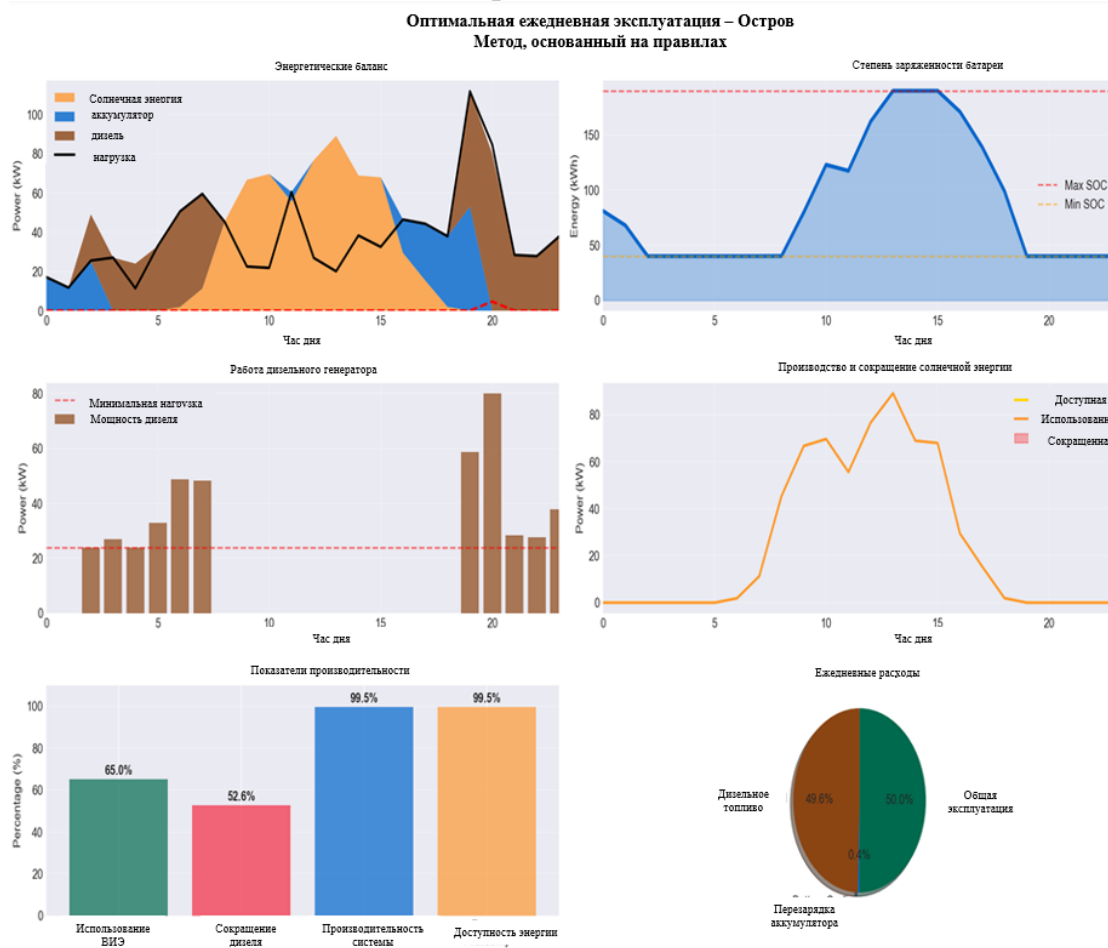


Рисунок 2 – Оптимальная ежедневная эксплуатация

2. Сравнение методов оптимизации

Единообразие результатов: Сравнение методов оптимизации показывает, что у всех трех методов одинаковый ежедневный расход дизельного топлива и эксплуатационные расходы в независимости от местности. Например, в горном регионе все методы приводят к потреблению дизельного топлива в размере 393,1 кВт*ч и эксплуатационным расходам в размере 118 682 бат. Это говорит о том, что при такой стандартизированной конфигурации системы простое управление на основе правил работает так же хорошо, как и более сложные генетические алгоритмы с точки зрения общего потребления и стоимости.

3. Сезонный анализ производительности

На рисунке 3 показана изменчивость, вызванная сезонными изменениями погоды, особенно в сезон дождей.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

- падение в сезон Борша: каждый регион сталкивается с трудностями в сезон Борша, во время которого отмечается самый высокий уровень потребления топлива и рост эксплуатационных расходов.

Во время сезона Борша в прибрежной зоне доля использования возобновляемых источников энергии упала до 23,1%, а ежедневное потребление дизельного топлива выросло до 971,6 кВт*ч.

В сезон Борша снижение также наблюдается и на острове: потребление топлива достигает 813,9 кВт *ч в день, а использование возобновляемых источников энергии снижается до 30,4%.

- Оптимальные сезоны: в Шарате и Башонто, как правило, наблюдается самый низкий расход дизельного топлива и самый высокий уровень использования возобновляемых источников энергии среди всех регионов. Например, в сезон Башонто в холмистом регионе доля возобновляемых источников энергии достигла 87,3%.

4. Экономический анализ.

Экономические показатели анализируют распределение капитала, финансовые показатели и денежный поток в долгосрочной перспективе.

- Распределение капитала: Распределение капитальных вложений одинаково во всех четырех районах, при этом на долю солнечных батарей приходится 57,5%, а на аккумуляторы - 31,9% от общих капитальных затрат.

- Финансовые показатели: все четыре местности являются исключительно прибыльными, с одинаковым сроком окупаемости в 1 месяц и внутренней нормой доходности (ВНД) в 1%.



Рисунок 3 – Сезонная эксплуатация для холмистой местности (самый высокий уровень использования в сезон Башонто).

Гришмо – с апреля по июнь.

Борша – с июня по август.

Шорот – с августа по октябрь.

Хеманта – с октября по декабрь.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

Шит – с декабря по февраль.

Бошонто – с февраля по апрель.

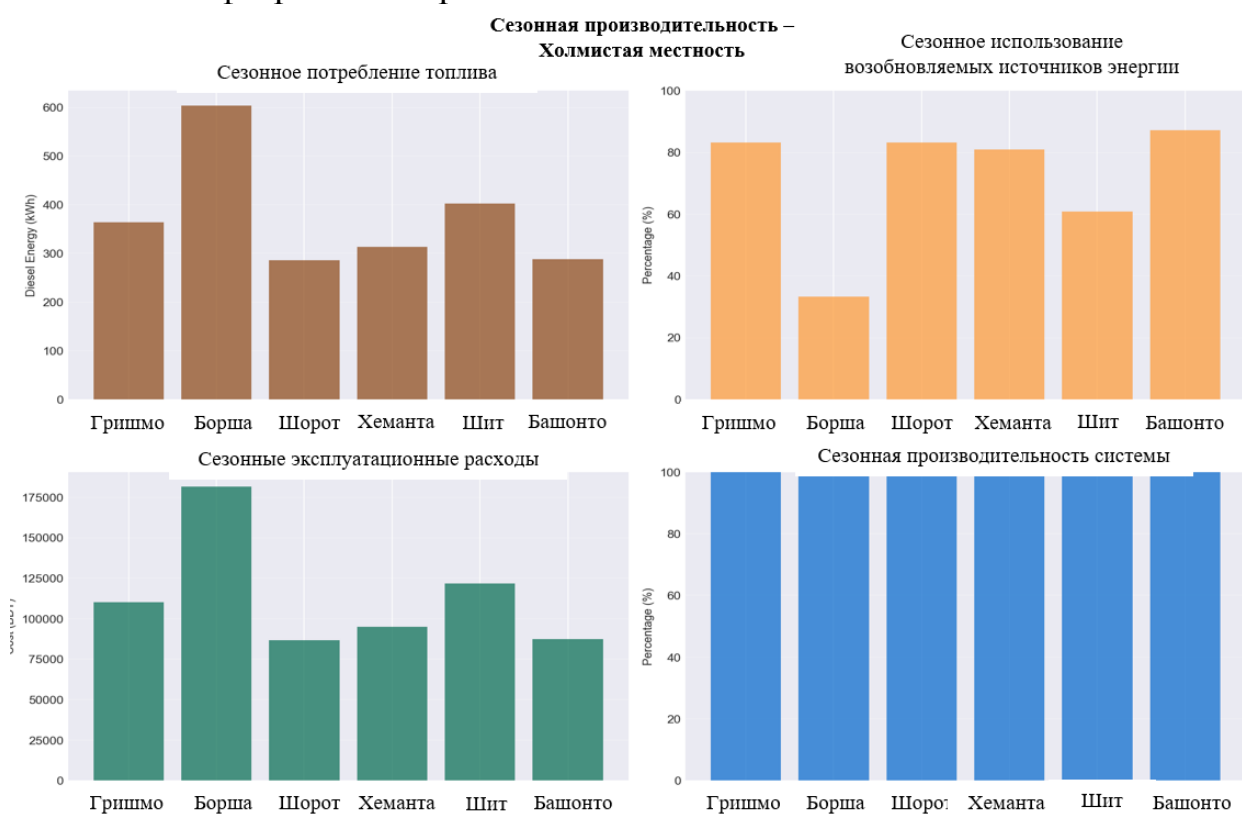


Рисунок 4 – Сезонная продолжительность

Чистая приведенная стоимость (ЧПС): Анализ потока денежных средств за 20 лет показывает значительные различия в долгосрочной стоимости, отражающие различия в эксплуатационной экономии (годовая экономия варьируется в зависимости от региона).

У прибрежной зоны самый высокий показатель ЧПС - 748 465 300 так (475 874 237,74руб.).

У холмистой местности самый низкий показатель ЧПС - 516 705 306 так (328 521 233,55руб.).

Таблица 1

Характеристика	Прибрежная зона	Район водоемов	Холмистый регион	Остров
Потребление топлива в день (кВ/ч)	689.5	433.8	393.1	437.8
Интеграция возобновляемых источников энергии	44.20%	58.60%	56.50%	65.00%
Эффективность системы	96.90%	99.10%	100.00%	99.50%
ЧПС за 20 лет	748.5 млн	616.6 млн	516.7 млн	569.4 млн
Использование возобновляемых источников энергии во	23.10%	33.80%	33.20%	30.40%

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

время сезона Борша				
Сокращение выбросов углекислого газа в год (в тоннах)	914.5	665.9	581	643.4

Заключение

Холмистый регион достиг самых оптимальных показателей технической производительности, обеспечив 100%-ную эффективность систем и доступность энергии. Что касается внедрения возобновляемых источников энергии, то самый высокий уровень продемонстрировал островной регион – 65%. С экономической точки зрения, все четыре местности показывают высокую финансовую целесообразность с очень коротким сроком окупаемости – чуть более одного месяца. Примечательно, что прибрежная зона демонстрирует лучшие долгосрочные финансовые показатели, обеспечивая самую высокую чистую приведенную стоимость (ЧПС). С точки зрения эксплуатации, результаты оптимизации демонстрируют похожие результаты, при этом суточное потребление дизельного топлива и эксплуатационные расходы незначительно варьируются в зависимости от выбранного метода (на основе правил, линейного программирования или генетического алгоритма) в конкретной местности. С экологической точки зрения наибольший вклад в сокращение выбросов углекислого газа ежегодно вносит прибрежная зона. Тем не менее, все регионы уязвимы в сезон Борша, во время которого уровень использования возобновляемых источников энергии падает до минимума, особенно в прибрежных районах, где он может достигать 23,1%, в результате чего увеличивается зависимость от дизельного топлива. Ключевыми задачами для развития гибридных микросетевых систем в перспективе является повышение устойчивости и масштабируемости на основе сезонного и экономического анализа. В связи с высоким уровнем потребления топлива и низким распространением возобновляемых источников энергии необходимо искать решение проблем, возникающих во время сезона Борша. Для того, чтобы контролировать изменения в эксплуатации, в будущих проектах необходимо улучшить управление в режиме реального времени при помощи генетических алгоритмов и учитывать оптимальный размер для сезонных условий. Стоит активно внедрять возобновляемые источники энергии в таких районах, как прибрежная зона, из-за высокой внутренней доходности и быстрого срока окупаемости. Ожидается, что наряду с финансовой выгодой это расширение положительно повлияет на окружающую среду за счет сокращения выбросов углекислого газа. Сравнение различных методов оптимизации сделало возможным переход к стандартизации и упрощению контроля. Этот метод направлен на эффективное применение действенных тактических приемов при одновременном снижении затрат и упрощении самого процесса.

Статья переведена и адаптирована для русскоязычной аудитории с английского оригинала.

Библиографический список

1. Ахмед И., Раззак Мд. А., Ахмед Ф. (2024). Устойчивая гибридная система управления возобновляемыми источниками энергии для острова Айленд: модельный подход, использующий гибридную оптимизацию нескольких энергетических ресурсов и основанный на установлении приоритетов диспетчерского контроля и сбора данных. *IET Smart Grid*, 7 (6), 940-966. <https://doi.org/10.1049/stg2.12192>
2. Энергетическое прогнозирование и управление на основе искусственного интеллекта для интеллектуальной сельской энергетической инфраструктуры. (2025). *Прикладные информационные технологии и инжиниринг*, 3(1), 1-6. <https://doi.org/10.25163/engineering.3110315>
3. Нуруннаби Мд. Рой, Н. К., Хоссейн, Э., Пота, Х. Р. (2019). Оптимизация размеров и анализ чувствительности гибридных ветровых/фотоэлектрических микросетей - на примере Бангладеш. Доступ к IEEE, 7, 150120-150140. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2945937>
4. Шуфиан, А., Хок Мд. Дж.-А.-М., Кабир, С., и Мохаммад, Н. (2022). Моделирование и экономический анализ оптимальной островной микросети на основе гибридной энергии солнца, ветра, биомассы и водорода в Бангладеш. 10-я конференция IEEE по гуманитарным технологиям в регионе 10 (R10-HTC) (2022) (стр. 61-66). IEEE. <https://doi.org/10.1109/r10-htc54060.2022.9929601>
5. Баруа, С., Хоссейн, К. А., и Рахман Мд. М. (2015). Оптимизация связанной с сетью распределенной микросеточной системы с системой зарядки электромобилей для стадионов Бангладеш. *Международная конференция по электротехнике и информационно-коммуникационным технологиям (ICSEEICT)* (2015) (стр. 1-6). <https://doi.org/10.1109/icseeict.2015.7307492>
6. Хасан С., Зейяд М., Ахмед С. М. М. и Анубхов Мд. С.Т. (2023). Оптимизация и планирование микросетей на основе возобновляемых источников энергии для жилого комплекса. *Экологический прогресс и устойчивая энергетика*, 42(5). <https://doi.org/10.1002/ep.14124>
7. Алам, М., и Бхаттачарья, С. (2016). Децентрализованные гибридные мини-сети с возобновляемыми источниками энергии для устойчивой электрификации автономных прибрежных районов Бангладеш. *Energies*, 9 (4), 268. <https://doi.org/10.3390/en9040268>
8. Шоеб, М. А., и Шафиулла, Г. М. (2018). Интегрированная островная микросеть с использованием возобновляемых источников энергии для устойчивой ирригации — перспективы в Бангладеш. *Energies*, 11 (5), 1283. <https://doi.org/10.3390/en11051283>
9. Рашид С. Рана, С., Шедан, С. К. А., А.Б. Карим, С., и Анауэр, С. (2016). Оптимизированный дизайн гибридной фотоэлектрической ветродизельной энергетической системы для устойчивого развития прибрежных районов

Бангладеш. Экологический прогресс и устойчивая энергетика, 36(1), 297-304. <https://doi.org/10.1002/ep.12496>

10. Ислам Мд. Актер Х., Хауладер Х. и Сенджу Т. (2022). Оптимальный размер и технико-экономический анализ независимой от сети гибридной энергетической системы для устойчивой электрификации сельских районов в развивающихся странах: на примере Бангладеш. *Energies*, 15 (17), 6381. <https://doi.org/10.3390/en15176381>

УДК 621.311.24

Интеллектуальные зарядные станции для электротранспорта с адаптацией к нагрузкам энергосети

Фархутдинов Р.И., Щепин Д.И.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к созданию интеллектуальных зарядных станций (ЗС) для электротранспорта, способных динамически адаптироваться к изменяющимся нагрузкам энергосети. Основное внимание уделено методам снижения пиковых нагрузок, интеграции возобновляемых источников энергии и применению систем прогнозирования и управления на основе искусственного интеллекта. Проанализированы факторы, влияющие на стабильность энергосистемы при массовом внедрении электромобилей, а также предложены инженерные и алгоритмические решения для обеспечения устойчивой и эффективной работы зарядной инфраструктуры. В работе обсуждаются архитектурные решения, интеллектуальные алгоритмы управления и опыт их практического внедрения. Представлены примеры зарубежных разработок и показано, каким образом данные практики могут быть адаптированы к российским и другим развивающимся рынкам.

Рост числа электромобилей в последние годы ставит перед энергетической инфраструктурой новые вызовы. Массовое подключение электротранспорта к сети может привести к значительным пиковым нагрузкам, дисбалансу мощности и снижению надежности энергоснабжения, особенно в часы максимального потребления. Статистические данные и моделирование [1] показывают, что неконтролируемая зарядка электромобилей в вечерние часы может перегрузить трансформаторы и линии электропередачи, что ведет к ускоренному старению оборудования и необходимости дорогостоящей модернизации сетей.

Актуальность разработки интеллектуальных зарядных станций, способных адаптироваться к состоянию энергосети, определяется необходимостью:

- Снижения пиковых нагрузок на энергосеть;
- Повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
- Обеспечения стабильности и надежности энергоснабжения;

- Снижения эксплуатационных затрат и продления срока службы сетевого оборудования.

Настоящая работа посвящена анализу, обобщению и развитию существующих подходов к созданию таких систем, с акцентом на адаптацию к реальным условиям эксплуатации и интеграции в существующие энергосети.

Под интеллектуальной зарядной станцией понимается система, способная динамически регулировать процесс зарядки в зависимости от состояния энергосети, прогноза спроса, наличия генерации от ВИЭ и предпочтений пользователя [2]. Основные задачи включают:

1. Автоматизацию процессов зарядки — регулирование мощности и времени зарядки в зависимости от тарифов, состояния сети и уровня заряда аккумулятора.

2. Мониторинг и диагностику — отслеживание состояния оборудования, прогнозирование отказов и планирование технического обслуживания.

3. Прогнозирование и оптимизацию — использование данных о погоде, поведении пользователей и состоянии сети для минимизации нагрузки и максимизации использования «зеленой» энергии.

4. Интеграцию с умными сетями (Smart Grid) — участие в балансировке сети, реализация концепций Vehicle-to-Grid (V2G) и Grid-to-Vehicle (G2V).

Такая система мер позволяет снизить пиковую нагрузку на сеть до 50 % [3] и повысить общую эффективность энергосистемы.

В мировой практике повышение эффективности зарядной инфраструктуры достигается за счет внедрения цифровых платформ, открытых протоколов связи и интеллектуальных алгоритмов управления. В работах [2] и [3] показано, что ключевыми направлениями являются:

- Использование протокола OCPP (Open Charge Point Protocol) — обеспечивает совместимость зарядных станций разных производителей и централизованное управление сетью.

- Внедрение систем на основе искусственного интеллекта — адаптивные нейро-нечеткие системы (ANFIS), генетические алгоритмы (GA) и методы машинного обучения позволяют оптимизировать распределение мощности и прогнозировать нагрузку.

- Интеграция с возобновляемыми источниками — солнечными и ветровыми установками, что снижает углеродный след и зависимость от централизованной генерации.

В стандартах, таких как ISO/IEC 15118 и IEC 61851-1, определены требования к интерфейсам связи, уровням мощности и режимам зарядки [1].

Опыт компаний, таких как Siemens и национальные энергетические операторы в Европе и Азии, показывает высокую эффективность применения предиктивной аналитики и цифровых двойников для управления зарядной инфраструктурой [2].

Современная интеллектуальная ЗС включает следующие компоненты [3]:

- Фотоэлектрические панели (PV) — для локальной генерации энергии.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

- Буферные аккумуляторные системы (BSS) — для накопления избыточной энергии и сглаживания пиков.
- Многопортовые бидирекционные преобразователи (DC/DC, DC/AC) — для гибкого управления потоками энергии между сетью, PV, BSS и электромобилями.
- Система управления на базе ANFIS или GA — для оптимизации режимов работы в реальном времени.
- Интерфейсы связи (MODBUS, CANBUS, OCPP) — для интеграции с централизованными системами управления.

Адаптивная нейро-нечеткая система (ANFIS) [3] позволяет:

- Прогнозировать генерацию от солнечных панелей на основе метеорологических данных (облачность, инсоляция).
- Оценивать спрос на зарядку на основе исторических данных о поведении пользователей.
- Оптимизировать состояние заряда (SoC) буферных аккумуляторов, чтобы избежать их переразряда и максимизировать срок службы.
- Автоматически переключаться между режимами Grid-Connected (GC) и Stand-Alone (SA) при отключении сети.

Генетические алгоритмы (GA) [1] применяются для:

- Оптимизации графика зарядки с целью выравнивания профиля нагрузки.
- Учета ограничений сети (напряжение, тепловые пределы линий и трансформаторов).
- Минимизации отклонения нагрузки между соседними часами, что снижает износ оборудования.

В работе [3] описаны 9 режимов работы системы на основе сочетания доступности солнечной генерации, наличия нагрузки от электромобилей и состояния буферного аккумулятора. Например:

- Режим 1: Максимальная генерация PV, электромобили и BSS требуют зарядки → сеть дополняет нехватку мощности.
- Режим 6: Максимальная генерация PV, частичная нагрузка от электромобилей, BSS разряжен → PV сначала заряжает электромобили, затем BSS.
- Режим 9: Максимальная генерация PV, нет нагрузки, BSS полностью заряжен → избыток энергии передается в сеть.

Наибольший вклад в нестабильность сети вносят:

- Неконтролируемая зарядка в пиковые часы (~ 40% случаев перегрузки) [1].
- Непредсказуемость поведения пользователей — время прибытия, уровень разряда, длительность зарядки.
- Интермиттирующий характер ВИЭ — изменение выработки солнечной энергии в течение дня.

- Отсутствие стандартизации и нормативной базы — особенно актуально для развивающихся стран [2].

Заключение

На основе проведенного анализа литературы можно сделать следующие выводы.

Основной проблемой, препятствующей массовому внедрению электромобилей, является отсутствие гибкой и устойчивой зарядной инфраструктуры, способной адаптироваться к реальным условиям работы энергосети. Как показано в работах [1, 3], пиковые нагрузки от неконтролируемой зарядки могут привести к перегрузке трансформаторов и линий, что требует дорогостоящей модернизации сетей.

Для решения этой проблемы наиболее эффективным подходом является внедрение интеллектуальных зарядных станций, сочетающих аппаратные и программные решения. Ключевыми элементами такой системы являются:

- Буферные аккумуляторные системы (BSS) — позволяют аккумулировать избыточную солнечную энергию и использовать ее в часы пиковой нагрузки, тем самым снижая нагрузку на сеть [3].

- Адаптивные нейро-нечеткие системы (ANFIS) — обеспечивают прогнозирование генерации и спроса, а также автоматическое переключение между режимами работы, что повышает надежность и эффективность зарядки [3].

- Генетические алгоритмы (GA) — позволяют оптимизировать график зарядки с учетом технических ограничений сети, что предотвращает перегрузки и снижает износ оборудования [1].

Практические примеры, описанные в [3], подтверждают, что внедрение таких систем в зарядные станции, интегрированные с фотоэлектрическими установками, позволяет снизить пиковую нагрузку на энергосеть в 2 раза, увеличить долю использования «зеленой» энергии и сократить эксплуатационные расходы. Это достигается за счет:

- Использования прогнозных моделей для заранее планируемого распределения нагрузки;

- Автоматического переключения между источниками энергии (PV, сеть, BSS);

- Оптимизации состояния заряда буферных аккумуляторов в зависимости от прогнозируемого спроса.

Таким образом, для успешного развития электротранспорта в России и других странах с развивающейся инфраструктурой необходимо:

1. Разработать и внедрить национальные стандарты на интеллектуальные зарядные станции, включая протоколы связи (OCPP) и требования к системам управления.

2. Стимулировать интеграцию ВИЭ с зарядной инфраструктурой через государственные программы и тарифные льготы.

3. Внедрять интеллектуальные алгоритмы управления (ANFIS, GA) на уровне как отдельных станций, так и централизованных систем управления сетью.

Эти меры позволят не только обеспечить устойчивую работу энергосистемы, но и ускорить переход к экологически чистому транспорту, повысив его экономическую привлекательность для конечных пользователей.

Библиографический список

1. Alonso M., Amaris H., Germain J.G., Galan J.M. Optimal Charging Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grids by Heuristic Algorithms // *Energies*. 2014. Vol. 7, № 4. P. 2449–2475. DOI: 10.3390/en7042449. (дата обращения: 21.09.2025).

2. Перспективы цифровизации зарядных станций и внедрения умных технологий // APNI.RU. URL: <https://apni.ru/article/8053-perspektivy-cifrovizaczii-zaryadnyh-stanczij-i-vnedreniya-umnyh-tehnologij> (дата обращения: 21.09.2025).

3. Amir M., Zaheeruddin, Haque A., Bakhsh F.I., Kurukuru V.S.B., Sedighizadeh M. Intelligent energy management scheme-based coordinated control for reducing peak load in grid-connected photovoltaic-powered electric vehicle charging stations // *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2024. Vol. 18. P. 1205–1222. DOI: 10.1049/gtd2.12772. (дата обращения: 21.09.2025).

4. Tao Y., Qiu J., Lai S., Sun X., Zhao J. Adaptive Integrated Planning of Electricity Networks and Fast Charging Stations Under Electric Vehicle Diffusion // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2022. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3167666. (дата обращения: 21.09.2025).

5. Hafez O., Bhattacharya K. Integrating EV Charging Stations as Smart Loads for Demand Response Provisions in Distribution Systems // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8, № 1. P. 401–410. DOI: 10.1109/TSG.2016.2576902. (дата обращения: 21.09.2025).

6. Shao S., Pipattanasomporn M., Rahman S. Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid With Electric Vehicles // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011. Vol. 2, № 4. P. 624–631. DOI: 10.1109/TSG.2011.2164583. (дата обращения: 21.09.2025).

УДК 620.92

Использование умных энергетических сетей («smart grid») для оптимального распределения нагрузки

Шакуров Д.И., Савиных А.А.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. В статье рассматриваются отечественные и зарубежные проекты, в которых используются «smart grid» системы. На их примере показана эффективность данной технологии.

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

С каждым днём число потребителей электроэнергии, и, следовательно, количество потребляемой энергии увеличивается во всём мире, в том числе и в России. Для решения этой проблемы необходимо внедрять в энергетику инновационные технологии, направленные на повышение эффективности, надёжности, а также устойчивости производства, распределения и потребления электроэнергии. Одним из таких решений является использование умных энергетических сетей («smart grid»).



Рисунок 1 – График потребления электроэнергии в РФ. [3]

В приведённом выше графике «Потребления электроэнергии РФ» показывает то, что действительно существует тенденция увеличения потребления электроэнергии с течением времени.

Сперва необходимо дать определение термину «smart grid». Научные деятели не пришли к единой трактовке данного термина, и на сегодняшний день имеется отличная формулировка термина у США, Европы и России. В данной статье мы будем использовать российское определение термина. В России под «smart grid» определяется автоматизированный программный комплекс, который позволяет, на основе информации, полученной от всех объектов системы и промежуточных элементов сетей, правильно распределять всю имеющуюся энергию между потребителями, обеспечив при этом стабильность энергосети с точки зрения оценки напряжения и частоты.

Применяя современные ИКТ (информационно-коммуникационные технологии), всё оборудование умных сетей может активно взаимодействовать друг с другом. Энергетические системы, оснащённые «smart grid», обладают способностью к самодиагностике и самовосстановлению, а также, меньше зависят от централизованных электростанций. За счёт этого повышается надёжность всей системы.

Согласно исследованиям ИНЭИ РАН, создание интеллектуальной системы энергетики в России снизит потребность в установленной мощности более чем

на 10% (на 34 ГВт) и энергопотребление почти на 9% (140 млрд. кВт*ч) до 2030 года.

В России разработаны и внедрены ряд «smart grid» проектов.

Например, была разработана «smart grid» система «Гелиос», которая была внедрена в городскую систему освещения города Белгород [5]. «Гелиос» представляет собой автоматическую систему управления наружным освещением, которая обеспечивает полный контроль электрических сетей с возможностью дистанционного управления, анализа и контроля электропотребления. Белгородская область стала первым регионом Российской Федерации, где произошло внедрение АСУНО «Гелиос». В результате за первый год работы системы на 30% снизились затраты, связанные с выездом на объекты оперативного персонала. Экономия потребляемой электроэнергии составила более 20%. Все повреждения сетей выявлялись и устранялись в оперативном порядке. Компания, которая разработала систему «Гелиос», предоставляет следующее экономическое обоснование внедрения данной системы:

Расчет экономической эффективности внедрения АСУНО «Гелиос» приведен для 50 объектов управления уличным освещением.

При работе системы освещения без использования различных режимов ламп, потребление электроэнергии в год составит 3 463 120 кВт*ч. Учитывая тариф 5,50 руб. за 1 кВт*ч, в денежном выражении составит 19 047 160 руб [5].

Экономический эффект от внедрения АСУНО «Гелиос» будет получен за счет адресного управления и диммирования (процесс регулирования яркости источника света) каждого светильника, а также за счет уменьшения затрат на обслуживание сетей наружного освещения.

Годовое потребление электроэнергии по расчетам разработчика составит 2 217 375 кВт*ч в год. Таким образом, при внедрении АСУНО «Гелиос» экономия электроэнергии в год составит примерно 35%. В денежном выражении экономия составит: 6 851 597 руб. Срок окупаемости оборудования составит около 3-х лет.

Другим примером «smart grid» проекта является проект «Умные сети», который был разработан совместно по инициативе АО «БЭСК» (Башкирская электросетевая компания) и Siemens. Обновлено 513 энергообъектов (распределительных пунктов и подстанций), проложено почти 100 км новых кабельных линий. Создан новейший Центр управления сетями города, объединивший восемь диспетчерских пунктов. Внедрена система автоматического обнаружения аварий: при сбое сигнал мгновенно поступает на все устройства, диспетчер видит место повреждения, а программа предлагает оптимальную схему переключений для быстрого восстановления питания. Результаты внедрения систем: Smart Grid-решения снизили потери электроэнергии в Уфе вдвое (с ~16–17% до ~8%).

Также, крупнейшая электросетевая компания страны – ПАО «Россети» – реализует собственную стратегию цифровой трансформации до 2030 года. В ее рамках по всей территории присутствия внедряются элементы Smart Grid:

цифровые подстанции, интеллектуальный учет, автоматизированные РЭС и др. В период 2020–2024 гг. компания удвоила темпы установки «умных» счетчиков – их число превысило 7 млн единиц. Во всех межрегиональных филиалах созданы ситуационно-аналитические центры, объединенные с Единым национальным диспетчерским центром.

Другие страны также разрабатывали и внедряли «smart grid» в свою энергосистему. В США, штат Иллинойс, город Чикаго, Иллинойским технологическим институтом был разработан проект «Perfect Power». Perfect Power System (2008-2014 г.г) основана на интеллектуальной микросети — небольшой, локальной, модернизированной версии электросети, которая передает большую часть электроэнергии по всей стране. Эти микросети нацелены на быстрое донесение экономических и экологических преимуществ современных сетевых технологий до потребителей [6, 7, 8].

Иллинойский технологический институт прогнозирует результаты своего проекта модель Perfect Power в ИТ окупится в течение пяти лет после ее завершения. Для ИИТ система Perfect Power обеспечит значительную экономию – не менее 20 миллионов долларов в течение 10 лет [6, 7, 8].

После завершения проекта прогнозы сбылись результаты работы проекта таковы: Введены в эксплуатацию три контура. Снижение пикового потребления на 50% по запросу PJM/ComEd Быстрый пуск турбины выполнен, что обеспечивает эту возможность; Постоянное снижение потребления на 20%. Собраны исходные данные и проведена их нормализация, HDD/CDD.

Внедрение «smart grid» систем в России, а также в странах зарубежья, например США, привело к повышению эффективности, надёжности и устойчивости энергетических систем, за счёт оптимизации работ с распределением нагрузки в энергетической системе.

Библиографический список

1. Зубков А.А., Руди Д.Ю. Перспектива развития концепции smart grid в российской энергетике // Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции «Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции». Омск: ОИВТ (филиал) ФГБОУ ВО «СГУВТ», 2023. С. 124-132.
2. Энергоэффективность и развитие умных сетей в регионах России // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка». URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoeffektivnost-i-razvitie-umnyh-setey-v-regionah-gossii> (дата обращения: 22.09.2025).
3. Потребление электроэнергии по субъектам Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/el-potr.xls> (дата обращения: 22.09.2025).
4. Как устроен первый в России проект «умных» энергосетей. // РБК URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/616436539a794743eebd4169> (дата обращения: 22.09.2025).

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

5. Эффективность внедрения АСУНО «Гелиос» // Helios Умные технологии для жизни. URL: <https://helios.su/blog/jeffektivnost-vnedrenija-asuno-gelios/?ysclid=mfwh3mn1uo16033554> (дата обращения: 22.09.2025).

6. Public/Private Partnership Creates Opportunity to Fundamentally Address Local Energy Crises // ILLINOIS TECH. URL: <https://www.iit.edu/news/publicprivate-partnership-creates-opportunity-fundamentally-address-local-energy-crises> (дата обращения: 23.09.2025).

7. The Perfect Power Prototype for the Illinois Institute of Technology // Illinois Institute of Technology. URL: <http://www.iitmicrogrid.net/microgrid/pdf/microgridarticle/20130201/PerfectPowerYear1Report.pdf?iframe=true&width=980&height=780> (дата обращения: 23.09.2025).

8. Perfect Power Progress Report // robert w. galvin center for electricity innovation. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/28_The_Perfect_Power_Prototypefor_the_Illinois_Institute_of_Technology_0.pdf (дата обращения: 23.09.2025).

УДК 621.316.9.072:004.7

**Цифровая трансформация релейной защиты: современное состояние
и перспективы в контексте энергетики будущего**

Батталханов А.З.

АО «КазАТУ им. С. Сейфуллина»

Аннотация. В статье проведен анализ современного состояния релейной защиты и автоматики (РЗА) как критического элемента устойчивости энергосистемы. Несмотря на активное обсуждение классических функций (АВР, АПВ), в научно-техническом дискурсе недостаточно внимания уделяется революционным изменениям, происходящим на аппаратно-алгоритмическом уровне. Авторы выделяют ключевые тренды цифровой трансформации РЗА: переход от электромеханических реле к многофункциональным микропроцессорным терминалам; внедрение стандарта IEC 61850, обеспечивающего сквозную цифровую связь и взаимодействие «умных» устройств (GOOSE, SV); появление встроенных функций прогнозной аналитики и киберзащиты. Показано, что современная РЗА эволюционирует от системы локального аварийного реагирования к интеллектуальному элементу активной сетевой инфраструктуры (Smart Grid), способному адаптироваться к режимам с распределенной генерацией. Выявлены ключевые вызовы для внедрения: высокая стоимость, дефицит квалифицированных кадров и необходимость модернизации нормативной базы. Сделан вывод о том, что глубокая цифровизация РЗА является не технической опцией, а обязательным условием перехода к надежной, гибкой и низкоуглеродной энергетике будущего.

Введение

Релейная защита и автоматика (РЗА) традиционно рассматривается как «технический иммунитет» энергосистемы, обеспечивающий ее устойчивость путем локализации повреждений. Классические принципы селективности, чувствительности и быстродействия, реализованные в функциях АВР, АПВ, АЧР, остаются фундаментальными [1, 2]. Однако современный технологический уклад, определяемый концепциями Индустрии 4.0 и Smart Grid, предъявляет к РЗА качественно новые требования. Энергетика будущего, характеризующаяся распределенной генерацией на основе ВИЭ, активным участием потребителей и высокой плотностью силовой электроники, создает сложные, быстротечные и слабо предсказуемые аварийные режимы [3]. В этих условиях классические схемы защиты, основанные на фиксированных уставках и жесткой логике, достигают предела своей эффективности.

Парадокс современного состояния заключается в том, что в профессиональной среде сохраняется интенсивная дискуссия вокруг

классических элементов (АВР, АПВ), в то время как технологическая революция происходит в области элементной базы, архитектуры связи и алгоритмов управления. Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью системного анализа именно этой, менее освещенной стороны развития РЗА — перехода к полностью цифровым, коммуницирующим и интеллектуальным системам защиты. Цель статьи — выявить и проанализировать ключевые технологические тренды цифровизации РЗА, оценить их влияние на функциональность и архитектуру систем защиты, а также определить основные барьеры и перспективы их интеграции в энергосистему будущего.

1. От электромеханики к цифре: смена технологической парадигмы

Исторически РЗА базировалась на электромеханических и полупроводниковых реле, выполнявших одну-две функции (максимальная токовая защита, дифференциальная защита). Современный этап характеризуется повсеместным внедрением цифровых (микропроцессорных) терминалов (например, Siemens SIPROTEC 5, ABB REF 6xx, Schneider Electric Sepam T80). Эти устройства представляют собой универсальные вычислительные платформы, объединяющие в одном корпусе десятки функций защиты, автоматики, измерения, контроля и диагностики.

Ключевые преимущества новой парадигмы:

Многофункциональность и гибкость. Один терминал заменяет шкаф с электромеханическими реле. Логика работы не «зашита» аппаратно, а определяется конфигурационным файлом, что позволяет быстро адаптировать защиту под изменения схемы электроснабжения.

Высокая точность и быстродействие. Скорость обработки сигналов и время срабатывания (20–40 мс) на порядок выше, чем у электромеханических аналогов (50–200 мс). Использование цифровых фильтров и алгоритмов БПФ (быстрого преобразования Фурье) позволяет выделять гармоники, симметричные составляющие и другие признаки сложных аварийных режимов.

Встроенная диагностика и мониторинг. Терминалы непрерывно проводят самодиагностику, ведут регистрацию аварийных процессов (осциллограммы), формируют журналы событий. Это переводит эксплуатацию из режима планово-предупредительных ремонтов в состояние предиктивного (прогнозного) технического обслуживания.

2. Стандарт IEC 61850: основа цифровой подстанции и коммуницирующей защиты

Наиболее значимым прорывом, определяющим современное состояние РЗА, является международный стандарт IEC 61850 «Системы автоматизации подстанций». Он создает не просто протокол обмена данными, а универсальную семантическую среду для описания всех функций и устройств подстанции на языке объектно-ориентированного моделирования [4].

Принципиальные инновации стандарта для РЗА:

GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event). Механизм сверхбыстрой (менее 4 мс) и надежной передачи дискретных команд (триггеров защиты,

блокировок) между устройствами по цифровой сети Ethernet. Это позволяет реализовать распределенные логические схемы защиты без сложной проводной коммутации.

Sampled Values (SV). Цифровой поток мгновенных значений тока и напряжения, передаваемый непосредственно от цифровых трансформаторов тока и напряжения (ДТТ, ДТН) или объединительных блоков (Merging Unit) к терминалам защиты. Исключаются погрешности аналоговых преобразователей и влияние наводок в кабелях.

Единая информационная модель. Все данные от устройств (реле, выключатели, измерительные трансформаторы) описываются единым образом, что обеспечивает бесшовную интеграцию в верхнеуровневые системы (SCADA, АСУ ТП).

Таким образом, РЗА перестает быть набором изолированных устройств и становится единой распределенной вычислительной системой подстанции, где все элементы обмениваются данными в реальном времени.

3. Интеллектуализация функций: от реагирования к прогнозированию

Современные микропроцессорные терминалы начинают выходить за рамки простого выполнения заданных уставок. Появляются элементы интеллектуализации:

Адаптивные защиты. Алгоритмы, способные анализировать текущий режим сети (конфигурацию, нагрузку, наличие генерации) и динамически корректировать уставки или логику работы для сохранения селективности и чувствительности. Это критически важно для сетей с ВИЭ.

Функции WAMPAC (Wide-Area Monitoring, Protection and Control). Интеграция РЗА с системами синхронизированных векторных измерений (PMU). Это позволяет реализовать защиты, реагирующие на межсистемные качания и предотвращающие развитие крупных системных аварий.

Встроенная киберзащита. Новые терминалы (например, семейство Siemens SICAM) оснащаются аппаратными криптографическими модулями, поддержкой стандартов безопасности (IEC 62351) для защиты GOOSE-сообщений от кибератак, что становится обязательным требованием для критической инфраструктуры.

Заключение

Проведенный анализ позволяет утверждать, что современное состояние релейной защиты характеризуется глубокой цифровой трансформацией, выходящей далеко за рамки простой замены аналоговых устройств на цифровые. Формируется новая парадигма: РЗА как интеллектуальная, сетевая и коммуницирующая система.

Основные выводы:

Аппаратная платформа эволюционировала к многофункциональным микропроцессорным терминалам, которые являются вычислительными узлами с расширенными функциями диагностики.

Системная архитектура кардинально меняется благодаря стандарту IEC 61850, обеспечивающему сквозную цифровизацию данных (GOOSE, SV) и создающему основу для цифровой подстанции.

Функциональность развивается в сторону адаптивности и интеллектуализации, обеспечивая готовность РЗА к работе в сложных условиях энергосистемы будущего с высокой долей распределенной генерации.

Перспективными направлениями исследований являются: разработка самонастраивающихся алгоритмов защиты для микросетей; создание цифровых двойников систем РЗА для тестирования и оптимизации; интеграция алгоритмов машинного обучения для прогнозирования аварийных режимов.

Таким образом, современная цифровая РЗА перестает быть лишь «подушкой безопасности» и становится активным элементом управления Smart Grid, напрямую влияющим на надежность, эффективность и гибкость энергетики будущего. Ее дальнейшее развитие должно сопровождаться опережающей модернизацией образовательных программ и нормативной базы.

Библиографический список

1. Беркович, М.А. Автоматика энергосистем: Учебник для техникумов / М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. — 3-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 240 с.
2. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 280 с.
3. Веников, В.А. Интеллектуальные электроэнергетические системы: Smart Grid : учебник для вузов / В.А. Веников, А.С. Кожанов; под ред. Д.А. Жукова. — 2-е изд. — М.: Инфра-Инженерия, 2022. — 478 с.
4. Siemens AG. SIPROTEC 5 – The versatile and integrated system for protection, control, automation and monitoring [Технический каталог]. — 2023.
5. ABB Ltd. Relion® Product Family – Protection and Control IEDs [Технический каталог]. — 2024.
6. Батталханов, А.З. Отдельные аспекты цифровизации энергетики, основные понятия, необходимость, готовность и воздействия на организации отрасли // Сборник материалов 2-й международной летней школы. — Астана: КазАТУ им. С.Сейфуллина, 2023. — С. 64–68.
7. Ковалев, А.В. Интеллектуальные энергосистемы: Учебник. – СПб.: Энерготех, 2022. – 480 с.
8. Министерство энергетики Республики Казахстан. Концепция интеллектуальной энергосистемы (Smart Grid) в Казахстане. — Астана, 2023.

Проектирование однопорогового компаратора с электронным ключом герконового реле РПГ-5

Захаров В.А., Малышев Н.А., Никифоров И.К.

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова»

Аннотация. В динамично развивающемся современном мире наблюдается общее усложнение энергосистем, что приводит к повышению мощности электростанций, классов напряжений линий электропередач и подстанций. Оборудование на энергетических объектах также становится более мощным, что означает серьезную опасность для технического персонала энергообъектов, а также экономические потери при аварийных ситуациях.

Предотвращение различных повреждений в энергосистеме является основной задачей релейной защиты. Исследование методов повышения эффективности, надежности и скорости срабатывания релейной защиты на сегодняшний день является одним из приоритетных направлений развития электроэнергетики.

Релейная защита, как известно, представлена тремя основными направлениями: электромеханической, электронной и микропроцессорной [1]. В нашем исследовании основное внимание уделено проектированию однопорогового компаратора с электронным ключом в составе герконового реле РПГ-5.

Герконовые реле являются электромагнитными устройствами, которые применяются в системах безопасности и автоматики, авиационных и космических системах, бытовых приборах. Конструкция типичного герконового реле представлена на рис. 1 [2-3].

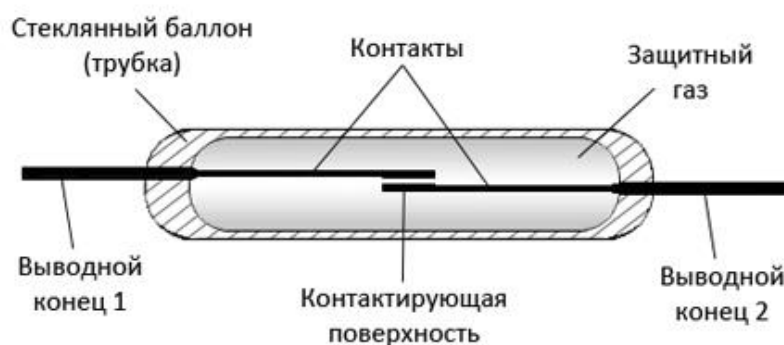


Рисунок 1 – Конструкция герконового реле

Для повышения эффективности срабатывания вышеупомянутого реле применяют особые устройства, сравнивающие сигнал измерительного тракта с опорным напряжением, т.е. с уставкой реле. В результате работы компаратора создается выходной сигнал с низким и высоким значением, что очень актуально в системах контроля и защиты от перенапряжений.

Однопороговые компараторы с электронным ключом являются важнейшими элементами в системах релейной защиты. Вопросы их проектирования, в частности, определение диапазона входного и выходного напряжений при срабатывании и подбора элементной базы требуют более детального рассмотрения [4-7].

Схема инвертирующего однопорогового компаратора с электронным ключом представлена ниже (рис. 2):

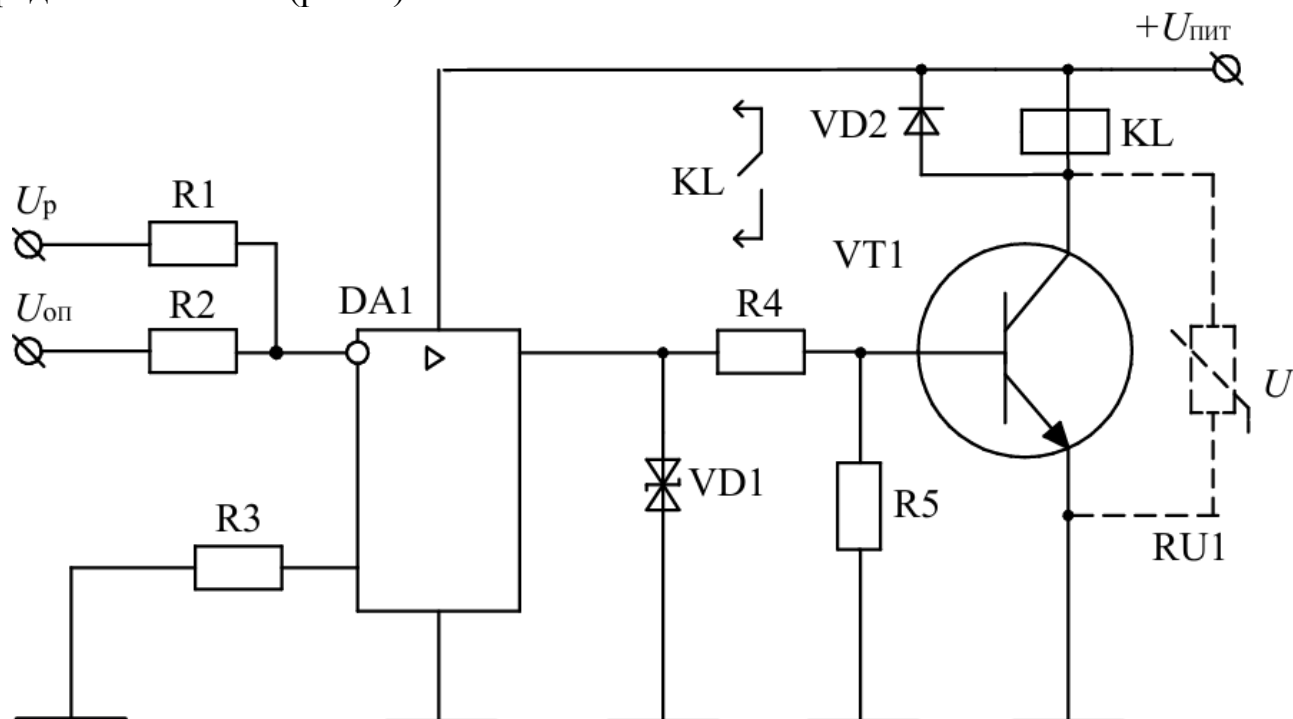


Рисунок 2 – Схема однопорогового компаратора с электронным ключом

В схеме используется операционный усилитель (ОУ) DA1 типа К140УД708, обозначение KL соответствует герконовому реле РПГ-5 с напряжением питания $U_{\text{пит}} = \pm 15 \text{ В}$ и током срабатывания $I_{\text{KL}} = 0,15 \text{ А}$. Уставка реле $U_{\text{оп}} = 2 \text{ В}$.

Найдем напряжение переключения в схеме:

$$U_{\text{пер}} = -U_{\text{оп}} (R_1/R_2). \quad (1)$$

Для определения номинального сопротивления резисторов R_1 и R_2 воспользуемся техническими условиями на ОУ К140УД708 [8]. Максимальное выходное напряжение $U_{\text{вых ОУ max}} = 10,5 \text{ В}$, коэффициент усиления напряжения $k_U = 30000$, разность входных токов $\Delta I_{\text{вх ОУ}} = 200 \cdot 10^{-9} \text{ А}$.

Тогда разность входного напряжения определяется по формуле:

$$U_{\text{вх ОУ}} = U_{\text{вых ОУ max}} / k_U = 10,5 / 30000 = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ В}.$$

Сопротивление на входе ОУ:

$$R_{\text{вх ОУ}} = \Delta U_{\text{вх ОУ}} / \Delta I_{\text{вх ОУ}} = 3,5 \cdot 10^{-4} / 200 \cdot 10^{-9} = 1,75 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Для уставки реле $U_{\text{оп}} = 2 \text{ В}$ зададимся сопротивлением $R_2 = 10 \text{ кОм}$. Тогда номинал резистора R_1 должен превосходить сопротивление на входе ОУ. Так как резисторы R_1 и R_2 соединены параллельно, то справедлива формула:

$$R_1 = \frac{R_2}{R_2 - R_{\text{exOY}}} = \frac{1,75 \cdot 10^7}{(10 - 1,75) \cdot 10^3} = 2,12 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

По справочным данным выбираем резистор R_1 : С2-33Н-0,25-2,15 кОм $\pm 2\%$ и R_2 : С2-33Н-0,25-10 кОм $\pm 2\%$.

Возвращаясь к формуле (1) находим напряжение переключения:

$$U_{\text{ПЕР}} = -U_{\text{ОП}} (R_1/R_2) = -2(2,15 \cdot 10 / 10^4) = -0,43 \text{ В.}$$

Считаем, что сопротивление R_3 совпадает с эквивалентным сопротивлением параллельно соединенных резисторов R_1 и R_2 , тогда:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2,15 \cdot 10}{2,15 + 10} = 1,77 \text{ кОм.}$$

Выбираем резистор С2-33Н-0,25-1,78 кОм $\pm 2\%$.

Необходимым условием работоспособности однопорогового компаратора является несовпадение полярностей входного напряжения и уставки реле, кроме того разность этих напряжений должна превосходить напряжение переключения. Условие запишем следующим образом:

$$|U_{\text{ВХ}}| \geq |U_{\text{ПЕР}} - U_{\text{ОП}}| \geq |-0,43 - 2| \geq 2,43 \text{ В.}$$

Для дальнейших расчетов принимаем $U_{\text{ВХ}} = \pm 2,5 \text{ В}$.

В момент переключения ОУ необходимо защита на напряжение не менее 10 В, выбираем двуханодный стабилитрон типа 2С105А.

Выбор биполярного транзистора VT1 производим из условия обеспечения включения обмотки катушки с током герконового реле РПГ-5 при резком скачке тока. Запишем формулу для тока коллектора в импульсном режиме и напряжения коллектор-эмиттер:

$$I_{\text{кVT1имп}} \geq k_1 \sqrt{2} I_{\text{н}}, \quad (2)$$

$$U_{\text{кэVT1обрmax}} \geq 2\sqrt{2} U_{\text{пит}}. \quad (3)$$

Ток срабатывания реле РПГ-5 $I_{\text{KL}} = 0,15$ меньше 1А, следовательно, коэффициентом учета тока можно пренебречь, тогда можно подставить численные значения в соотношения (2), (3).

$$I_{\text{кVT1имп}} \geq \sqrt{2} \cdot 150 \cdot 10^{-3} = 0,21 \text{ А.} \quad (4)$$

$$U_{\text{кэVT1обрmax}} \geq 2\sqrt{2} \cdot 15 = 42,43 \text{ В.} \quad (5)$$

Выбираем транзистор с положительной полярностью включения (npn-типа).

Согласно условиям (4), (5) выбираем биполярный транзистор КТ3102АМ. Коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером $h_{21э\text{min}} = 100$, напряжение база-эмиттер $U_{\text{бэVT1}} = \text{В}$.

С учетом справочных данных и тока срабатывания реле находим ток базы транзистора VT1:

$$I_{\text{бVT1}} = \frac{I_{\text{KL}}}{h_{21э\text{min}}} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{100} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Найдем сопротивление R_4 из условия требуемого тока базы транзистора VT1:

$$R_4 \leq (U_{\text{вых ОУ max}} / I_{\text{б VT1}}) \leq 10,5 / 1,5 \cdot 10^{-3} \leq 7 \text{ кОм.}$$

Выбираем резистор С2-33Н-0,25-5,6 кОм $\pm 5\%$.

Для определения номинала резистора R_5 воспользуемся условием:

$$U_{\text{бэотс VT1}} = U_{\text{вых ОУ max}} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R} \leq U_{\text{бэ VT1 max}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{бэотс VT1}}$ – напряжение база-эмиттер в режиме отсечки, В; $U_{\text{бэ VT1 max}}$ – максимальное напряжение база-эмиттер, В.

В поставленной задаче $U_{\text{бэ VT1}} = U_{\text{бэ VT1 max}} = 5 \text{ В}$, $U_{\text{бэотс VT1}}$ принимаем равным 2,5 В

Тогда можем подставить в формулу (6) численные значения и сделав элементарные преобразования получим:

$$R_5 = (U_{\text{вых ОУ max}} - |U_{\text{бэотс VT1}}| R_4 / |U_{\text{бэотс VT1}}|) = 10,5 - 2,5 \cdot 5,6 \cdot 10^3 / 2,5 = 5595,8 \text{ Ом.}$$

По результатам расчетов можно сделать вывод, что в качестве сопротивления R_5 можно использовать резистор С2-33Н-0,25-6,8 кОм $\pm 1\%$.

Проверим выбранные резисторы R_4 и R_5 на соответствие условию по обеспечению максимального напряжения база-эмиттер VT1 по (6):

$$U_{\text{бэ VT1 max}} = 5 \geq \frac{10,5 \cdot 5,6 \cdot 10^3}{(5,6 \text{ } 6,8) \cdot 10^3} \geq 4,74 \text{ В.}$$

Таким образом, сопротивления R_4 и R_5 выбраны корректно.

Для выбора диода VD2 справедлива условия (4), (5) выбираем диод КД205Б (0,3 А, 400 В) [8].

Варистор RU1 применяется опционально при токе нагрузке свыше 2 А. В условиях нашей задачи, когда $I_{\text{KL}} = 0,15 \text{ А}$ применение варистора не требуется.

По результатам расчетов построим выходную характеристику исследуемого инвертирующего однопорогового компаратора с электронным ключом (рис. 3):

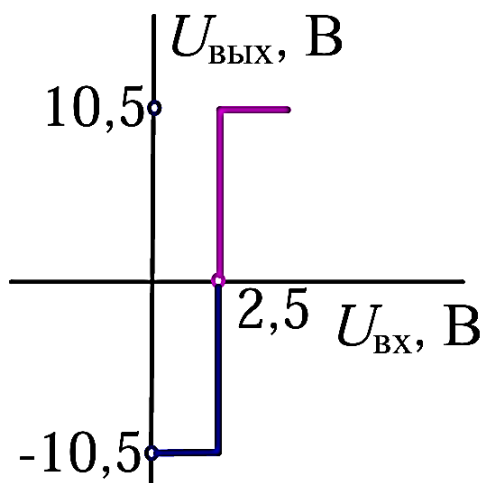


Рисунок 3 – Выходная характеристика

Таким образом, определен диапазон входного напряжения при срабатывании реле и подобрана элементная база схемы.

Отметим, что рассмотренная схема инвертирующего однопорогового компаратора с электронным ключом, не смотря на целый ряд положительных свойств, таких как многофункциональность, хорошая совместимость с различными логическими схемами, аналоговыми и цифровыми сигналами [9], точность и стабильность срабатывания, экономическая выгода, обладает определенными недостатками. К таким минусам классической схемы однопорогового компаратора относится дребезг выходного сигнала – многократные быстрые переключения вблизи низших и высших значений. Для борьбы с этим явлением в схему вводят положительную обратную связь и получают модификацию однопорогового компаратора с гистерезисом (рис. 4).

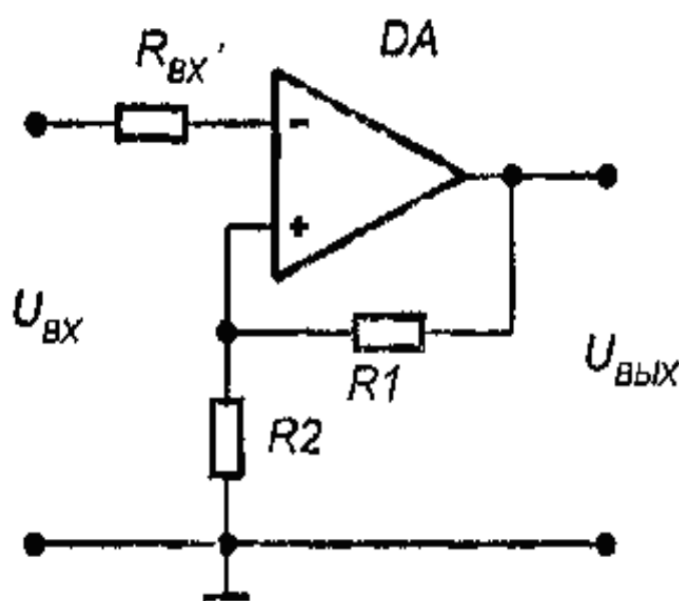


Рисунок 4 – Схема однопорогового компаратора с гистерезисом

Схемотехническое решение (рис. 4) позволяет получить двойной порог срабатывания, что повышает стабильность срабатывания реле, повышает устойчивость к электрическим помехам (шумам) и устраняет дребезг выходного сигнала.

Таким образом, не смотря на положительные стороны стандартной схемы инвертирующего однопорогового компаратора с электронным ключом на ОУ, необходима разработка более стабильных и эффективных схемотехнических решений для сравнивающих органов систем релейной защиты. Однако методика подбора элементной базы, представленная выше, не теряет своей актуальности и при разработке современных схем и может использоваться при проектировании однопороговых компараторов для электронной релейной защиты нового поколения [10-13].

Библиографический список

1. Чебоксарский кластер – современная релейная защита для всей страны // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 6(51). – С. 6-11.
2. Электрические аппараты: Учебник и практикум / П. А. Курбатов, Е. Г. Акимов, А. Г. Годжелло, В. Е. Райнин. – 1-е изд. – Москва: Издательство Юрайт, 2024. – 250 с.
3. Зайцев Ю.М. Исследование геркона с короткозамкнутым витком / Ю.М. Зайцев, Н. Н. Николаев, Ю. В. Софронов // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 75-82.
4. Никитин А. А., Шамис М. А. Элементы электронных электрических аппаратов: Учеб. пособие. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2004. – 483 с.
5. Шопен Л. В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики. Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
6. Петков Р. Э. Обратногодовой преобразователь с быстродействующей схемой управления / Р. Э. Петков, А. И. Ишемгузин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 1. – С. 125-134. DOI 10.17122/1999-5458-2023-19-1-125-134.
7. Борисенко Д. Н. Защита цепей питания постоянного тока от короткого замыкания в нагрузке / Д. Н. Борисенко, А. А. Жохов, Б. С. Редькин // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 10. – С. 980-988. DOI 10.31857/S0033849421100065.
8. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Ф.И. Барсуков, И.А. Болонин, Н.Ф. Вавилов и др.; под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. – М.: Энергия, 1977. – 575 с
9. Соловьева О.А. Использование цифровых технологий в совершенствовании алгоритмов работы релейной защиты / О.А. Соловьева, В.П. Манчевская // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 2(12). – С. 177-181.
10. Переходный процесс при конечном времени коммутации: нейростевой контроль / А. Л. Славутский, О. Н. Андреев, Н. В. Руссова, Н. А. Галанина // Электротехника. – 2024. – № 8. – С. 46-50.
11. Rajora R., Sharma K., Sharma A.. 1-Bit Comparator Designed by Multithreshold FinFET based Sleep Transistor Technique in 18nm. In: International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE), Ballar, India, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICDCECE57866.2023.10151417.
12. Karantaev V.G., Latyshov K.V., Mikhailov D.O. Analysis and Formation of Requirements for the Role-Based Access Control Policy in the Operating Systems of the Intelligent Electronic Device Relay Protection and Automation. In: 6th International Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-13. DOI: 10.1109/RPA59835.2023.10319854.
13. Burdukov I. A Method for Improving Relay Protection and Coordination in Distributed Generation Systems Using Automatic Circuit Reclosers. In: IEEE

УДК 531.768

Организация плавки гололёда переменным током на проводах воздушных линий

Исмагилов Ф.Р., Янгиров И.Ф., Кудрявцев Н.С., Ахмеджанова Э.Р.
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

Аннотация. Плавка гололёда переменным током является наиболее простым и доступным способом активного метода борьбы с гололёдом в электрических сетях. В статье кратко изложены рекомендации по организации плавки гололёда на проводах воздушных линий электропередач напряжением 6-220 кВ. В конце статьи приведен пример расчёта по осуществлению плавки гололёда на проводах двухцепной воздушной линии напряжением 110 кВ.

Образование гололёда на проводах воздушных линий может привести к тяжёлым последствиям. Можно вспомнить Сочинские события 2001, 2003 и 2007 годов. А также события в Подмоскovie в декабре 2010 года.

Причем московские события показали, что гололёд начал появляться там, где раньше не наблюдался. К примеру, центральная часть России, не подвергалась ранее гололёдно-ветровой атаке. Соответственно, и воздушные линии строились в этом регионе без учёта возможных гололёдных нагрузок. Это выражается тем, что в проекты существующих воздушных линий не закладывались пассивные (усиленная конструкция опор) и активные (плавка гололёда на проводах и грозотросах) противогололёдные мероприятия. В дальнейшем с высокой долей вероятности можно прогнозировать, что подобные события будут повторяться. И не только в центральном регионе России, но и в других регионах, ранее не подверженных этому явлению.

В связи с этим уже сейчас необходимо разрабатывать соответствующие мероприятия для предотвращения разрушительных последствий гололёдно-ветровых нагрузок на провода воздушных линий. К примеру на вновь проектируемых ВЛ возможно предусматривать проектом опоры, конструкция которых рассчитана на длительное воздействие гололёдно-ветровых нагрузок.

На существующих ВЛ возможно организовать плавку проводов и грозозащитных тросов постоянным и переменным токами. Плавка постоянным током наиболее предпочтительна ввиду уменьшения потерь мощности при протекании постоянного тока по проводам и, следовательно, возможности одновременно большего охвата количества линий, которых можно подвернуть плавке. Однако осуществление плавки гололёда постоянным током является довольно затратным мероприятием. При таком способе плавки необходимо разместить на подстанции УПГ и дополнительно силовой спецтрансформатор

для его питания. Кроме того, потребуется соорудить шины плавки гололёда и ряд однофазных разъединителей для возможности сборки различных схем плавки («фаза – две фазы», «змейка» и т.д.). Однако при таком способе плавки мощность плавки будет значительно меньше и проплавить можно линию большой длины, поскольку при протекании постоянного тока отсутствует реактивная составляющая сопротивления провода (грозотроса).

С точки зрения экономики наименее затратным является осуществление плавки гололёда переменным током. Для организации такой плавки потребуется лишь сооружение шин плавки гололёда и установка ячейки с выключателем и разъединителем на территории ПС, с которой будет производиться плавка.

Общая часть. Указанное оборудование для плавки выбирается в соответствии с напряжением плавки, величина которого определяется расчётами. Кроме напряжения плавки необходимо рассчитать время плавки. Это время необходимо знать во избежание воздействия токов плавки на провода, с которых уже отпал гололёд. Излишнее воздействие токов плавки на провод приводит к высыханию смазывающего состава между алюминиевыми проволоками и стальным сердечником, истиранию алюминиевых проволок, коррозии сердечника и обрыву провода. Также необходимо рассчитать длину проплавляемого участка. Этот параметр даёт возможность определить участок воздушной линии, эффективно проплавляемый заданным током плавки, а также место установки закорачивающего разъединителя или подключения ПЗ.

Математическое моделирование. Подводя итоги вышесказанному нужно отметить, что организация плавки переменным током включает в себя следующие технико-аналитические мероприятия:

1. Определение пучка воздушных линий, на которых необходимо осуществлять плавку гололёда, выделение на этих ВЛ наиболее гололёдоопасных участков, опираясь на многолетний опыт эксплуатации этих ВЛ (желательно не менее 25 лет). Если такого опыта нет (гололёд за это время не наблюдался, или почти не наблюдался), необходимо выделить воздушные линии, с которых питаются наиболее ответственные потребители;

2. Оценка возможности выполнения плавки гололёда на заданном участке одной или нескольких воздушных линий, рассматривая в качестве источников питания, существующие силовые трансформаторы, установленные на прилегающих подстанциях. Мощность одного силового трансформатора должна быть не меньше суммарной мощности подключённых потребителей и мощности, необходимой для выполнения плавки гололёдного участка ВЛ:

$$I_{\text{тр}} \geq I_{\text{потр}} + I_{\text{пл}}$$

Мощность трансформаторов, установленных на подстанции известна. Также известна мощность, отходящая к потребителям с этой подстанции. Необходимо определить мощность плавки гололёда, которая определяется по формуле:

$$P_{\text{пл}} = U_{\text{пл}} \cdot I_{\text{пл}}$$

Определение значений $U_{\text{пл}}$ и $I_{\text{пл}}$ приводится ниже;

3. Оценка возможности включения закорачивающего разъединителя (установки ПЗ) в расчётном месте воздушной линии для прохождения тока плавки от источника питания до места замыкания.

Далее для каждой ВЛ определяется напряжение плавки $U_{пл}$. Этот параметр, как правило соответствует стандартному напряжению подстанции (обычно 3 – 35 кВ для плавки гололёда на ВЛ до 220 кВ, и 110 кВ – для ВЛ 330 кВ и выше). При соответствии стандартному напряжению подстанции отпадает необходимость в установке дополнительного спецтрансформатора для осуществления плавки.

Далее рассчитывается длина проплавляемого участка ВЛ. Ток плавки для каждого сечения провода известен и даётся в виде таблиц в [2] и [3]. Длина проплавляемого участка должна быть такой, чтобы протекающий ток плавки примерно соответствовал табличному значению тока плавки для данного сечения провода. В противном случае гололёд либо не проплавится (при токе плавки, меньшем допустимого), либо произойдёт перегрев и, возможно, повреждение провода (при токе плавки, большем допустимого).

Выполнение плавки гололёда на грозотросе имеет ряд отличительных особенностей. Во-первых, плавка происходит при неполнофазном режиме: однофазном коротком замыкании (при одном грозотросе на ВЛ), либо двухфазном КЗ (при наличии двух тросов на ВЛ). Во-вторых, грозотрос должен быть изолирован от тросостойки опоры (как правило, подвесными стеклянными, или полимерными изоляторами) и количество изоляторов в гирлянде, а также тип самой изолирующей гирлянды должны соответствовать подаваемому напряжению плавки (подробности осуществления плавки гололёда на грозотросе будут рассмотрены позднее).

В заключении даётся вывод о возможности осуществления плавки на данной ВЛ с указанием напряжения плавки, полного электрического сопротивления проплавляемого провода, длины проплавляемого участка, месте включения закорачивающего разъединителя и другие данные.

Вот один из примеров расчёта плавки гололёда на ВЛ 110 кВ.

Необходимо рассчитать ток и время плавки для линии длиной 101,41 км. Линия тупиковая с одним источником питания от крупной узловой подстанции 1. От линии питаются пять потребительских подстанций с порядковыми номерами от 2 до 6. С целью упрощения проводимого анализа всем подстанциям вместо их реальных названий присвоены порядковые номера. Способ подключения подстанций к линии – шлейфовым заходом или отпайкой – может быть различным и ток (мощность) плавки при этом не изменят своего значения. В данном случае важно расстояние от источника питания до подстанций 2 – 6, а также расстояние между самими подстанциями. Основной потребитель с ПС 2... 6 – объекты нефтедобычи, а также бытовые потребители.

Расчет системы плавки гололёда на ВЛ 110 кВ Дёма – Кушнаренково.

Параметры ВЛ (данные взяты со службы линии предприятия):

1. Длина 101,41 км, в том числе участки, км:
участок 1 – 2 – 11,96;

- 2 – 3 – 7,15;
 3 – 4 – 21,2;
 4 – 5 – 28,3;
 5 – 6 – 32,8

2. Количество цепей – 2.

3. Провод АС-120/19

Опоры

анкерные: У2, У6, У35-2, У110-2, У110-4, УС110-8

промежуточные: ПБ26, ПБ30, ПБ110-2, ПБ110-8

Среднее геометрическое расстояние между проводами каждой фазы

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{CA}} = \sqrt[3]{3,35 \cdot 3,35 \cdot 6} = 4,07 \text{ м}$$

4. Максимальные и минимальные токи плавки для проводов АС-120/19 при скорости ветра $v=0$ м/с и температуре воздуха $t=-10 \div 0^\circ\text{C}$:

АС-120/19: $580 \div 504$ А; [2], табл.4.4

Средний ток плавки: АС-120/19: 550 А;

$$U_{пл} = \sqrt{3} \cdot I_{пл} \cdot Z_{ВЛ} \quad (1)$$

Дальнейшие расчёты выполнены в соответствии с формулами, приведёнными в [2], [3].

Полное сопротивление линии, или комплексное сопротивление контура «три фазы – земля»:

$$Z_{ВЛ} = l_{ВЛ} \left(\frac{1}{3} R_{пр.уд} + R_{з.уд} + j0,145 \cdot \lg \frac{D_3}{\sqrt[3]{r \cdot D_{cp}^2}} \right) + R_{\Sigma_3}; \quad (2)$$

где $l_{ВЛ}$ - длина проплавляемого участка ВЛ,

$R_{пр.уд} = R_{0уд} = R_{20уд} (1 - \beta \cdot 20^\circ)$ - сопротивление провода постоянному току при $t=0^\circ\text{C}$,

$\beta=0,004$ 1/°C – температурный коэффициент сопротивления.

$R_{20уд}=0,249$ Ом/км, $R_{0уд}=0,249 (1-0,004 \cdot 20^\circ)=0,229$ Ом/км,

$R_{з.уд}=0,05$ Ом/км активное сопротивление земли для частоты тока сети 50

Гц,

$D_3=1000$ м – среднее значение эквивалентной глубины возврата тока через землю. Таким значение принимается при отсутствии данных о фактической проводимости земли по трассе ВЛ,

$r=7,6$ мм – радиус провода АС-120/19,

$D_{cp}=4,07$ м – среднегеометрическое расстояние между проводами одной цепи,

$R_{\Sigma_3}=4$ Ом – расчётное суммарное сопротивление заземлителей на ПС.

Отсюда полное сопротивление линии при плавке 3-фазным переменным током при длине ВЛ 101,41 км равно:

$$Z_{ВЛ} = 101,41 \left(\frac{1}{3} \cdot 0,229 + 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{1000}{\sqrt[3]{7,7 \cdot 10^{-3} \cdot 4,07^2}} \right) + 4 = 54,2 \text{ Ом}$$

Напряжение плавки для всей линии:

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

$$U_{пл} = \sqrt{3} \cdot 550 \cdot 54,2 = 51,6 \text{ кВ.}$$

Сопротивления и напряжения плавки по участкам ВЛ.

$$Z_{вл1-2} = 11,96 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 0,229 + 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{1000}{\sqrt[3]{7,7 \cdot 10^{-3} \cdot 4,07^2}} \right) + 4 = 9,9 \text{ Ом;}$$

$$U_{вл1-2} = \sqrt{3} \cdot 550 \cdot 9,92 = 9,45 \text{ кВ}$$

Аналогично рассчитываются сопротивления и напряжения плавки по остальным участкам. Полученные результаты заносятся в таблицу. В каждой ячейке сверху вниз занесены: расстояние между участками, км; полное сопротивление участка линии, Ом; напряжение плавки для данного участка, кВ.

При этом

Ток плавки (среднее значение – предварительно): 550 А,

Температура воздуха (среднее значение): -5°C,

Скорость ветра: 0 м/с,

Марка провода: АС-120/19

Участки	1	2	3	4	5	6
1		11,96 9,92 9,45	19,11 13,46 12,82	40,51 24,0 22,82	68,61 37,9 36,18	101,41 54,2 51,7
2	11,96 9,9 9,45		7,15 7,54 7,18	28,35 18,04 17,18	56,65 32,06 30,54	89,45 48,3 46,01
3	19,11 13,46 12,82	7,15 7,54 7,18		21,2 14,5 13,81	49,5 28,52 27,17	82,3 44,76 42,64
4	40,51 24,0 22,82	28,35 18,04 17,18	21,2 14,5 13,81		28,3 18,02 17,17	61,1 34,26 32,64
5	68,61 37,9 36,18	56,65 32,06 30,54	49,5 28,52 27,17	28,3 18,02 17,17		32,8 20,24 19,28
6	101,41 54,2 51,7	89,45 48,3 46,01	82,3 44,76 42,64	61,1 34,26 32,64	32,8 20,24 19,28	

Составленная таким образом таблица весьма удобна при выполнении дальнейших расчётов. Из таблицы видно какое напряжение плавки необходимо для каждого из участков. Например, можно сделать вывод, что для участка линии от ПС2 до ПС3, длина которого 11,96 км достаточно напряжение плавки величиной 9,45 кВ.

После того как определены напряжения плавки необходимо определить время, в течение которого будет проплавляться провод на искомом участке линии.

Время плавки

$$t_{пл} = \frac{31,3001}{s \left(\frac{I_{пл}}{I_{(40)6}} \right)^2 - 0,2178}, \quad (3)$$

где $I_{(40)б} = 0,65 \cdot I_{М.Д.б}^{(90)} = 0,65 \cdot 771 = 501A$ – базовое значение тока 40-минутной плавки для провода АС-120/19,

$I_{М.Д.б}^{(90)} = 771A$ – базовое значение максимально допустимого тока по условию сохранения механической прочности провода,

$s = \frac{1}{s_3 + s_4 \cdot \sqrt{v}} = \frac{1}{0,8401 + 0,1152 \cdot \sqrt{0}} = \frac{1}{0,8401} = 1,19$ – коэффициент, определяемый из условия при любом ветре, толщине стенки 10, 20,30,40 мм и заданной температуре воздуха $t_B = -5; -10^\circ C$.

$S_3 = 0,8401, s_4 = 0,1152$ – определяется из табл.3.5, с.88 (Л-3).

Отсюда

$$t_{пл} = \frac{31,3001}{0,8401 \left(\frac{550}{501} \right)^2 - 0,2178} = 39,4 \text{ мин.}$$

Максимально допустимые токи плавки

- при ветре перпендикулярном проводу

$$I_{доп}^{(90)} = \left[1,5783 + 0,4473 (\ln t_{пр.доп})^2 \right] \sqrt{\frac{\sqrt{d_{пр}}}{R_0} \left[1,0002 + \left(0,007 - \frac{1}{t_{пр.доп}} \right) \cdot t_B \right]} \cdot \sqrt{0,1198 + 0,6226 \sqrt{v}} \quad (4)$$

- при ветре параллельном проводу

$$I_{доп}^{(0)} = \left[1,1241 + 0,3531 (\ln t_{пр.доп})^2 \right] \sqrt{\frac{\sqrt{d_{пр}}}{R_0} \left[1,0004 + \left(0,0012 - \frac{1}{t_{пр.доп}} \right) \cdot t_B \right]} \cdot \sqrt{0,1980 + 0,5668 \sqrt{v}} \quad (5)$$

Для Башкирии наиболее вероятными (средними) сочетаниями метеоусловий и плотности отложения являются:

гололёд $\rho = 0,75 \text{ г/см}^3, v = 7 \text{ м/с}, t = -1^\circ C$ [2, с.39]

Исходя из этих средних региональных сочетаний максимально допустимые токи плавки для провода АС-120/19

- при ветре перпендикулярном проводу

$$I_{доп}^{(90)} = \left[1,5783 + 0,4473 (\ln 40)^2 \right] \sqrt{\frac{\sqrt{1,52}}{0,229 \cdot 10^{-3}} \left[1,0002 + \left(0,007 - \frac{1}{40} \right) \cdot t_B \right]} \cdot \sqrt{0,1198 + 0,6226 \sqrt{7}} = 747A$$

- при ветре параллельном проводу

$$I_{доп}^{(0)} = \left[1,1241 + 0,3531 (\ln 40)^2 \right] \sqrt{\frac{\sqrt{1,52}}{0,229 \cdot 10^{-3}} \left[1,0004 + \left(0,0012 - \frac{1}{40} \right) \cdot t_B \right]} \cdot \sqrt{0,1980 + 0,5668 \sqrt{7}} = 567A$$

Действительный ток плавки для данной линии при температуре воздуха $t = -5^{\circ}\text{C}$ определяется в соответствии с [2], с.36:

$$\frac{I}{\lg(-)} \left[D \frac{(-)}{1\sqrt{vD}} \right] (4 \quad (-) \quad 1) \quad (0 \quad) \cdot (\Delta \quad 3), \quad (6)$$

где I – ток плавки, А;

$R = 0,23$ Ом – сопротивление 1 м провода при 0°C ;

$t = 0,66$ ч – длительность плавки для данной ВЛ, см. (3);

$D = 4,52$ см – внешний диаметр отложения;

$d = 1,52$ см – диаметр провода;

$\gamma = 0,75$ г/см³ – плотность отложения;

$v = 7$ м/с – скорость ветра;

$b = 1,5$ см – толщина стенки отложения;

$= 0,324$ кг/м - масса алюминиевой части провода [4], прил.1, табл.2;

$= 0,147$ кг/м - масса стальной части провода [4], прил.1, табл.2;

$\theta = 5^{\circ}\text{C}$ – разность температур между температурой провода и температурой воздуха.

Подставляя известные значения в формулу, находим значение действительного тока плавки:

$$I = 544 \text{ А,}$$

Что приблизительно равно предварительно выбранному среднему значению (550 А) и не превышает допустимых значений (747А и 567А).

Выводы

1. ПС 1.

С ПС1 возможно проплавить участки 1 – 2, 1 – 3 напряжением 10 кВ.

Участок 1 – 4.

$$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \quad \frac{\sqrt{3}}{(90)}$$

Участок 1 – 4 невозможно проплавить стандартными напряжениями 10 и 35 кВ. Необходима установка спец трансформатора с выходным напряжением ≈ 23 кВ.

Участок 1 – 5 возможно проплавить напряжением 35 кВ.

Участок 1 – 6. Необходима установка спец трансформатора с выходным напряжением ≈ 52 кВ.

2. ПС 2.

С ПС2 возможно проплавить участок 2 – 3 напряжением 10 кВ.

Участок 2 – 4. Необходим специальный трансформатор ≈ 23 кВ.

Участок 2 – 5 возможно проплавить напряжением 35 кВ.

Участок 2 – 6. Необходим специальный трансформатор ≈ 52 кВ.

3. ПС 3.

Участок 3 – 4. Необходим специальный трансформатор ≈ 23 кВ.

Участок 3 – 5 возможно проплавить напряжением 35 кВ.

Участок 3 – 6. Необходим специальный трансформатор ≈ 52 кВ.

4. ПС 4.

Участок 4 – 5. Необходим специальный трансформатор ≈ 23 кВ.

Участок 4 – 6 возможно проплавить напряжением 35 кВ.

5. ПС 5.

Участок 5 – 6. Необходим специальный трансформатор ≈ 23 кВ.

Согласно приведённых расчётов и выводов, а также с экономической точки зрения, оптимальным вариантом является организация плавки гололёда на заданной ВЛ-110 кВ по следующей схеме:

1. На ПС4 установка ячейки 35 кВ для плавки гололёда в направлении ПС 5 и ПС 6 с включением заземляющих ножей на линейном разъединителе (наложением ПЗ) на ПС 6.

2. На ПС1 установка ячейки 35 кВ для плавки гололёда до ПС 4 с включением заземляющих ножей на линейном разъединителе (наложением ПЗ) на ПС 5.

Отсюда видно, что по участку 4 – 5 ток плавки будет протекать в обоих случаях: и при плавке с ПС1, и при плавке с ПС4. То есть, при образовании гололёда, например на участке 4 – 6, возникает необходимость осуществления плавки с ПС1 и с ПС4 одновременно. Одновременная плавка с этих двух подстанций в данном случае, по понятным причинам, не выполнима. Однако, практика показывает, что образование гололёда на таком протяжённом участке одновременно бывает крайне редко. И поэтому, необходимость синхронного выполнения плавки гололёда с ПС1 и с ПС4 маловероятна. При возникновении, всё же, такого случая плавку гололёда можно осуществлять последовательно, начиная с наиболее гололёдоопасного участка.

Библиографический список

1. Руководящие указания по плавке гололёда на воздушных линиях электропередачи. М. ВНИИЭ. 1969.

2. Рудакова Р.М., Вавилова И.В., Голубков И.Е. Методы борьбы с гололёдом в электрических сетях энергосистем. Уфа. УГАТУ. ОАО «Башкирэнерго». 2005.

3. Левченко И.И., Засыпки А.С., Алилуев А.А., Сацук Е.И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололёдных районах. М. МЭИ. 2007.

4. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередач.

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Научное издание

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

Материалы

*Международной научно-практической конференции
(г. Уфа, 1–3 октября 2025 г.)*

Электронное издание сетевого доступа

*За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.*

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 19.03.2026 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 5,10 Мб.
Заказ 22.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: ric-bdu@yandex.ru