

XII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ФОРУМ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

XII Международная научно-практическая конференция

Инновационные перспективы Донбасса

XII Международная научно-практическая конференция
Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса



XVII Международная научно-техническая конференция
Информатика, управляющие системы, математическое и компьютерное моделирование



XXVI Международная научно-техническая конференция
Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых



I Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов
Инженерные технологии XXI столетия глазами молодых

Том 2. Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ ДНР
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ ДНР
МИНИСТЕРСТВО ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ДНР

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ИНСТИТУТ ДонНТУ (г. Горловка)
ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им.
М.ГОРЬКОГО
ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
НИИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО ПАРТНЕРСТВА ГОСУДАРСТВА И БИЗНЕСА
ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ СОЮЗ РАБОТНИКОВ ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ДОНЕЦКИЙ БОТАНИЧЕСКИЙ САД
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ ДонНТУ
ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНСТИТУТ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ДОНГИПРОШАХТ
ДОНЕЦКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА
МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО
БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ИННОВАЦИОННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОНБАССА

**Материалы 12-й Всероссийской научно-
практической конференции
Том 2. Перспективы развития
электротехнических, электромеханических и
энергосберегающих систем.**

**г. Донецк
26-28 мая 2026 года**



Донецк – 2026

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

ББК 65.30

УДК 330.341 (477.61/62)

И
66
Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 26-28 мая 2026 г. —
Донецк: ДонНТУ, 2026.
Т. 2: 2. Перспективы развития электротехнических,
электромеханических и энергосберегающих систем. — 2026. — 259 с.

Представлены материалы 12-й Всероссийской научно-практической конференции —Инновационные перспективы Донбасса, состоявшейся 26-28 мая 2026 г. в Донецке на базе ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», включающие доклады ученых и специалистов по вопросам приоритетных направлений научно-технического обеспечения инновационного развития Донбасса и формирования механизмов повышения социально-экономической эффективности развития региона.

Материалы предназначены для специалистов народного хозяйства, ученых, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Редакционная коллегия

Ректор ДонНТУ А.Я. Аноприенко, ректор ДонГТУ Д.А. Вишневский, директор АНО «НИЦ стратегического партнерства государства и бизнеса» О.Ф. Шахов, канд. техн. наук А.Н. Корчевский, канд. техн. наук О.Л. Кизияров, канд. техн. наук А.А. Булгаков, канд. техн. наук Д.И. Морозов, д-р техн. наук С. П. Еронько, канд. техн. наук А.М. Зинченко, канд. техн. наук С.В. Горбатко, канд. фарм. наук В.С. Федорова, канд. техн. наук А.А. Кравченко, д-р экон. наук Я.В. Хоменко, рег. представ. Студ. комит. И.А. Хоменко, канд. техн. наук И.В. Филатова, канд. техн. наук Д.В. Пронский, канд. техн. наук Р.В. Мальчева, докт. экон. наук Е.Е. Бизянов, председатель Совета молодых ученых ДонНТУ М.П. Руденко.

Под общей редакцией Захарова Андрея Владимировича

Контактный адрес редакции

УНИ ДонНТУ, ул. Артема, 58, Донецк, 283001

Тел.: +7 (856) 305-35-67. Эл. почта: ipd.donntu@yandex.ru

Интернет: <http://ipd.donntu.ru>

© ФГБОУ ВО —Донецкий национальный технический университет|
Министерство образования и науки ДНР, 2026

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

СОДЕРЖАНИЕ

А.А. Орлов, А.Д. Авдеев, В.М. Щербаков. Повышение надёжности электропитания критической инфраструктуры энергообъектов за счёт интеллектуального мониторинга и резервирования аккумуляторных батарей	6
М.Л. Балюра, О.Е. Мельник. Исследование способов плавления гололеда в распределительных электрических сетях Херсонской области.....	12
И.А. Баннов, Я.А. Воронин, Н.А. Коренев, М.В. Бурмейстер, Д.К. Чесноков, Ю.Д. Кавойков. Применение систем накопления электроэнергии для регулирования напряжения в распределительных электрических сетях	17
Д.А. Белов, Т.П. Кулишова. Проблемы и перспективы водородной энергетики ..	22
Т.Д. Биктимиров, М.С. Велюханов, К.Е. Трофименко, А.В. Захаров. Разработка демонстрационного стенда на базе аватара руки	27
И.А. Борисов, А.А. Житинская, А.Р. Саттаров, Н. Н. Малышева. Разработка учебного стенда защита электродвигателя на базе терминала БМРЗ-0,4ВВ.	31
О.Г. Брюнина. Децентрализованное теплоснабжение донбасса от мини тэц на базе газопоршневых установок	35
Д.В. Полковниченко, А.А. Барыкин. Сравнительный анализ способов получения водорода в условиях Донбасса.....	38
В.Г. Черников, И.В. Власик. Разработка метода оценки энергоэффективности ветрогенераторной установки	43
Я.А. Воронин, Р.В. Булатов, И.А. Баннов, Н.А. Коренев, Ф.А. Чудин. Применение систем накопления электроэнергии для увеличения мощности технологического присоединения в распределительных электрических сетях.....	51
Н.В. Воюш, Е.Д. Гвоздовский, И.А. Леонович, Я.В. Жевнеров, А.А. Широчин. Обеспечение информационной прозрачности режимов белаэс как фактор обоснования внедрения СИМ в энергосистеме Беларуси.....	56
Е.Д. Губина, П.Н. Кузнецов, А.В. Губин, Б.А. Андреев Термографический мониторинг тепловых сетей и зданий с использованием БПЛА	60
С.А. Глазунова, Ю.И. Макаров. Как машины изменили домашний быт: технологическая трансформация повседневной жизни от стиральных машин до роботов-пылесосов	63
А.С. Гнителива, А.Б. Бирюков, П.А. Гнителив. Экспресс-система диагностирования присосов воздуха в топочную камеру котла.....	70
Д.В. Полковниченко, Ю.С. Дорофеева, Д.В. Ковалёв. Исследование опыта использования передачи постоянного тока	74
А.А. Булгаков, Б.А. Дворецкий. Моделирование статической устойчивости простейшей электрической системы	88
С.С. Данилов, Д.Н. Мирошник. Разработка автомобильного сканера для считывания параметров автомобиля на базе платформы Ардуино.....	93

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Г.М. Емелин. Оптимизация восстановления лэп и подстанций: модульные решения для быстрого развёртывания в зоне активной реконструкции	97
Б.Г. Ермоленко, Д.В. Бажутин. Разработка двухосевого роботизированного комплекса с применением технического зрения	102
M.V. Zhyr, A.V. Zhyr A.A. Chushkov, O.A. Kravchenko. Problems and prospects of a space-based solar power station (SBSP)	107
В.П. Заярный, А.А. Широчин, Я.В. Жевнеров, И.А. Леонович, Е.Д. Гвоздовский. Удаленное управление электросистемами дома с помощью приложения Virtuino ModBus	111
И.А. Земсков, М.В. Бурмейстер, И.И. Бердышев, Д.К. Чесноков. Применение систем виртуальной инерции для повышения автономности работы собственной генерации промышленного объекта	115
А.Д. Иваницкий, М.В. Бурмейстер, В.А. Пронина, И.И. Бердышев, Ю.Д. Кавойков. Разработка физической модели системы автоматического управления силового преобразователя со статизмом по частоте	120
О.А. Кайфель. Реконструкция системы электроснабжения генического городского округа на основе возобновляемых источников энергии.....	125
Б.А. Калиниченко, Д.В. Бажутин. Разработка методики обмена данными с внешним вычислительным устройством с поддержкой фреймворка ROS2	128
М.В. Канчукова. Энергосберегающие технологии в АСУ ТП: Состояние и тенденции	133
В.В. Касиянчук, Д.В. Бажутин. Разработка алгоритма следования за объектом для мобильного робота	138
Н.А. Коренев, Я.А. Воронин, И.А. Баннов, М.В. Бурмейстер, Р. В. Булатов. Оценка целесообразности применения самонесущего провода МИПг-5 3х2,5-10 кВ в сельских распределительных сетях 6-10 кВ.....	143
А.А. Булгаков, Д. В. Костюк, Э. Г. Куренный. Исследование вероятностной модели недетерминированной полной мощности при несимметрии и несинусоидальности в системах электроснабжения	149
Г.К. Котов. Применение ТЭС малой мощности на биотопливе с возможностью эксплуатации в когенерационном режиме	154
Д.Н. Мирошник, Е.К. Казаков. Опыт использования робота CODEY ROCKY для обучения робототехнике в младшей школе	160
Д.А. Лебеднов, И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, Н.М. Халявинская. Обоснование предельно допустимой емкости шахтных электрических сетей 3,3 кВ по условиям электробезопасности	164
Д.Н. Мирошник, В.Д. Левченко. Разработка прототипа мобильного наземного робота на воздушной подушке	171
Т.А. Ляшенко, Д.Н. Мирошник, Е.М. Ляхов. Моделирование и разработка прототипа робота – манипулятора AR-4	174
А.В. Мишин, А.В. Молчанов. Адаптивное прогнозирующее управление как метод адаптации шасси мобильного робота к внешним воздействиям	178

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

А.Д. Мых, И.А. Бершадский, А.В. Згарбул. Повышение эффективности обнаружения дуговых пробоев в электроустановках зданий на основе вейвлет-анализа	183
Н.Н. Малышева, А.А. Житинская, Д.А. Соловьян, Д.В. Каримов. Разработка учебного стенда для терминала релейной защиты БМРЗ-152-КСЗ	186
Д.К. Москвин, Д.Н. Мирошник. Разработка системы управления верхнего уровня трехколесным мобильным роботом на базе ESP - 32 SAM	191
А.Н. Назарычев, Д.Д. Манукян. Анализ влияния параметров распределения Вейбулла на комплексный показатель эксплуатации электроагрегатов электростанций собственных нужд	195
М.Д. Нестеров, М.В. Бурмейстер, И.И. Бердышев, Л.А. Веренцов, Ю.Д. Кавойков. Исследование влияния системы накопления электроэнергии на переходные процессы в автономном гибридном энергокомплексе	200
С.К. Никишина, Е.И. Шарибченко. Применение методов машинного обучения для интеллектуального управления энергопотреблением дата-центров	205
Д.А. Радецкий, И.И. Москвина. Прибор контроля уровня горной массы на конвейерных лентах в горных выработках	211
А.А. Самойлов, М.В. Бурмейстер, А.А. Самойлова. Определение технических требований к составу и параметрам модели микрогрида для выполнения технико-экономических расчётов	215
Р.Н. Саратовский. Система управления резонансным инвертором для питания установок индукционного нагрева	219
М.В. Сечина, И.А. Бершадский. Моделирование и расчётная оценка искробезопасности электрических цепей портативных шахтных светильников с аккумуляторным питанием.....	224
С.Н. Ткаченко, А.С. Хапченков. Анализ путей исследования режимов самозапуска асинхронных двигателей системы собственных нужд тепловых электростанций	230
Б.С. Федоров, Е.И. Шарибченко. Комплексное использование отвалов горных пород для возобновляемой энергетики: аналитический обзор	236
М.О. Федоров, А.В. Захаров. Построение прототипа бортовой сети для транспортных средств и моделей на основе CAN-шины и Arduino.....	239
В.Г. Черников, Н.М. Муха. Разработка системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля	244
Д.М. Шевченко. Высокоавтоматизированная подстанция.....	251
Т.В. Яковенко, Д.А. Кухленко. Гибридный канал передачи данных в системах дистанционного контроля электрических сетей	256

УДК 333.333

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ ЗА СЧЁТ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА И РЕЗЕРВИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

А.А. Орлов, А.Д. Авдеев, В.М. Щербаков
ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»,
г. Москва, Россия

Аннотация: Исследована проблема скрытой деградации аккумуляторных батарей ИБП автоматизированного рабочего места оператора газотурбинной установки ГТД-110М. Предложена подсистема мониторинга с горячим резервированием двух групп свинцово-кислотных АКБ, периодическим нагрузочным тестированием и автоматическим переключением при сбоях работы.

Ключевые слова: источник бесперебойного питания, аккумуляторная батарея, резервирование, предиктивная диагностика, автоматизированное рабочее место оператора, газотурбинная установка.

Annotation: The problem of hidden degradation of UPS batteries in the automated operator workstation of the GTD-110M gas turbine unit was investigated. A monitoring subsystem with hot redundancy for two groups of lead-acid batteries, periodic load testing, and automatic failover is proposed.

Keywords: uninterruptible power supply, battery, redundancy, predictive diagnostics, automated operator workstation, gas turbine unit.

Введение

Современные газотурбинные установки (ГТУ) большой мощности, в том числе ГТД-110М, представляют собой высокотехнологичные энергоблоки, требующие непрерывного контроля и управления. Центральным элементом системы управления является автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, которое обеспечивает сбор телеметрии, визуализацию технологического процесса и реализацию защит. Прекращение питания АРМ даже на короткое время может привести к неконтролируемому развитию аварийной ситуации и значительному экономическому ущербу, что относит электропитание АРМ к потребителям особой группы I по надёжности [1].

Для гарантированного электроснабжения АРМ применяются источники бесперебойного питания (ИБП) с аккумуляторными батареями (АКБ). В стационарных энергоустановках преимущественно используются герметизированные свинцово-кислотные аккумуляторы, которые в процессе эксплуатации подвержены необратимой деградации, вызванной сульфатацией пластин, коррозией токоотводов и термическим старением [2, 3]. Существующие системы мониторинга ИБП, как правило, ограничиваются контролем общего напряжения батарейной сборки и расчётного времени автономной работы, что не позволяет своевременно выявлять скрытые дефекты и прогнозировать момент отказа. В результате обслуживание АКБ ведётся по календарному регламенту, а замена осуществляется либо преждевременно, либо уже после фактической потери ёмкости, создавая высокий риск нарушения питания АРМ при пропадании основной сети.

Целью настоящей работы является повышение надёжности электроснабжения АРМ оператора ГТД-110М путём разработки подсистемы мониторинга состояния аккумуляторных батарей с функцией автоматического горячего резервирования. Предлагаемая подсистема реализует непрерывный контроль напряжения и температуры двух независимых групп АКБ, периодическую нагрузочную диагностику и бесшовное переключение на резервную батарею при обнаружении аномалий, что позволяет перейти к обслуживанию по фактическому состоянию и существенно снизить вероятность внезапного отказа.

Материалы и методы

Объектом исследования является система гарантированного электропитания АРМ оператора газотурбинной установки ГТД-110М. В состав АРМ входят две рабочие станции (по 300 Вт), шесть мониторов (по 50 Вт) и периферийное оборудование суммарной мощностью 500 Вт. Питание осуществляется от ИБП с топологией двойного преобразования энергии, обеспечивающей нулевое время переключения и полную фильтрацию сетевых помех. Накопителями энергии служат две независимые группы герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей, выполненных по технологии AGM, с номинальным напряжением каждой группы 48 В.

Суммарная активная мощность нагрузки определялась по формуле:

$$P_{\text{баз}} = \sum_{i=0}^n P_i = 2 \cdot 300 + 6 \cdot 50 + 500 = 1400 \text{ Вт}, \quad (1)$$

Полная требуемая мощность ИБП рассчитывалась с учётом коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi = 0,8$ и коэффициента запаса $K = 1,3$:

$$S_{\text{нагр}} = \frac{P_{\text{баз}}}{\cos \varphi} \cdot K = \frac{1400}{0.8} \cdot 1.3 = 2275 \text{ ВА}, \quad (2)$$

Выбран серийный ИБП номинальной мощностью 3000 ВА. Требуемая ёмкость аккумуляторных батарей определялась по нормативным требованиям СП ТЭС-2007 для аварийного режима длительностью $T = 0,5$ ч при напряжении сборки $U = 48$ В, допустимой глубине разряда $D_{\text{доп}} = 50 \%$, КПД инвертора $\eta = 0,9$ и температурной поправке $T_{\text{кор}} = 1,0$:

$$P_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{баз}} \cdot T \cdot 100}{U \cdot D_{\text{доп}} \cdot \eta} \cdot T_{\text{кор}} = \frac{1400 \cdot 0.5 \cdot 100}{48 \cdot 50 \cdot 0.9} \cdot 1 = 32.4 \text{ А} \cdot \text{ч}, \quad (3)$$

С учётом запаса на старение:

$$C_{\text{практ}} = P_{\text{тр}} \cdot 1.3 = 32.4 \cdot 1.3 = 38.9 \text{ А} \cdot \text{ч}, \quad (4)$$

Выбраны аккумуляторы ёмкостью 44 А·ч (четыре последовательно соединённых элемента на группу).

Оценка надёжности выполнена на основе экспоненциальной модели отказов. Вероятность безотказной работы элемента:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (5)$$

Структурная схема для расчёта надёжности представлена на рисунке 1.

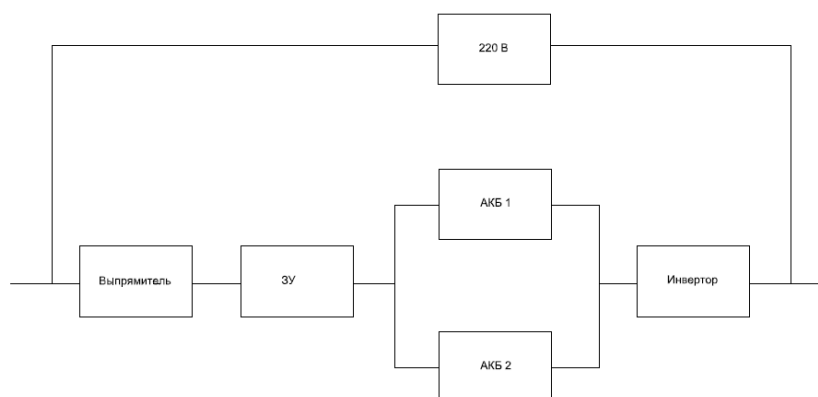


Рисунок 1. Структурная схема системы для расчета надежности

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Полная вероятность безотказной работы системы с учётом возможности питания от сети через ИБП рассчитывалась по выражению:

$$P_{\text{полн}}(t) = P_{\text{ИБП}}(t) + P_{220\text{В}}(t) - P_{\text{ИБП}}(t) \cdot P_{220\text{В}}(t), \quad (6)$$

Для сравнения аналогичный показатель вычислен для схемы с одной аккумуляторной батареей (без резервирования):

$$P_{\text{полн 1 АКБ}}(t) = P_{\text{ИБП с 1 АКБ}}(t) + P_{220\text{В}}(t) - P_{\text{ИБП с 1 АКБ}}(t) \cdot P_{220\text{В}}(t), \quad (7)$$

Интенсивности отказов элементов приняты по справочным данным и приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Интенсивности отказов элементов, 1/ч

$\lambda_{220\text{В}}$	$\lambda_{\text{В}}$	$\lambda_{\text{ЗУ}}$	$\lambda_{\text{АКБ1}}$	$\lambda_{\text{АКБ2}}$	$\lambda_{\text{И}}$
$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Графики вероятности безотказной работы для трёх конфигураций приведены на рисунке 2.

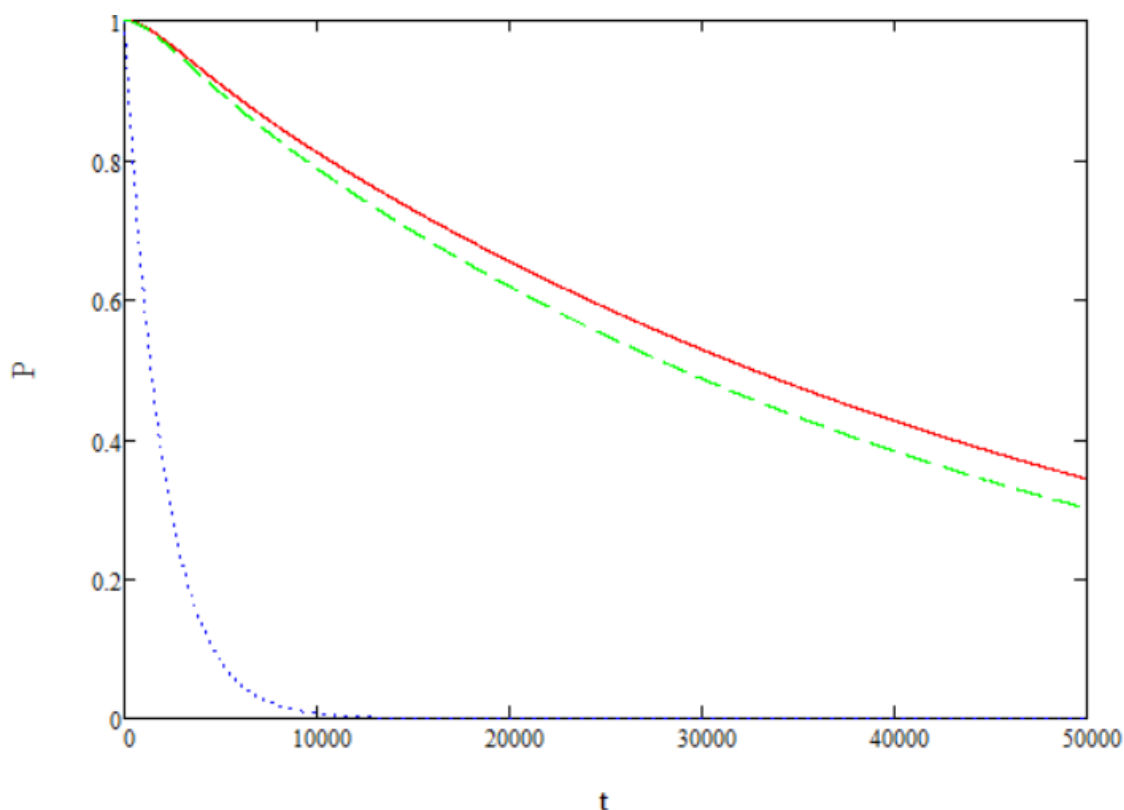


Рисунок 2. Вероятность безотказной работы системы электроснабжения АРМ: красный – с резервированием АКБ; зеленый – с одной АКБ; синий – питание от сети

Средняя наработка до отказа равна площади, образованной кривой вероятности безотказной работы $P(t)$ и осями координат:

$$T_c^H = \int_0^{\infty} P_c(t) dt, \quad (8)$$

В результате для питающей сети без ИБП получено 2000 ч, для системы с одной АКБ – 41758 ч, для разработанной системы с резервированием двух АКБ – 46377 ч.

Предложенная подсистема мониторинга реализована на базе программируемого логического контроллера (ПЛК), который выполняет непрерывный опрос датчиков напряжения, тока и температуры, а также управляет силовыми реле, коммутирующими батареи и диагностическую нагрузку. Диагностика состояния АКБ выполняется периодически без отключения нагрузки: на время теста резервная батарея подключается к инвертору, а основная нагружается калиброванным резистором 750 Вт на 5 с; по величине напряжения под нагрузкой оценивается её состояние (выход ниже 40 В интерпретируется как отказ).

Программное обеспечение разработано в SCADA-системе Trase Mode 7. Для отработки алгоритмов созданы имитаторы процессов заряда и разряда АКБ на языке FBD. Центральный алгоритм переключения написан на ST и реализует следующую логику: при наличии сети обе батареи заряжаются; при пропадании сети питание подаётся от основной АКБ1; при снижении напряжения основной батареи до 42 В или при её перегреве выше 50 °С производится автоматическое бесшовное переключение на резервную АКБ2; после восстановления сети или охлаждения основной батареи питание возвращается к АКБ1. Для оператора создан графический экран с мнемосхемой и трендами, а также отчёт событий с цветовой индикацией (жёлтый – предупреждение, красный – авария).

Тестирование подсистемы проводилось в среде профайлера Trase Mode 7. Последовательно смоделированы пять сценариев: провал сетевого напряжения ниже 10 % номинала; перегрев основной АКБ1; разряд АКБ1 до порогового напряжения 42 В; отказ обеих АКБ при отсутствии сети; заряд батарей после восстановления сетевого напряжения. Во всех случаях система отработала штатно: переключения выполнялись с временем реакции менее 100 мс, сигнализация и записи в отчёте событий формировались в соответствии с заданными уставками.

Выводы

Разработана и эмуляционно апробирована подсистема мониторинга состояния аккумуляторных батарей ИБП АРМ оператора газотурбинной установки ГТД-110М, реализующая непрерывный контроль напряжения и температуры с периодическим нагрузочным тестированием двух резервированных групп АКБ и автоматическим бесшовным переключением на исправную батарею. Расчёт требуемой мощности ИБП и ёмкости батарей, выполненный в соответствии с СП ТЭС-2007, позволил выбрать оборудование мощностью 3000 ВА и аккумуляторы ёмкостью 44 А·ч при напряжении сборки 48 В, что гарантирует 30-минутную автономную работу при полной нагрузке. Оценка безотказности по экспоненциальной модели показала, что предложенное резервирование увеличивает среднюю наработку до отказа системы до 46 377 часов, что в 23 раза превышает показатель прямого сетевого питания и на 11 % выше, чем у схемы с одной группой АКБ. Программная реализация в SCADA Trace Mode 7 с имитаторами разряда-заряда и логикой переключения на языке ST успешно протестирована на критических сценариях: провале сети, перегреве, глубоком разряде и отказе обеих батарей. Достигнутые результаты позволяют рекомендовать подсистему к внедрению для перехода от обслуживания по регламенту к обслуживанию по фактическому состоянию, что снижает риск внезапной потери управления энергоблоком и повышает общую надёжность электропитания ответственных потребителей собственных нужд электростанций.

Перечень ссылок

1. Орлов А.А., Крылова Е.В., Щербаков В.М., Авдеев А.Д. Интеллектуальная система мониторинга и диагностики элементов газотурбинной установки (ИСМДЭГТУ) // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 211–221.
2. Карпов В.Н., Колосовский В.В. Диагностирование свинцово-кислотных аккумуляторов по ЭДС и температуре электролита // Вестник Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2007. – № 6. – С. 36–37.
3. Гонтовой Е.А., Лобов Д.Г., Чупин Д.П. Тепловой контроль свинцово-кислотных аккумуляторных батарей // Вестник Омского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 4–8.

УДК 621.316.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПЛАВЛЕНИЯ ГОЛОЛЕДА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ХЕРСОНСКОЙ ОБЛАСТИ

М.Л. Балюра, О.Е. Мельник

ФГБОУ ВО «ХЕРСОНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
г. Геническ, Российская Федерация

Аннотация: В работе предоставлены результаты исследования способов плавления гололеда в распределительных электрических сетях Херсонской области. Проведен сравнительный анализ четырех групп методов: электрических, конструктивных, механических и химических. Показано, что для эксплуатируемых сетей оптимальным является метод плавки током короткого замыкания, не требующий значительных капитальных затрат.

Ключевые слова: распределительные сети, плавка гололеда, воздушные линии, короткое замыкание, выпрямленный ток, Херсонская область.

Annotation. This work presents the findings of a study on ice melting techniques applied to the distribution power grids of the Kherson region. A comparative analysis of four groups of methods is performed: electrical, structural, mechanical, and chemical. It is demonstrated that for the currently operating grids, the short-circuit melting method, which requires no substantial capital investment, proves to be optimal.

Keywords: distribution networks, ice melting, overhead lines, short circuit, rectified current, Kherson region.

Экономический ущерб от гололедных аварий включает не только затраты на восстановительные работы, но и убытки недоотпуска электроэнергии потребителям.

Климат Херсонщины – степной, с мягкой зимой и регулярными оттепелями. Колебания температуры вблизи 0°C, высокая влажность, туманы и морось – идеальные условия для нарастания гололеда и изморози [1, 2]. Характерная особенность региона – частая смена циклонов и антициклонов в холодное время года. При прохождении теплых фронтов с осадками в виде мокрого снега и последующим резким похолоданием происходит интенсивное обледенение проводов. Толщина стенки гололеда может достигать 10-15 мм и более в отдельные годы.

Согласно Правилам устройства электроустановок, при проектировании и эксплуатации ВЛ необходимо учитывать максимальную толщину стенки гололеда с повторяемостью 1 раз в 25 лет. [1, 2] Для южных регионов этот показатель, по данным многолетних наблюдений, соответствует II-III гололедному району.

В сетях 10-35 кВ. чаще всего применяют плавку гололеда током искусственного короткого замыкания. Суть метода – создание КЗ на ограниченном участке линии, в результате чего по проводам протекает ток, значительно превышающий рабочий, и провод разогревается [3]. Технически это реализуется сборкой специальных схем на подстанциях с использованием существующих коммутационных аппаратов. Для ВЛ 10 кВ. применяют схемы однофазного, двухфазного или трехфазного КЗ. При однофазном КЗ провода всех трех фаз соединяются последовательно («змейка»), что позволяет пропустить ток по всей линии [3].

Преимущества метода:

- Не требует дополнительного оборудования
- Относительная простота
- Высокая скорость (до 30 минут)

Недостатки:

- Необходимость полного отключения линии
- Потеря электроснабжения потребителей
- Ограничения по длине линии

При плавке выпрямленным током, на линию накладывают постоянную составляющую от выпрямителя, что позволяет растапливать лед без отключения потребителей [4].

Этот способ особенно эффективен для параллельных или кольцевых линий. Исследования показывают, что модернизация распределительных устройств подстанций для внедрения систем плавки наложением тока значительно повышает надежность электроснабжения в гололедный период [4].

Для вновь строящихся или реконструируемых ВЛ может применяться плавка на расщепленных фазах. В этом случае каждая фаза выполняется из нескольких проводов, отдельных изолирующими распорками. При образовании гололеда рабочая нагрузка переключается на один провод расщепленной фазы, что создает необходимый нагрев [5]. Метод не требует специального плавильного оборудования, но нуждается в дополнительном проектировании линии и установке стационарных распределительных устройств с

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

применением шунтирующих перемычек и коммутационных аппаратов [5].

Существует также механические (виброударные устройства) и химические (нанесение реагентов) методы. Однако в распределительных сетях их применение ограничено из-за низкой эффективности, сложности реализации на больших протяженностях и потенциального вреда для окружающей среды.

Для выбора оптимально стратегии приведем сравнительный анализ в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение способов плавки гололеда

<i>Критерий</i>	<i>Плавка током КЗ</i>	<i>Плавка выпрямленным током</i>	<i>Плавка на расщепленных фазах</i>
<i>Необходимость отключения потребителей</i>	Полная	Отсутствует	Частичная
<i>Дополнительное оборудование</i>	Отсутствует	Выпрямительные установки	шунтирующие перемычки и коммутационные аппараты
<i>Капитальные затраты</i>	Минимальные	Средние	Высокие
<i>Эксплуатационные затраты</i>	Низкие	Средние	Низкие
<i>Время плавки</i>	15-40 мин.	30-60 мин.	Постоянно в режиме
<i>Ограничения по длине линии</i>	До 30-40 км.	До 60-80 км.	Не ограничена

Для Херсонской области, где гололедные явления непостоянны, но могут быть интенсивными, первоочередное значение имеют оперативность и минимизация перерывов в электроснабжении.

При выборе способа плавки необходимо учитывать реальное состояние оборудования. Многие подстанции эксплуатируются длительное время, их коммутационная способность может быть снижена. Нормы ПУЭ требуют, чтобы отключающая способность выключателей соответствовала реальным токам КЗ [2]. Плавка током

КЗ создает значительные электродинамические и тепловые нагрузки на токоведущие части. Применение этого метода требует тщательного расчета параметров и проверки оборудования на термическую стойкость.

Экономическая эффективность различных методов оценивается соотношением затрат на реализацию и предотвращенного ущерба от аварий. Для Херсонской области, где гололедные явления не носят ежегодный массовый характер (в отличие от северных или горных районов), экономически обоснованным представляется:

- Плавка током КЗ для критических и наиболее подверженных гололеду участков;
- Резервные источники питания для ответственных потребителей на период плавки.

Плавка выпрямленным током может быть рекомендована для вновь строящихся или реконструируемых подстанций, обслуживающих социально значимые объекты.

Среднесрочная перспектива развития сетей Херсонской области должна предусматривать:

- Создание автоматизированной системы мониторинга гололедных нагрузок;
- Внедрение мобильных выпрямительных установок для плавки без отключения потребителей;
- Поэтапную модернизацию распределительных устройств.

Проблема гололедообразования в распределительных сетях Херсонской области требует комплексного подхода, сочетающего организационные, технические и эксплуатационные меры. Для существующих сетей 10-35 кВ. наиболее доступна и технологически отработана плавка током КЗ. Метод не требует крупных вложений, выполняется персоналом и дает предсказуемый эффект. Для повышения надежности в перспективе целесообразно внедрение плавки без отключения линий (в частности, с использованием выпрямленного тока). Это требует инвестиций, но качественно повышает надежность сети. Особое значение для Херсонской области имеет развитие системы прогнозирования и мониторинга гололедообразования. Своевременное начало плавки позволяет предотвратить критическое нарастание отложений и избежать аварий.

Внедрение предлагаемых решений снизит риск аварий в осенне-зимний период и повысит надежность электроснабжения Херсонской области.

Перечень ссылок

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. – Москва: Издательство НЦ ЭНАС, 2021. – 512 с.
2. Елизарьев, А.Ю. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей / А.Ю. Елизарьев, А.Р. Валеев // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2015. – Т. 19, № 4. – С. 59–65.
3. На ВЛ 10-35 кВ Ульяновских распределительных сетей проведено 25 пробных плавков гололеда // ЭнергоНьюс : электрон. изд. – 2013. – 11 февр. – URL: <https://energonews.ru/news/archives/>
4. Патент № RU81404U1 Российская Федерация, МПК H05B 3/16. Устройство плавки гололеда выпрямленным током / Евликов.А.А., Маруда И.Ф.; заявитель и патентообладатель Евликов А.А. (21), (22) – № 2008112265/22; заявл. 31.03.2008; опубл. 10.03.2009.
5. Патент № RU2375801C1 Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Способ плавки гололеда / Моргалюк В.Д.; заявитель и патентообладатель (21), (22) – № 2008140585/09; заявл. 13.10.2008; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34.
6. Черешнюк, С.В. Учет гололедных и гололедно-ветровых нагрузок на воздушные линии электропередачи / С.В. Черешнюк, В.А. Луговой, Л.В. Тимашова // Энергия единой сети. – 2012. – № 4. – С. 42–47.

УДК 620.97

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

И.А. Баннов, Я.А. Воронин, Н.А. Корнев, М.В. Бурмейстер, Д.К.
Чесноков, Ю.Д. Кавойков
ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ»
г. Донецк, Россия

Аннотация: В статье исследовано применение систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) для регулирования напряжения в распределительных электрических сетях. Разработана имитационная модель сети и выполнено моделирование режимов с учетом роста нагрузки. Результаты показали эффективность СНЭЭ при поддержании напряжения в требуемых пределах.

Ключевые слова: СНЭЭ, регулирование напряжения, распределительная сеть.

Annotation : The article investigates the use of battery energy storage systems (BESS) for voltage regulation in distribution power grid. A simulation model of a real grid was developed and operating conditions were analyzed considering load growth. The results confirmed the effectiveness of BESS in maintaining permissible voltage levels.

Keywords: BESS, voltage regulation, distribution network.

В настоящее время структура электропотребления изменяется по сравнению с XX веком. Доля коммунально-бытовых потребителей низкого напряжения в то время была сравнительно мала, основной была промышленная нагрузка. В настоящее время электрическая нагрузка коммунально-бытовых потребителей низкого напряжения выросла, а промышленная сократилась и продолжает уменьшаться [1]. Таким образом, сегодня наблюдается увеличение загрузки распределительных электрических сетей (РЭС).

Рост доли потребителей низкого напряжения сопровождается увеличением протяжённости распределительных сетей и усилением влияния локальных нагрузок на параметры системы, в том числе на уровни напряжения и потери мощности. В таких условиях особое значение приобретает обеспечение параметров режимов и поддержание допустимых отклонений напряжения на всех уровнях сети, что требует применения более гибких и эффективных методов управления.

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем

Регулирование напряжения в электрических системах необходимо для обеспечения нормативного уровня напряжения у потребителей в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 32144-2013, обеспечения требуемого качества электроэнергии, отпускаемой потребителям, повышения экономичности эксплуатации систем и управления энергосистемами в нормальных и аварийных режимах [2]. Под регулированием понимается текущее изменение параметров системы (напряжения, коэффициентов трансформации и потерь напряжения), применяемое в целях обеспечения желательного режима напряжений. Существуют несколько основных способов регулирования напряжения: с помощью изменения коэффициента трансформации (РПН, ПБВ); с помощью устройств компенсации реактивной мощности (БСК); с помощью изменения активного и реактивного сопротивления сети; с помощью системы накопления электрической энергии (СНЭЭ).

СНЭЭ представляют собой современный класс объектов электроэнергетики, обеспечивающих преобразование электрической энергии в форму, пригодную для хранения, с последующим ее обратным преобразованием и выдачей в электрическую сеть. По своей сути СНЭЭ являются высокотехнологичными многофункциональными комплексами, включающими накопители энергии, силовую электронику и интеллектуальные системы управления. Их ключевое преимущество заключается в высокой скорости реакции и возможности гибкого управления режимами работы энергосистемы. В отличие от традиционных средств регулирования, СНЭЭ способны практически мгновенно изменять как активную, так и реактивную мощность, что делает их эффективным инструментом поддержания напряжения в распределительных сетях. Благодаря этому они позволяют повышать качество электроэнергии, компенсировать колебания нагрузки и генерации (особенно от возобновляемых источников), а также снижать необходимость дорогостоящего развития сетевой инфраструктуры. Таким образом, применение СНЭЭ рассматривается как одно из наиболее перспективных и технологически продвинутых направлений развития современных электрических сетей.

Целью данной работы является исследование технической возможности применения систем накопления электроэнергии для регулирования напряжения в распределительных электрических сетях. Для достижения данной цели требуется выполнить следующие задачи:

- 1) Определить основные способы регулирования напряжения в распределительных электрических сетях.

- 2) Разработать имитационную модель сети и СНЭЭ.
- 3) Провести опыты по исследованию механизма регулирования напряжения в распределительной сети.
- 4) Сделать заключение о технической возможности применения систем накопления электроэнергии для регулирования напряжения в распределительных электрических сетях.

СНЭЭ должны работать без отключения от сети при изменении частоты электрического тока в диапазоне значений от 49,0 до 51 Гц, включая верхнюю границу диапазона по частоте, и при напряжении в диапазоне $\pm 10\%$ от номинального. СНЭЭ может применяться для обеспечения желаемого режима напряжений в распределительных сетях [3]. СНЭЭ представляют собой новый класс электроустановок, которые накапливают энергию из сети, хранят её и выдают обратно. В отличие от традиционных средств регулирования напряжения, СНЭЭ способны работать во всех четырех квадрантах плоскости мощностей (P, Q), выполняя функции компенсации практически безынерционно. Применение СНЭЭ позволяет реализовать механизмы, недоступные классическим устройствам:

PV-регулирование: СНЭЭ выдает активную мощность в часы пик (локально снижая ток в линии и падение напряжения) и потребляет её в часы минимума или избыточной генерации ВИЭ. Это критически важно в сетях 0,4 кВ, где из-за высокого активного сопротивления (R) управление только реактивной мощностью малоэффективно.

QV-регулирование: Инверторы СНЭЭ могут работать в режиме статического компенсатора (STATCOM), выдавая или потребляя реактивную мощность независимо от уровня заряда аккумулятора, что исключает его циклический износ при выполнении этой функции.

Компенсация несимметрии: В сетях 0,4 кВ СНЭЭ могут осуществлять независимое управление по фазам, эффективно устраняя перекосы напряжений, вызванные неравномерной однофазной нагрузкой.

Для исследования технической возможности применения систем накопления электрической энергии была разработана имитационная модель распределительной электрической сети с подключенной СНЭЭ. В основу модели положен фрагмент реально существующей распределительной сети, расположенной на территории Самарской области (рисунок 1), параметры которой были приняты в качестве исходных данных при моделировании. Имитационная модель позволяет исследовать влияние режимов работы СНЭЭ на уровни напряжения в характерных точках сети, оценивать эффективность

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

регулирования напряжения при изменении графика нагрузки, а также анализировать работу сети в различных эксплуатационных режимах.

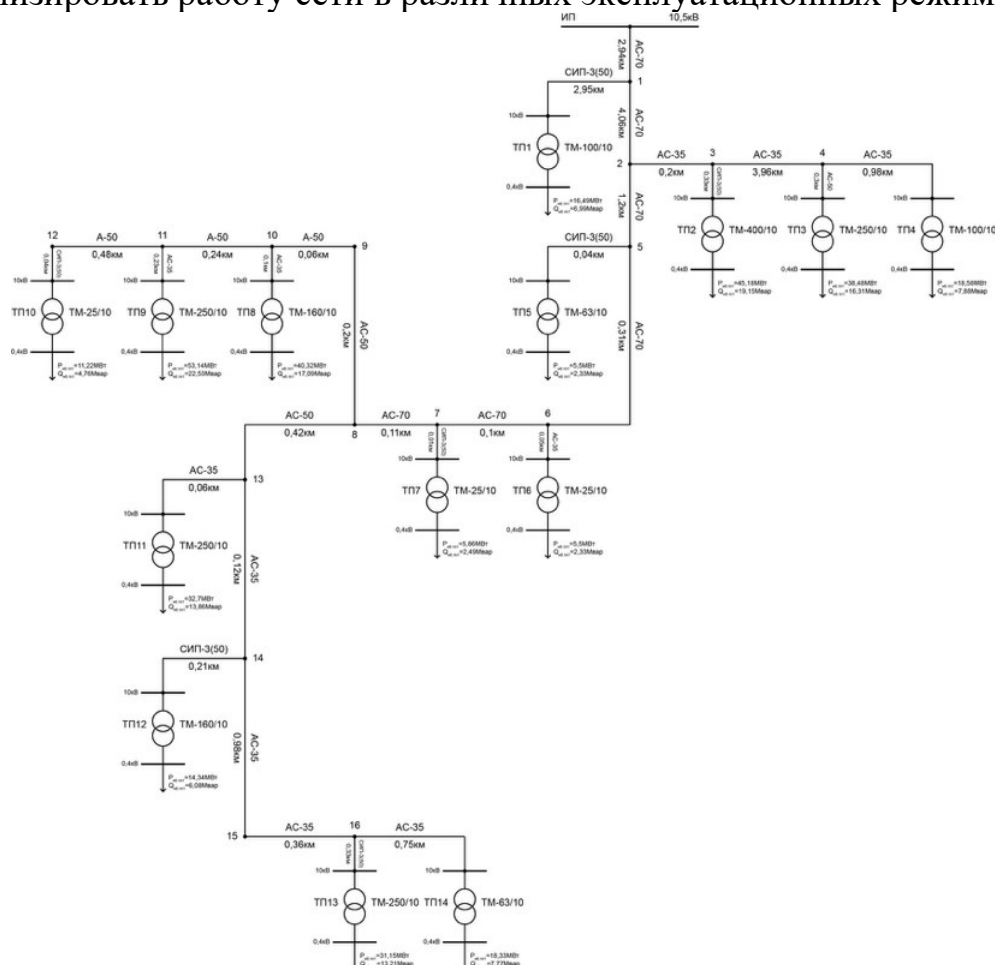


Рисунок 1 – Модель распределительной электрической сети 10/0,4 кВ

В рамках исследования был выполнен расчет установившихся режимов работы распределительной сети с последующим прогнозированием роста электрической нагрузки на трехлетний период. Прогнозное увеличение нагрузки моделировалось поэтапно с учетом ожидаемого роста потребления в распределительной сети, что позволило оценить изменение уровней напряжения в характерных узлах сети при перспективных режимах работы. Результаты моделирования показали, что на третьем году прогнозируемого периода на ТП-10 в режиме наибольшей нагрузки уровень напряжения составил 339 В, при этом устройство переключения без возбуждения (ПБВ) трансформатора находилось в крайнем положении регулирования. Дальнейшее повышение напряжения существующими средствами регулирования оказалось невозможным, вследствие чего значение напряжения вышло за пределы допустимых отклонений, установленных требованиями ГОСТ 32144-2013. Для обеспечения

требуемого уровня напряжения в рассматриваемом узле сети была предусмотрена установка СНЭЭ. Проведенные расчеты показали, что после подключения СНЭЭ и регулирования режима напряжение на шинах ТП-10 увеличилось до 396 В, при этом устройство ПБВ трансформатора находилось в нейтральном положении, а СНЭЭ выдавала 85 квар реактивной мощности, что подтверждает техническую возможность использования СНЭЭ для регулирования напряжения в распределительных электрических сетях.

В результате проведенного исследования была подтверждена техническая возможность применения СНЭЭ для регулирования напряжения в РЭС. Разработанная имитационная модель распределительной сети позволила выполнить анализ режимов работы при прогнозируемом росте нагрузки. Установлено, что при увеличении нагрузки существующих средств регулирования напряжения оказалось недостаточно для поддержания нормативного уровня напряжения в сети. Подключение СНЭЭ обеспечило восстановление уровня напряжения до допустимых значений без изменения положения ПБВ трансформатора. Полученные результаты подтверждают эффективность применения СНЭЭ в качестве гибкого средства регулирования напряжения в распределительных электрических сетях.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка испытательного стенда для тестирования цифровых систем управления силовыми преобразователями с алгоритмами виртуальной инерции» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Перечень ссылок

1. Кононенко В.Ю. Особенности функционирования СНЭЭ в распределительных электрических сетях // Научно-практическая конференция Российский рынок систем электрохимического накопления электрической энергии и батарейных систем электротранспорта. Проблемы и перспективы. 26.03.2024.
2. ГОСТ 32144 – 2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Приложение 2 к протоколу 45 заседание КОТК от 19-20.09.2024 Основные технические требования к системам накопления электрической энергии (на базе электрохимических накопителей), работающим в составе энергосистем.

УДК 662.769.2

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Д.А. Белов, Т.П. Кулишова
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
г. Донецк, ДНР, Россия

Аннотация: *Сопоставлены характеристики различных видов топлива – нефти и водорода по основным показателям – технологическим, экологическим, экономическим. Показаны преимущества и недостатки обоих видов источников энергии.*

Ключевые слова: *нефть, водородное топливо, возобновляемые источники энергии*

Annotation: *The characteristics of different types of fuels – oil and hydrogen – are compared according to the main indicators - technological, environmental, and economic. The advantages and disadvantages of both types of energy sources are shown.*

Keywords: *oil, hydrogen fuel, renewable energy sources*

Человечество стоит на пороге глобального кризиса. Запасы традиционных энергоресурсов стремительно сокращаются, а последствия их использования уже сегодня угрожают стабильности всей цивилизации.

Основные источники энергии, на которых держится современная экономика, — нефть, газ и уголь — не бесконечны. По оценкам экспертов разведанных запасов нефти хватит примерно на 50 лет при текущем уровне потребления, природного газа — на 50–60 лет, угля — на 100–150 лет, но его использование наносит наибольший вред экологии.

При этом спрос на энергию продолжает расти вместе с населением планеты и развитием технологий. Уже сейчас многие страны сталкиваются с энергетическим дефицитом и зависимостью от импорта углеводородов, что порождает геополитическую нестабильность.

Сжигание ископаемого топлива приводит к выбросам CO₂ и других парниковых газов. Это вызывает глобальное потепление, таяние ледников и подъём уровня мирового океана, экстремальные погодные явления (засухи, наводнения, ураганы).

Загрязнение воздуха от ТЭЦ и транспорта ежегодно становится причиной миллионов преждевременных смертей.

Водородное топливо может стать ключевым решением этих проблем. Вот его главные преимущества:

• **Неисчерпаемость.** Водород — самый распространённый элемент во Вселенной. На Земле его можно получать из воды (H_2O) методом электролиза, а вода — возобновляемый ресурс.

• **Экологичность.** При сгорании водорода образуется только водяной пар: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Нет выбросов CO_2 , сажи, оксидов серы и азота.

• **Высокая энергоёмкость.** Удельная теплота сгорания водорода — около 142 МДж/кг, что в 3 раза выше, чем у бензина (44 МДж/кг).

• **Универсальность.** Водород можно использовать:

- в транспорте (автомобили, поезда, суда, авиация);
- на электростанциях для выработки электроэнергии;
- в промышленности (металлургия, химическая отрасль);
- для отопления и горячего водоснабжения.

• **Совместимость с ВИЭ.** Избыточную энергию от солнечных и ветряных электростанций можно направлять на производство водорода, решая проблему нестабильности возобновляемых источников.

Концепция водородной экономики предполагает создание замкнутого цикла:

1. **Производство.** Электролиз воды с использованием энергии ВИЭ (солнечной, ветровой, гидроэнергии).

2. **Хранение.** Водород сжимают или сжижают, закачивают в подземные хранилища или транспортируют по трубопроводам.

3. **Распределение.** Создание сети водородных заправок и инфраструктуры для промышленных потребителей.

4. **Использование.** Топливные элементы преобразуют химическую энергию водорода в электричество с КПД до 60% (против 25–40% у ДВС).

Водородная энергетика — не просто альтернатива, а единственный реальный шанс обеспечить устойчивое развитие человечества. Чем раньше мы начнём этот переход, тем больше у нас шансов сохранить планету для будущих поколений.

Рассмотрим ключевые преимущества водорода как энергоносителя в сравнении с традиционными нефтяными видами топлива (бензин, дизель и т.д.).

1. Экологичность

– **Водород:** при сгорании образуется только водяной пар (H_2O). Химическая реакция: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Нет выбросов CO_2 , сажи, оксидов серы (SO_x) и азота (NO_x).

– **Нефтяное топливо:** при сгорании выделяются углекислый газ (CO_2) — основной парниковый газ, угарный газ (CO), оксиды азота

(NO_x) — причина кислотных дождей, твёрдые частицы (сажа) — вредны для дыхательной системы.

2. Энергетическая эффективность

Удельная теплота сгорания:

- водород: ~142 МДж/кг;
- бензин: ~44 МДж/кг.

Водород выделяет почти в 3 раза больше энергии на единицу массы.

КПД установок:

- топливные элементы на водороде — до 60–85%;
- двигатели внутреннего сгорания (ДВС) на бензине — 25–40%.

3. Возобновляемость и доступность ресурсов

Водород можно получать из воды (H₂O) методом электролиза.

Вода — практически неисчерпаемый ресурс. При использовании энергии ВИЭ (солнечной, ветровой) производство становится «зелёным».

Нефть — не возобновляемый ресурс. Разведанные запасы ограничены и постепенно истощаются.

4. Универсальность применения

Водород можно использовать в разных сферах: транспорт (автомобили, автобусы, поезда, суда, авиация), стационарная энергетика (электростанции, резервные источники питания), промышленность (металлургия, химическая отрасль).

Нефтяное топливо в основном используется в транспорте и частично в энергетике.

5. Снижение зависимости от геополитических факторов

– **Водород** можно производить локально в любой стране, что снижает зависимость от импорта энергоресурсов и уменьшает геополитические риски.

– **Нефть** распределена неравномерно. Страны без собственных запасов вынуждены импортировать, что делает их уязвимыми к колебаниям цен и политическим кризисам.

6. Транспортные характеристики

– **Заправка:** водородный автомобиль заправляется за 3–5 минут (как бензиновый), в отличие от электромобилей, требующих часов для зарядки.

– **Дальность пробега:** современные водородные автомобили проезжают 500–700 км на одной заправке — сопоставимо с бензиновыми.

Все же у нефтяного топлива существуют свои преимущества над водородным топливом. Разберём преимущества нефти перед

водородом — с технической, экономической и инфраструктурной точек зрения.

1. Развитая инфраструктура

– **Нефть:** глобальная система добычи, транспортировки (трубопроводы, танкеры), переработки (НПЗ) и распределения (АЗС) существует десятилетиями и охватывает весь мир.

– **Водород:** инфраструктура только формируется. В мире насчитывается всего несколько сотен водородных заправок, а трубопроводы для водорода практически отсутствуют.

– **2. Экономическая эффективность**

– **Себестоимость:** добыча и переработка нефти значительно дешевле производства «зелёного» водорода методом электролиза.

– **Масштабирование:** нефтяная промышленность отлажена, имеет огромные объёмы и устойчивые цепочки поставок.

– **Инвестиции:** переход на водород требует колоссальных вложений в новые технологии, производство, хранение и транспортировку.

3. Удобство хранения и транспортировки

Нефть — жидкость при нормальных условиях, её легко хранить в резервуарах любого масштаба, перевозить танкерами, по трубопроводам, в цистернах, распределять через существующую сеть АЗС.

Водород создаёт сложности: у него низкая плотность требует сжатия до 700 бар или сжижения при $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, высокая проникающая способность приводит к утечкам через материалы, водородное охрупчивание разрушает металлы, требуется специальная (и дорогая) инфраструктура.

4. Безопасность

Нефть и нефтепродукты относительно безопасны в обращении: не взрывоопасны в обычных условиях, утечки легко локализуются, отработаны стандарты пожарной безопасности.

Водород требует особых мер: взрывоопасен в широком диапазоне концентраций (4–75% в воздухе), пламя почти невидимо, утечка может происходить незаметно через микротрещины, нужны дорогие датчики и системы контроля.

5. Надёжность и стабильность поставок

Нефтяной рынок имеет развитые механизмы резервирования, стратегические запасы в большинстве стран, устоявшиеся логистические маршруты, прогнозируемые объёмы добычи.

Водородная энергетика зависит от доступности ВИЭ для «зелёного» водорода, стабильности энергосистемы, наличия воды для электролиза, новых технологий хранения и транспортировки.

6. Технологическая зрелость

Нефтепродукты используются веками. Двигатели внутреннего сгорания, турбины, котлы оптимизированы под них.

Водородные технологии ещё развиваются, стандарты безопасности и эксплуатации только формируются.

7. Доступность ресурсов

Месторождения нефти разведаны по всему миру, включая шельфовые зоны.

Производство водорода требует больших объёмов чистой воды, значительных энергозатрат (для электролиза нужно 50–60 кВт·ч на 1 кг H₂), развитой генерации ВИЭ для экологичного производства.

Вывод

Водородное топливо обладает значительными преимуществами перед нефтяным по экологичности, энергоэффективности и устойчивости. Хотя переход требует развития инфраструктуры и снижения стоимости производства, долгосрочные перспективы делают водород одним из ключевых энергоносителей будущего. Нефть сохраняет значительные преимущества перед водородом по инфраструктуре, экономике, удобству использования и технологической зрелости. Водород перспективен как экологически чистое топливо будущего, но его широкое внедрение требует решения множества технических и экономических задач.

Перечень ссылок

1. Галдин, В. Д. Горючие газы. Добыча, транспортировка, получение : учебное пособие / В. Д. Галдин. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. — 216 с. — ISBN 978-5-9729-2087-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/144529.html> — Режим доступа: для авторизир. пользователей
2. Радченко, Р. В. Водород в энергетике : учебное пособие / Р. В. Радченко, А. С. Мокрушин, В. В. Тюльпа. — Екатеринбург : Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. — 232 с. — ISBN 978-5-7996-1316-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/68323.html> — Режим доступа: для авторизир. пользователей

УДК 004.896

РАЗРАБОТКА ДЕМОНСТРАЦИОННОГО СТЕНДА НА БАЗЕ АВАТАРА РУКИ

Т.Д. Биктимиров, М.С. Велюханов, К.Е. Трофименко, А.В. Захаров
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
г. Донецк, ДНР, Россия

Аннотация: Рассмотрена актуальность создания демонстрационного стенда на базе аватара руки для образовательных и исследовательских задач в области робототехники. На основе открытого проекта выполнена модернизация конструкции, позволившая улучшить управление, снизить стоимость и повысить удобство использования.

Ключевые слова: 3D-печать, микропроцессорный контроллер, аватар руки, энергоёмкие сервоприводы.

Annotation: The relevance of creating a demonstration stand based on a hand avatar for educational and research tasks in robotics is considered. Based on an open-source project, the design was modernized to improve control, reduce cost, and enhance usability.

Keywords: 3D printing, microprocessor controller, hand avatar, power-consuming servos.

Основной функционал аватара руки базируется на принципе копирующего управления, при котором движения человеческой кисти повторяются роботизированным устройством в реальном времени. Области применения подобных систем достаточно разнообразны. В первую очередь они востребованы в системах «цифровых двойников», где движение руки оператора служит эталоном для управления промышленными манипуляторами. Кроме того, данная технология находит применение в виртуальной реальности для создания естественных бесконтактных интерфейсов, а также в реабилитационной медицине для восстановления моторики пациентов. Разработка алгоритмов и методов управления аватаром руки важна для подготовки специалистов, проведения научных исследований, развития человеко-машинных интерфейсов и внедрения в промышленность и медицину.

Среди методов управления можно выделить три основных: перчатка с датчиками [1], камера захвата движения [2] и нейроинтерфейс [3]. Каждый из этих подходов имеет свои достоинства

и ограничения, однако для создания доступного демонстрационного стенда наиболее целесообразным оказалось использование перчатки с гибкими датчиками, как наиболее простое в реализации и настройке.

Выбор базового прототипа и его недостатки.

В открытых источниках был найден прототип аватара руки [4], который обладает рядом преимуществ перед аналогами: простота сборки (требуется небольшое количество инструментов, леска и пять сервоприводов), а также надёжность конструкции благодаря качественному пластику и продуманной геометрии, обеспечивающая длительный срок службы. Тем не менее были выявлены следующие недостатки, ограничивающие применение прототипа в учебно-исследовательских целях.

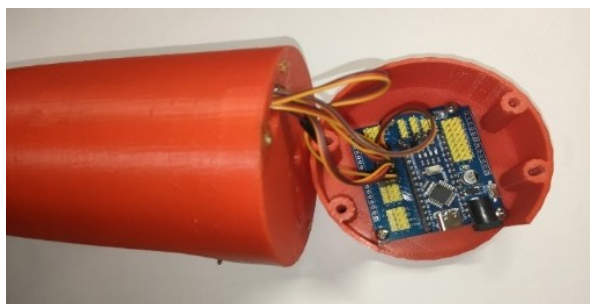
Во-первых, в исходной конструкции предусмотрено ограниченное управление, не обеспечивающее независимую работу каждого пальца (два сервопривода используются для обеспечения подвижности большого пальца, а безымянный и мизинец двигаются одним). Это снижает точность и гибкость манипуляций. Во-вторых, компактность устройства не предусматривает выделенного места для монтажа платы управления, что требует дополнительной оптимизации компоновки. В-третьих, использование сервоприводов в прототипе связано со значительными затратами, обусловленными их высокой стоимостью и энергопотреблением (MG996R). Указанные недостатки необходимо было устранить для адаптации стенда под задачи лабораторного практикума и исследовательских проектов.

Внесённые улучшения

В разработанный демонстрационный стенд были внесены следующие изменения. Во-первых, добавлен отдельный сервопривод для движения каждого пальца аватара руки, что позволило реализовать полностью независимое управление всеми пятью пальцами и расширить набор воспроизводимых жестов. Во-вторых, заменены сервоприводы на более доступные по цене модели (MG90), что способствовало удешевлению стенда; при этом снизилось энергопотребление, и появилась возможность питания непосредственно от компьютера, на котором осуществляется управление (рис.1.а). В-третьих, разработана и добавлена подставка, в которую встроена плата управления; благодаря подставке аватар руки получил устойчивое вертикальное положение, а плата и провода надёжно зафиксированы (рис.1.б).



(a)



(б)

Рисунок 1 - Разработанные улучшения (а – смена типа и установка дополнительного сервопривода, б - добавление подставки с местом для платы управления)

На рисунке 2 представлен внешний вид прототипа аватара руки исходного проекта (рис. 2.а) и готово стенда со всеми доработками (рис.2.б).



(a)



(б)

Рисунок 2 – Внешний вид оригинальной (а) и усовершенствованной модели (б)

Вывод

В ходе выполнения работы разработан демонстрационный стенд на базе аватара руки, предназначенный для наглядной демонстрации принципов копирующего управления. Устранены основные недостатки исходного открытого проекта: обеспечена независимая работа каждого пальца, добавлена подставка со встроенной платой управления, снижена стоимость и энергопотребление за счёт замены сервоприводов. Разработанный стенд может быть использован в учебно-исследовательских целях.

Перечень ссылок

1. Лобов, С. А. Совместное использование командного и пропорционального управления внешними робототехническими устройствами на основе электромиографических сигналов / С. А. Лобов, В. И. Миронов, И. А. Кастальский, В. Б. Казанцев // Современные технологии в медицине. – 2015. – Т. 7, № 15. – С. 30–38.
2. Шестаков, С. С. Исследование метода определения положения кисти руки / С. С. Шестаков, А. В. Захаров // Донбасс будущего глазами молодых ученых : Сборник материалов научно-технической конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых, Донецк, 18 ноября 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 127-131. – EDN QIJKVR.
3. Гриднев, А. А. Система поддержки принятия решений для многоканального управления роботизированным устройством / А. А. Гриднев, Т. И. Возненко, Е. В. Чепин // Procedia Computer Science. – 2018. – Т. 123. – С. 149–154. – DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.
4. Robotic Hand : [сайт] / thingiverse.com. – URL: <https://www.thingiverse.com/thing:2269115> (дата обращения: 05.05.2026). – Текст : электронный.

УДК 621.316.925

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО СТЕНДА ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ТЕРМИНАЛА БМРЗ-0,4ВВ.

И.А. Борисов, А.А. Житинская, А.Р. Саттаров, Н. Н. Малышева
ФГБОУ ВО «НИЖНЕВАРТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

г. Нижневартовск. Ханты-мансийский автономный регион

Аннотация: статья посвящена разработке учебного лабораторного стенда для изучения релейной защиты асинхронного электродвигателя на основе микропроцессорного терминала БМРЗ-0,4ВВ. Рассмотрены основные функции устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА). Детально описана двухступенчатая максимальная токовая защита

Ключевые слова: Учебный стенд, релейная защита, БМРЗ, МТЗ асинхронный двигатель.

Annotation: The article is devoted to the development of a laboratory training stand for studying the relay protection of an asynchronous electric motor based on the microprocessor terminal BMRZ-0.4VV. The main functions of relay protection and automation devices (RPAD) are considered. A two-stage maximum current protection is described in detail.

Keywords: Training stand, relay protection, BMRZ, MCP, asynchronous motor.

Устройства релейной защиты и автоматики (УРЗА) представляют собой совокупность технических средств, которые служат для:

- обнаружения места короткого замыкания (КЗ) и оперативного отделения повреждённого участка от исправной части электроустановки;
- выявления отклонений от нормального режима работы, а также для подачи предупредительных сигналов или выполнения операций, необходимых для восстановления штатного режима [1,2].

С помощью устройств защиты обеспечивается непрерывный контроль состояния и режимов всех элементов электрической сети, которые реагируют на возникновение повреждения или ненормального режима и действуют на поврежденный участок сети[3].

Защита электродвигателей организованная на базе микропроцессорного терминала (МТ) БМРЗ-0,4ВВ позволяет одним блоком заменить несколько десяткой электрохимических устройств, поскольку способен выполнять несколько функций:

- Контроль параметром сети (тока и напряжения);

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

- Повышенная чувствительностью, что обеспечивает надежную защиту электродвигателя;
- Быстродействие;
- Режим самодиагностики.

Блок БМРЗ-0,4ВВ предназначен для выполнения функций релейной защиты, автоматики, сигнализации и управления рабочих вводов секций 0,4 кВ комплектных трансформаторных подстанций (КТП) 6 (10) / 0,4 кВ, секций собственных нужд электростанций, в том числе атомных, промышленных предприятий и других объектов.

Чтобы защитить электродвигатель (ЭД) применяют следующие защиты:

- Токовая отсечка, МТЗ (основная защита от КЗ в двигателе);
- Продольная дифференциальная защита (используется на мощных двигателях ($>5000\text{кВА}$);
- Защита от обрыва фаз (если такой режим может привести к дальнейшему повреждению двигателя или нарушению нормальной работы механизма);
- Защита от однофазных замыканий (если существует опасность перенапряжений и перерастания однофазного замыкания в междуфазное КЗ);
- Защита от перегрузки (на двигателях подверженных технологическим перегрузкам);
- Защита от понижения напряжения (групповая защита отключающая малоответственные двигатели при самозапуске)[4].

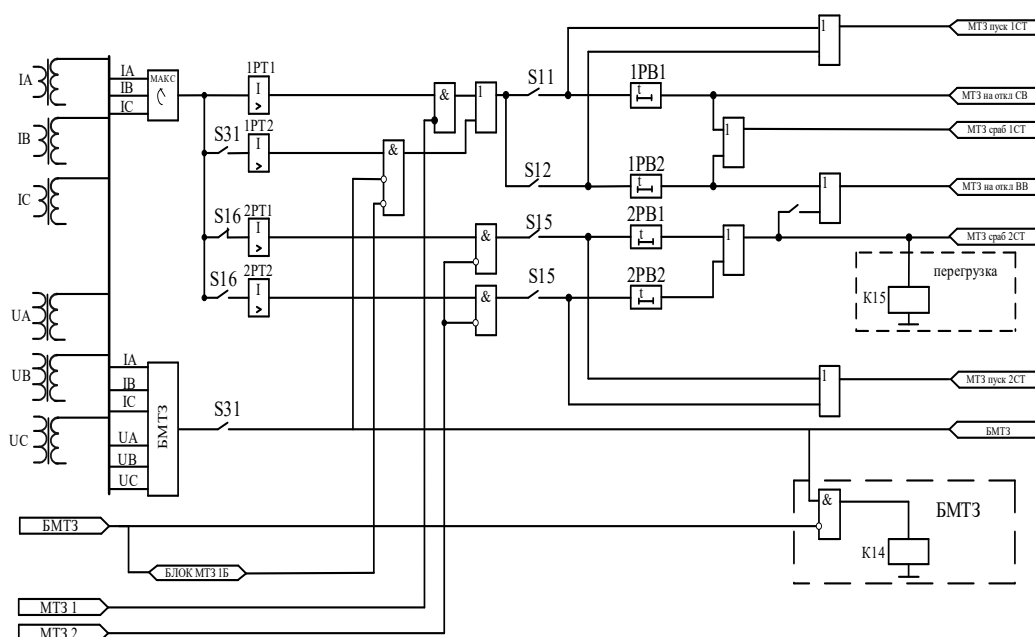


Рисунок 2. Функциональная схема МТЗ

Первая ступень максимальной токовой защиты реализована с независимой время-токовой характеристикой. В её состав входят два пусковых элемента с заданными параметрами «1РТ1» и «1РТ2», которые взаимодействуют с общими узлами выдержки времени. Пусковой элемент «1РТ1» находится в действии постоянно, тогда как элемент «1РТ2» задействуется совместно с функцией блокировки МТЗ (БМТЗ) и активируется посредством программного ключа S31.

Для первой ступени предусмотрены две временные задержки: «1РВ1» и «1РВ2». При срабатывании любого из пусковых органов («1РТ1» или «1РТ2») формируется команда на отключение секционного выключателя (СВ) с задержкой «1РВ1». А с выдержкой времени «1РВ2» выдается сигнал на отключение вводного выключателя (ВВ). При этом значение уставки «1РТ1» должно быть ниже, чем уставка «1РТ2».

Ввод первой ступени МТЗ в действие на отключение СВ выполняется программным ключом S11, а на отключение ВВ — ключом S12.

Вторая ступень максимальной токовой защиты (МТЗ) допускает функционирование как с независимой, так и с обратозависимой время-токовой характеристикой. Активация данной ступени производится с помощью программного переключателя S15, а задание нужного типа характеристики — переключателем S16.

Данная ступень МТЗ воздействует на отключение выключателя (ВВ) и/или на сигнализацию. Включение второй ступени в режим отключения ВВ выполняется программным ключом S14. При срабатывании этого уровня защиты формируется выходной сигнал под названием «Перегрузка».

Для блокировки первой ступени МТЗ используются логические сигналы «МТЗ 1» и «МТЗ 2», которые подаются соответственно на пусковые органы «1РВ1» и «2РВ2». Для блокировки второй ступени предусмотрен отдельный логический сигнал «МТЗ 2».

На данном стенде будет рассмотрена работа максимальной токовой защиты (МТЗ) и блокировка МТЗ. МТЗ сделана двухступенчатой, где первая ступень МТЗ выполнена с независимой времятоковой характеристикой и имеет два пусковых органа РТ1 и РТ2 с уставками, действующих на общие элементы выдержки времени. Пусковой орган РТ1 действует постоянно, а пусковой орган РТ2 работает совместно с функцией блокировка МТЗ при пусках и самозапусках электродвигателей (БМТЗ). Первая ступень МТЗ имеет две выдержки времени t_1 и t_2 . При срабатывании одного из двух пускового органа формируется сигнал на отключение секционного

выключателя (СВ) с выдержкой t_1 . С выдержкой t_2 формируется сигнал на отключение выключателя ввода (ВВ).

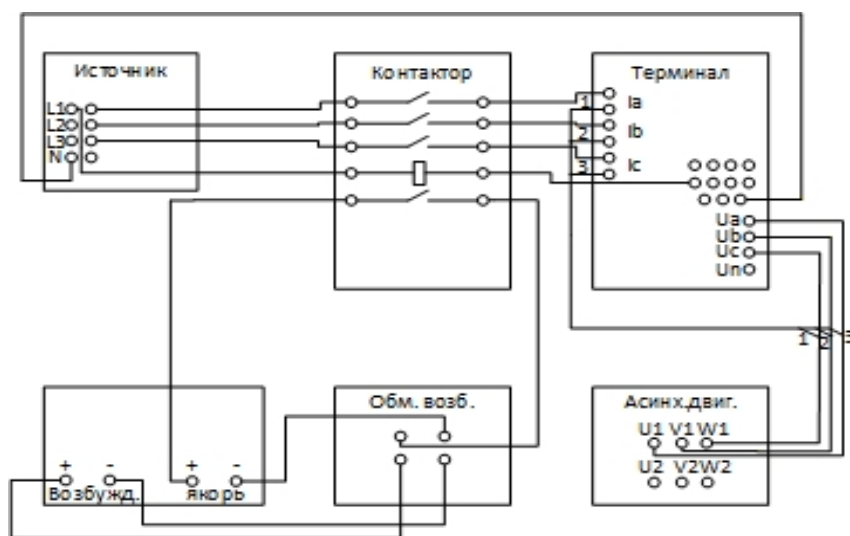


Рисунок 3 - Схема подключения ЭД

БМТЗ блокирует работу пускового органа РТ1 первой ступени МТЗ при пусках и самозапусках электродвигателей, для исключения излишнего срабатывания защиты.

Вывод

Разработанный стенд, организованный на базе терминала БМРЗ-0,4ВВ позволяет изучить работу терминала, логическую схему работы ступенчатой максимальной токовой защиты и отстройку (блокировку) от пусковых токов.

Также стенд в лабораторных условиях позволяет управлять выключателем по командам от защит, поступающим на дискретные входы, а также от кнопок управления на лицевой панели.

Перечень ссылок

1. Андреев, В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения : [учебник для вузов по специальности "Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства"] / В. А. Андреев. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : Высшая школа, 2002. - 639 с.
2. Басыров, Р. З. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учебное пособие / Р. З. Басыров, И. Г. Габдулхаков. — Казань : Издательство КНИТУ-КАИ, 2018. — 110 с.
3. Механотроника. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-0,4ВВ-50 : руководство по эксплуатации : ДИВГ.648228.082-08.06 РЭ / Механотроника. – [Б. м.] : [б. и.], 2025. – 102 с. – (БФПО-0,4ВВ-50_102 от 23.06.2025).
4. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем / Н.В.Чернобровов, В.А. Семенов.– М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с

УДК 621.433.3

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ДОНБАССА ОТ МИНИ ТЭЦ НА БАЗЕ ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВОК

О.Г. Брюнина

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва

Аннотация: В статье рассмотрены способы децентрализованного теплоснабжения в сложных условиях, связанных с перебоями энергии в Донбассе из-за атаки беспилотников. Предложено применение мини ТЭЦ на базе газопоршневых установок для особо важных объектов, в которых недопустим перебой подачи электроэнергии

Ключевые слова: энергоснабжение, децентрализованное, газоснабжение, газопоршневые установки, мини ТЭЦ

Annotation: The article examines methods of decentralized heat supply in difficult conditions associated with power outages in Donbas due to drone attacks. It is proposed to use mini-CHPPs based on gas piston plants for especially important facilities in which power outages are unacceptable

Keywords: power supply, decentralized, gas supply, gas piston plants, mini CHP

В настоящее время в Донбассе происходят перебои подачи электроэнергии в результате вражеских атак на систему энергоснабжения Республики. С начала года общий простой по причинам отсутствия электроэнергии в котельных составил более девяти тысяч часов. 19 января была самая длительная остановка, одна из самых массовых. Стояла 521 котельная из 1017, в связи с чем люди не получали тепло [1].

Выходом из сложившейся ситуации для особо значимых объектов, где невозможен перерыв в подаче электроэнергии, может быть развитие децентрализованного теплоснабжения объектов малой энергетики (до 30 МВ).

Установки для децентрализованного теплоснабжения, при работе на органическом топливе могут базироваться на микротурбинах (МТУ), газопоршневых установках (ГПУ), газотурбинных установках (ГТУ) и дизельных двигателях [2].

К основным недостаткам газовых турбин относятся: нижний порог эффективного применения (от 5 МВт электроэнергии); время их запуска значительно больше, чем у ГПУ; на малых нагрузках у них резко снижается КПД; для их работы нужен газ высокого давления.

Основное преимущество газопоршневых двигателей перед

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

дизельными, это использование более дешёвого топлива и экологическая безопасность, например, уровень выбросов оксидов азота в три раза меньше

К недостаткам газовых микротурбин относятся низкий электрический КПД, до 30% и соответственно низкая экономичность, в то время как электрический КПД у ГПУ выше 40 %. Стоимость МТУ в 2-3 раза выше чем ГПУ, а расход газа на них в полтора раза больше, чем на ГПУ. Использование микротурбин экономически оправдано в диапазоне мощностей до 250 кВт.

Сейчас в Донбассе уделяется большое внимание газоснабжению территорий. Глава Донецкой Народной Республики Денис Пушилин анонсировал начало масштабных работ по развитию газотранспортной инфраструктуры в регионе. В рамках стратегической программы планируется обеспечить голубым топливом свыше 13 тысяч домовладений в ранее прифронтовых районах Донецка и Макеевки. Параллельно ведется разработка генеральной схемы газоснабжения и газификации Республики до 2046 года [3].

Это позволит применять газопоршневые установки, работающие на газе для энергообеспечения особо важных объектов. Срок окупаемости ГПУ 3-4 года и стоимость 1кВтч более чем в 3 раза меньше, чем от сетевого потребителя [4].

Схематично ГПУ, работающая в составе мини ТЭЦ изображена на рис.1.

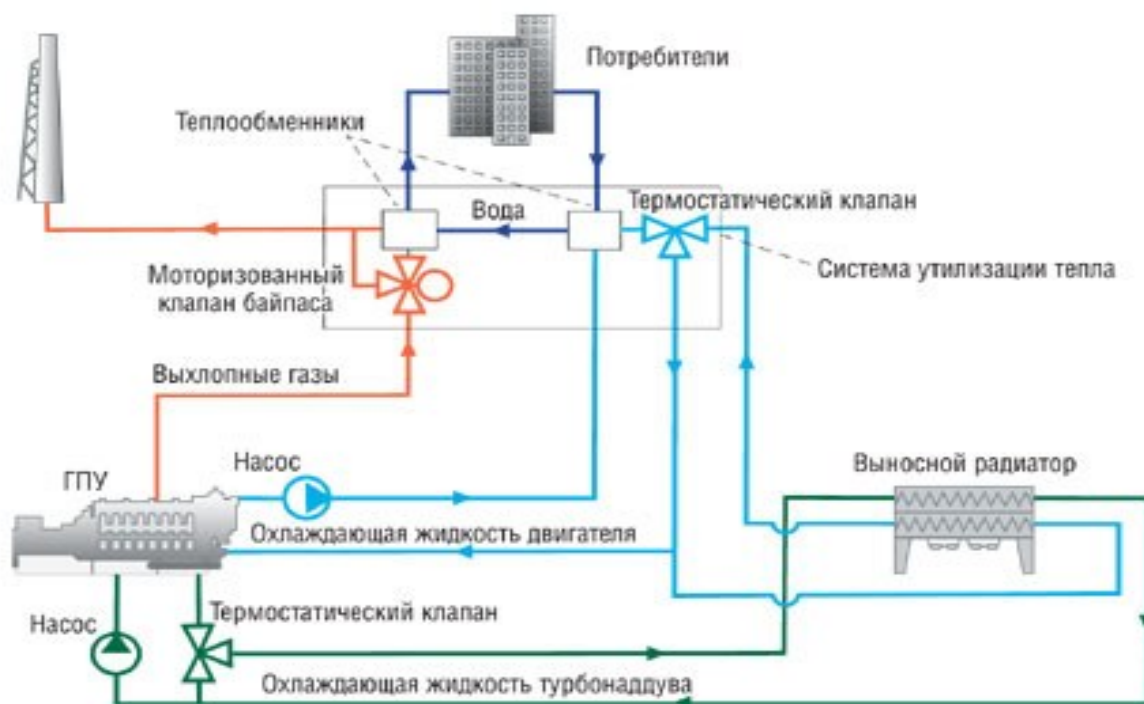


Рисунок 1 – Схема мини ТЭЦ на базе ГПУ

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

В основе газопоршневой установки находится двигатель внутреннего сгорания. При ее работе вырабатывается электрическая энергия. Тепло от охлаждения двигателя и уходящих дымовых газов можно использовать для теплоснабжения потребителей в составе мини ТЭЦ. Такие установки можно купить в контейнерах заводской готовности и привозить на объект полностью смонтированными.

Такое децентрализованное теплоснабжение позволит стабильно обеспечивать электроэнергией и теплом особо значимых объектов, на которых не допустимы перебои энергоснабжения.

Выводы

1. В настоящее время в Донбассе происходят перебои подачи электроэнергии в результате вражеских атак на систему энергоснабжения Республики Выходом из сложившейся ситуации для особо значимых объектов, где невозможен перерыв в подаче электроэнергии, может быть развитие децентрализованного теплоснабжения объектов малой энергетики (до 30 МВ).
2. Наиболее экономичной и удобной в эксплуатации является ГПУ.
3. Газификация Республики позволит использовать ГПУ для получения тепловой и электрической энергии в составе мини ТЭЦ и обеспечить надежное энергоснабжение особо значимых объектов, перебои энергоснабжения на которых не допустимы..

Перечень ссылок

1. Сбои связаны с обстрелами и авариями: В «Донбасстеплоэнерго» рассказали, почему могут возникать проблемы с теплоснабжением в ДНР 26 января 2026 –URL:<https://www.donetsk.kp.ru/daily/27753/5201408/>
2. О.Г.Брюнина Газопоршневые установки отечественного производства в малой энергетике [Текст]/О.Г. Брюнина // Новое в российской электроэнергетике. 2023. -№ 1.- С.26 -31.
3. В ДНР запускают масштабную программу газификации прифронтовых территорий.–URL:<https://www.mk-donbass.ru/economics/2025/11/13/v-dnr-zapuskayut-masshtabnuyu-programmu-gazifikacii-prifrontovykh-territoriy.html>.
4. ГТУ, ГПУ или микротурбины: какой тип газовой электростанции выбрать для предприятия в 2025 году? –URL: <https://manbw.ru/analitics/gtu-gpu-ili-mikroturbiny-kakoy-tip-gazovoy-elektrostantsii-vybrat-dlya-predpriyatiya-v>.

УДК 661.961

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА В УСЛОВИЯХ ДОНБАССА

Д.В. Полковниченко, А.А. Барыкин
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Настоящая статья посвящена комплексному исследованию и сравнительному анализу существующих методов производства водорода, адаптированных к специфике и ресурсной базе Донбасса. В условиях энергетической трансформации и стремления к повышению энергоэффективности, водород рассматривается как один из ключевых энергоносителей будущего, способный обеспечить устойчивое развитие промышленности региона.

Ключевые слова: водород, Донбасс, способ получения, синтез-газ, возобновляемые источники энергии, экономическая эффективность, экологическое воздействие.

Annotation: This article is devoted to a comprehensive study and comparative analysis of existing hydrogen production methods adapted to the specifics and resource base of Donbass. In the context of energy transformation and the desire to increase energy efficiency, hydrogen is considered as one of the key energy sources of the future, capable of ensuring the sustainable development of the region's industry.

Keywords: hydrogen, Donbass, production method, synthesis gas, renewable energy sources, economic efficiency, environmental impact.

В контексте глобального энергетического перехода и стремления к снижению углеродного следа, водород позиционируется как один из наиболее перспективных энергоносителей XXI века. Его уникальные свойства – высокая энергоемкость, отсутствие вредных выбросов при конечном использовании – делают его ключевым элементом для декарбонизации промышленных секторов, транспорта и энергетики. Однако, несмотря на общемировые тенденции, практическая реализация водородной стратегии требует глубокого анализа специфических региональных условий, учитывающих доступность сырьевых ресурсов, существующую инфраструктуру, экономические факторы и экологические аспекты.

Масштабное применение водорода в различных сферах хозяйственной деятельности – принципиально новое направление, перспективы которого до сих пор остаются неопределёнными.

Развитию водородной энергетики препятствует ряд серьёзных барьеров [1]:

- высокие издержки производства «возобновляемого» и «низкоуглеродного» водорода;
- отсутствие оптимальных и доступных по цене технологий транспортировки и хранения водорода;
- отсутствие технологий по улавливанию и хранению углекислого газа в ряде стран, стремящихся стать значимыми производителями «низкоуглеродного» водорода;
- дефицит пресной воды в ряде стран, планирующих крупномасштабное производство водорода методом электролиза.

Согласно действующей Энергетической стратегии России [2], целевые объёмы экспорта водорода на зарубежные рынки составят 2 млн. т в 2035 г.

Донбасс исторически сложился как крупный промышленный регион с развитой металлургией, угледобычей и машиностроением. Перед регионом стоят задачи восстановления промышленности, обеспечения энергетической независимости и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду. Выбор оптимального способа получения водорода для условий Донбасса должен учитывать как глобальные тенденции развития водородных технологий, так и местную специфику – сырьевую базу, производственные мощности, научный потенциал и текущие потребности экономики.

Цель настоящей работы – провести сравнительный анализ основных методов получения водорода и определить наиболее перспективный для внедрения в условиях Донбасса.

Существующее промышленное производство водорода преимущественно основано на использовании в качестве сырья угля и газа. При этом процесс производства водорода сопровождается выделением достаточно большого количества CO_2 [3].

Существуют десятки способов получения водорода, но в реальности на практике применяются лишь несколько из них. Генерация H_2 остается одной из главных проблем в области водородной энергетики, ведь задача – не просто получить водород, но и сделать этот процесс максимально экологичным и экономически выгодным.

Для объективного сравнения различных способов получения водорода современные исследования используют многокритериальные методы оценки, учитывающие капитальные затраты (CAPEX), операционные затраты (OPEX), эффективность, уровень технологической готовности, экологическое воздействие и другие

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

факторы [4].

В табл. 1 представлено обобщённое сравнение рассмотренных методов [5].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов получения водорода

Параметр	Паровая конверсия метана	Газификация угля	Электролиз (щелочной)	Термическое разложение
Сырьё	Природный газ	Уголь	Вода + электроэнергия	Углеводороды
Эффективность, %	До 80	70-75	60-80	Н/Д
Выбросы CO ₂	Высокие	Высокие	Низкие (при ВИЭ)	Средние
Чистота H ₂	Требуется очистки	Требуется очистки	Высокая	Требуется очистки
Уровень готовности	Промышленный	Промышленный	Промышленный	Опытный
Капитальные затраты	Низкие	Средние	Высокие	Средние

Анализ показывает, что с чисто технической точки зрения паровая конверсия метана является наиболее экономически эффективным методом, однако она критически зависит от наличия дешёвого природного газа и связана со значительным углеродным следом. Электролиз обеспечивает экологическую чистоту, но требует больших объёмов электроэнергии и высоких капиталовложений. Газификация угля занимает промежуточное положение, предлагая относительно недорогое сырьё при умеренных капитальных затратах.

Определение оптимального способа получения водорода для Донбасса должно опираться на комплекс факторов, характеризующих регион.

1. *Сырьевая база.* Донбасс располагает значительными запасами каменного угля, включая так называемые «тощие» угли, которые могут быть использованы для газификации. Уголь является традиционным для региона видом топлива, и его переработка в синтез-газ позволяет снизить зависимость от импортируемого природного газа. По оценкам донецких учёных, в угле содержится до 60% водорода.

2. *Научно-технический и промышленный потенциал.* Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ) имеет многолетний опыт исследований в области водородной энергетики. Проблемная научно-исследовательская лаборатория взаимодействия водорода с металлами и водородных технологий, созданная ещё в 1977 г., разработала ряд технологий газификации углей. Учёными ДонНТУ

предложена стратегия поэтапного перехода к водородной экономике (HySi-доктрина: «Водородная энергетика – водородная экономика – водородная цивилизация»).

Важно отметить, что в регионе уже имеется опыт создания и эксплуатации газогенераторов. Первый такой генератор был создан и испытан на машиностроительном заводе в Горловке, показав производительность 3,4 тыс. м³ синтез-газа в час и обеспечив годовую экономию 700 тыс. грн. – это не считая экологического эффекта [6].

3. *Энергетические потребности.* Промышленность Донбасса, особенно металлургические предприятия, является крупным потребителем энергоресурсов. Замена природного газа на синтез-газ, получаемый из местного угля, может существенно повысить энергетическую безопасность региона. По расчётам специалистов, КПД газогенераторных установок может достигать 70-75%, а калорийность получаемого топлива – от 5 до 9 МДж/м³.

4. *Экологические аспекты.* Донбасс относится к регионам с высокой техногенной нагрузкой. Использование водородных технологий, даже на основе углеводородного сырья, позволяет снизить выбросы загрязняющих веществ при сжигании топлива. При сжигании водорода не образуются вредные выбросы. Кроме того, газификация угля в закрытых реакторах с последующей утилизацией CO₂ (технологии Carbon Capture and Storage) может быть экологически более приемлемой, чем прямое сжигание угля.

Донбасс с его развитой угольной промышленностью и наличием квалифицированных кадров может стать центром производства «голубого» водорода (из ископаемого сырья с улавливанием CO₂) на этапе, пока «зелёный» водород остаётся экономически недоступным. Однако имеющийся потенциал сосредоточен в регионе с ограниченными водными ресурсами и требует огромных инвестиций.

На основе проведённого анализа можно сделать вывод, что для условий Донбасса оптимальным способом получения водорода является газификация угля с производством синтез-газа. Данный вывод основывается на следующих аргументах:

- доступность сырья;
- наличие технологической базы;
- экономическая целесообразность;
- масштабируемость;
- экологические преимущества.

Паровая конверсия метана, несмотря на мировую распространённость, в условиях Донбасса уступает газификации угля из-за отсутствия собственных запасов природного газа и высокой

стоимости его импорта. Электролиз воды, хотя и является наиболее экологичным методом, требует огромных капиталовложений в возобновляемую энергетику и пока экономически неконкурентоспособен в регионе. Коксование и термическое разложение углеводородов могут рассматриваться как вспомогательные или дополнительные источники водородсодержащих газов.

Выводы

Проведённый сравнительный анализ способов получения водорода показывает, что не существует универсального решения, пригодного для всех регионов и условий. Выбор оптимальной технологии должен определяться конкретными факторами: наличием сырья, развитостью инфраструктуры, научно-техническим потенциалом, энергетическими потребностями и экологическими требованиями.

Для Донбасса, располагающего значительными запасами угля и имеющего собственные научные разработки в области газификации, наиболее перспективным направлением является производство водорода и синтез-газа из угля. Реализация этого направления позволит решить ряд критически важных задач: повысить энергетическую независимость региона; обеспечить загрузку угольной промышленности; создать новые рабочие места; снизить техногенную нагрузку на окружающую среду; сохранить и развить научно-технический потенциал.

Учитывая заинтересованность промышленных предприятий ДНР в апробации и внедрении технологий ДонНТУ, а также наличие пилотных проектов, можно утверждать, что газификация угля имеет реальные перспективы стать основой водородной энергетики Донбасса.

Перечень ссылок

1. Водород: формирование рынка и перспективы России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://eipc.center/pdf/daijest_18_05/market_ipem_present_april_2022.pdf
2. Распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
3. Романов, А. С. Водородная энергетика: сравнительный анализ способов получения водорода / А. С. Романов // Научные записки молодых исследователей. – 2023. – Т. 11, № 3. – С. 73-80.
4. Веселов, Ф. Экономика производства водорода с учетом экспорта и российского рынка / Ф. Веселов, А. Соляник // Энергетическая политика. – 2022. – № 4(170). – С. 58-67.
5. Теоретическая основа и практический анализ технологий для водородной стратегии Российской Федерации / Н. П. Кодряну, А. А. Ишмурзин, Д. И. Дауди [и др.] // Газовая промышленность. – 2022. – № 1(827). – С. 56-70.
6. Донецкие ученые разработали стратегию перехода ДНР к водородной энергетике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://donntu.ru/news/doneckie-uchenye-razrabotali-strategiyu-perehoda-dnr-k-vodorodnoy-energetike>

УДК 621.548.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В.Г. Черников, И.В. Власик
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический
университет», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Разработана методика определения энергоэффективности ветрогенераторной установки с учётом параметров всех компонентов преобразования энергии и параметров местности расположения ВЭС. Предложенная методика использована применительно к ветроустановке на базе асинхронного генератора с переменной скоростью вращения.

Ключевые слова: ветрогенераторная установка, ветроэнергетика, энергоэффективность, асинхронный генератор, распределение Вайбула.

Annotation: A method for determining the energy efficiency of a wind turbine has been developed, taking into account the parameters of all energy conversion components and the parameters of the location of the wind farm. The proposed method is used in relation to a wind turbine based on an induction generator with variable rotation speed.

Keywords: wind turbine, wind energy, energy efficiency, asynchronous generator, Weibul distribution.

За последнее десятилетие в Российской Федерации доля генерируемой электрической мощности на ветровых электростанциях неуклонно растёт. Поэтому расчёт энергоэффективности строящихся ВЭС является важной народно-хозяйственной задачей. В статье исследуется методика расчёта энергоэффективности ветроустановок с учётом к.п.д. всех используемых компонентов.

Постановка задачи. Разработать методику определения энергоэффективности ветрогенераторной установки с учётом параметров всех компонентов механо-электрического преобразования энергии и параметров местности расположения ВЭС.

В ветрогенераторных установках преобразование кинетической энергии воздушных масс в электрическую энергию осуществляется в несколько ступеней. То есть цепь преобразования энергии можно разделить на следующие звенья.

Во-первых, это аэродинамическое преобразование энергии ветрового потока в кинетическую энергию вращающегося ветроколеса.

Потери энергии в этом звене описываются коэффициентом мощности ветроколеса, который также можно назвать аэродинамическим к.п.д. – $\eta_{\text{аэродин.}} = c_{pw}$. Этот к.п.д. зависит в основном от числа и формы лопастей ветроколеса. Данный этап является отправной точкой всего процесса преобразования энергии.

Во-вторых, это механическое преобразование энергии вращающегося ветроколеса в энергию ротора генератора. В этом звене энергетического преобразования надо учитывать затраты энергии на трение в подшипнике и редукторе. Суммарные потери энергии учитываются с помощью механического к.п.д. – $\eta_{\text{мех.}}$.

Завершающим этапом является процесс преобразования кинетической энергии ротора генератора в электрическую энергию. В этом процессе задействованы такие основные элементы электрооборудования ветроустановки как генератор, преобразователь, если он есть, и сетевой трансформатор. Потери энергии в этом звене учитываются с помощью электрического к.п.д. – $\eta_{\text{эл.}}$ [1]. Таким образом выходная электрическая мощность ветроустановки может быть рассчитана по формуле (1).

$$P_{\text{эл.}} = \eta_{\text{аэродин.}} \cdot \eta_{\text{мех.}} \cdot \eta_{\text{эл.}} \cdot P_0, \quad (1)$$

где P_0 – мощность ветрового потока, проходящего сквозь площадь вращения ветроколеса. На рисунке 1 схематично показана вышеописанная цепочка механо-электрического преобразования энергии.

На рисунке указана принадлежность каждого звена цепи преобразования к аэродинамическому, механическому или электрическому к.п.д.

Для расчета среднегодовой выработки энергии целесообразно воспользоваться формулой (2).

$$E = T \cdot \int_0^{\infty} h(v) \cdot P_{\text{эл.}}(v) \cdot dv, \quad (2)$$

где T – исследуемый период времени, $h(v)$ – функция распределения скорости ветра, $P_{\text{эл.}}(v)$ – зависимость выходной электрической мощности ветроустановки от скорости ветра.

Если в формулу (2) подставить выражения из формулы (1) и постоянные коэффициенты, не зависящие от скорости ветра, вынести за знак интеграла то можно получить формулу (3).

$$E = T \cdot 0.49 \cdot D^2 \cdot \eta_{\text{мех.}} \cdot \int_0^{\infty} h(v) \cdot c_{pw}(v) \cdot v^3 \cdot \eta_{\text{эл.}}(v) \cdot d(v). \quad (3)$$

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Рассмотрев преобразования, можно перейти к допущениям модели. При выводе этой формулы сделано предположение, что механический к.п.д. системы- $\eta_{\text{мех.}}$, описывающий расход энергии в редукторе и подшипниках не зависит от скорости ветра, а аэродинамический к.п.д. – $c_{pw}(v)$ и электрический к.п.д. - $\eta_{\text{эл.}}(v)$ являются функциями скорости ветра. Надо отметить, что для расчета выработки энергии по формуле (3) надо иметь аналитическое выражение для всех подинтегральных функций. Исследование аналитических выражений начнем с первой подинтегральной функции $h(v)$ – распределения скорости ветра, несущей в себе статистическую информацию о поведении скорости ветра в том или ином регионе. Обычно для математического описания распределения используются распределения Райляйха или Вайбула.

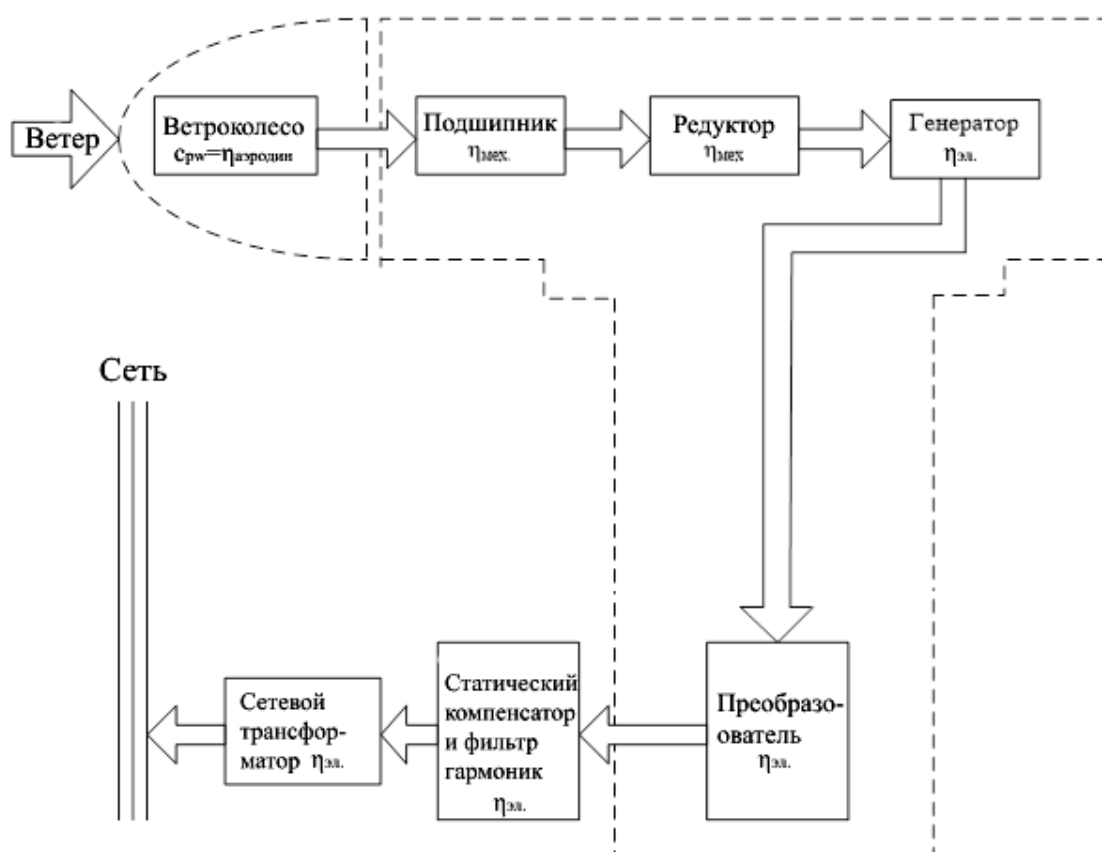


Рисунок 1 - Цепочка механо-электрического преобразования
энергии ветрогенераторной установки.

Более точную статистическую информацию дает распределение Вайбула, который описывается формулой (4)

$$h_w(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right), \quad (4)$$

где A – коэффициент распределения Вайбула, имеющий размерность м/с, k – коэффициент формы кривой, которой изменяется в пределах от 1 до 4 и зависит от ветровых условий

Графическое изображение распределения Вайбула приведено на рисунке 2.

После анализа распределения ветра необходимо рассмотреть энергетические параметры. Вторым исследовательским элементом подинтегральной функции является аэродинамический к.п.д., т.е. коэффициент мощности ветроколеса $c_{pw}(v)$. Значение этого коэффициента существенно зависит от угла притекания β , то есть от соотношения между векторной компонентой воздушного потока, возникающей вследствие вращения ветроколеса, и - векторной компонентой воздушного потока, возникающей благодаря ветру.

Расчет зависимости коэффициента мощности ветроколеса c_{pw} от быстроходности λ_0 осуществляется согласно методике, приведенной в [2].

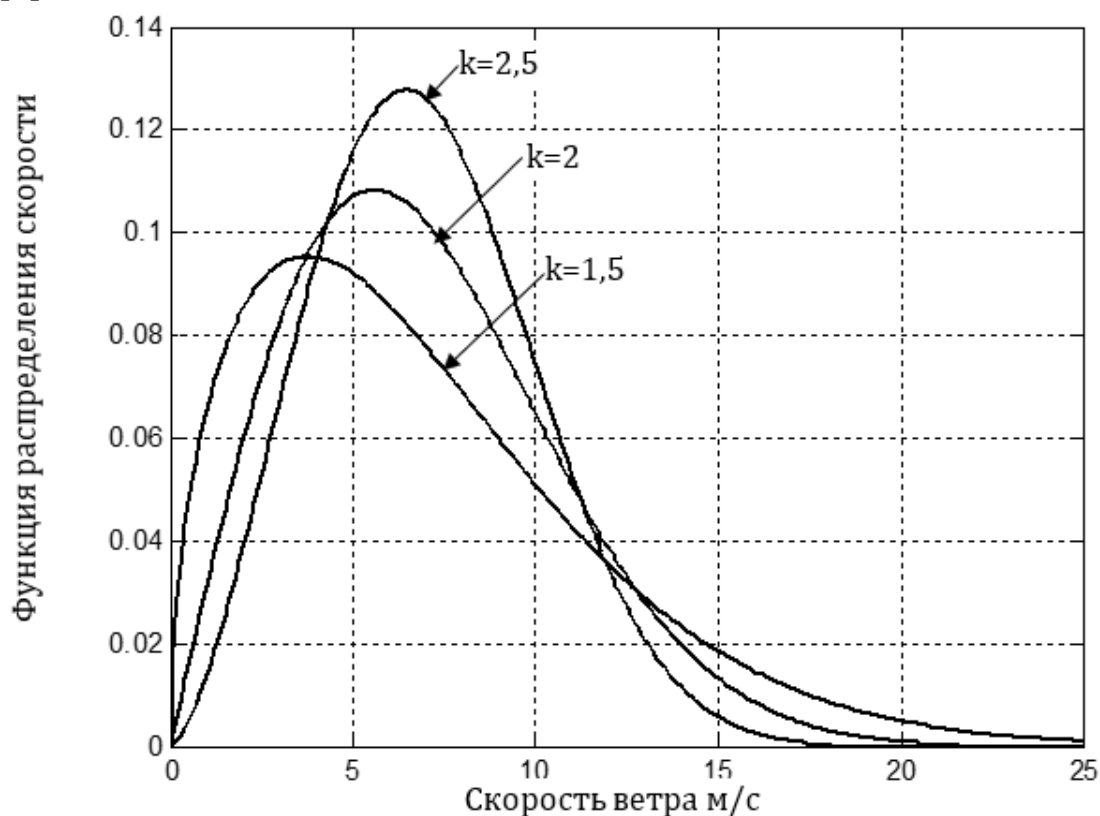


Рисунок 2 - Распределение Вайбула для среднегодовой скорости ветра 7 м/с и различных значений коэффициента формы кривой - k .

Результаты этого расчета, выполненные для ветроколеса со значениями расчетной быстроходности от 5 до 8, приведены на рис. 3.

Для того, чтобы воспроизвести нелинейную зависимость $c_{pw}(\lambda_0)$ целесообразно пользоваться возможностями различных аппроксимирующих функций или нейросетей. Для того, чтобы перейти от зависимости $c_{pw}(\lambda_0)$ к зависимости коэффициента мощности ветроколеса от скорости ветра $c_{pw}(v)$ надо учесть формулу (5), показывающую связь между быстроходностью и скоростью ветра, и концепцию построения ветроустановки.

$$\lambda_0 = \frac{\omega_w \cdot R}{v}, \quad (5)$$

где, ω_w -угловая частота вращения ветроколеса, R -радиус ветроколеса.

Анализируя формулу (3), можно увидеть, что в этой формуле в операции интегрирования принимает участие не сам коэффициент мощности ветроколеса c_{pw} , а его произведение с кубом скорости ветра, который влияет на вид кривой мощности. Поэтому целесообразно провести исследование влияния концепции ветроустановки не только на зависимость коэффициента мощности c_{pw} от скорости ветра, но и на вид кривой мощности ветроколеса. Кривые мощности ветроколеса для двух различных концепций ветроустановки, учитывающие только аэродинамический к.п.д. ветроустановки, приведены на рис. 4.

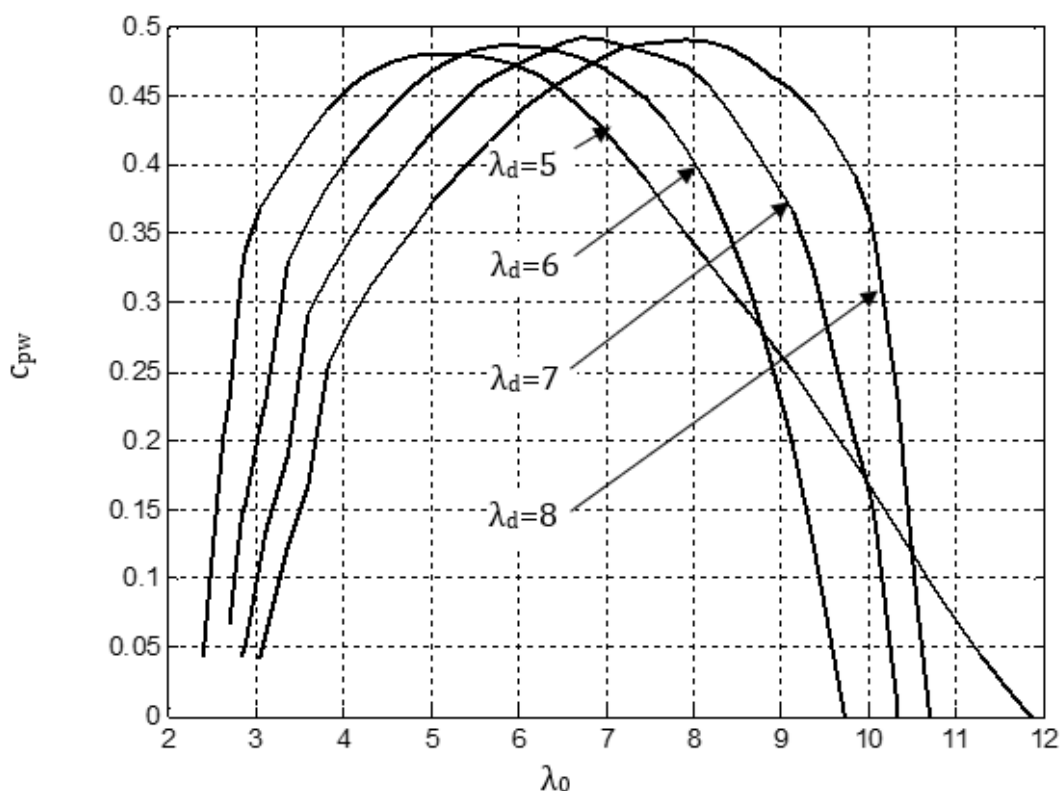


Рисунок 3 - Зависимость $c_{pw}(\lambda_0)$ для различных расчетных быстроходностей ветроколеса на основе профиля NACA 4412.

Таким образом, собрав все необходимые зависимости, удалось получить всю необходимую информацию для проведения расчета по формуле (3). Надо заметить, что при проведении операции интегрирования механический к.п.д. ветроустановки считался постоянным и принимался равным 0,97 и к.п.д. преобразователя для ветроустановки с переменной частотой вращения ветроколеса принимался равным 0,975. Методика расчета зависимости к.п.д. генератора от скорости ветра приведена в [3]. Понятно, что результат интегрирования будет зависеть от взаимного расположения подинтегральных функций. На расположение этих кривых будут влиять такие параметры как, фактор формы кривой в распределении Вайбула- k , расчетная быстроходность ветроколеса λ_d и выбранная скорость ветра v_{opt} , при которой ветроколесо с неизменной частотой вращения будет достигать максимального значения коэффициента мощности c_{pw} , пример взаимного расположения выше обозначенных функций приведен на рисунке 4.

Для получения зависимостей на рис. 4 применялись следующие параметры: при расчете кривой мощности ветроколеса с неизменной частотой вращения значение скорости ветра $v_{opt} = 8$ м/с, расчетная быстроходность ветроколеса $\lambda_d = 6$, коэффициент формы кривой в распределении Вайбула $k = 2$. ограничение мощности ветроколеса проводилось с учетом номинальной мощности генератора.

Для интерпретации полученных результатов и более удобного восприятия результатов расчета целесообразно использовать как результат не суммарную выработку энергии за год, а среднегодовую мощность ветроустановки, рассчитываемую по формуле (6).

$$P_{ср.уст} = \frac{E}{T} = 0.49 \cdot D^2 \cdot \eta_{мех.} \cdot \int_0^{\infty} h(v) \cdot c_{pw}(v) \cdot v^3 \cdot \eta_{ел.}(v) \cdot d(v), (6)$$

где T -исследуемый период времени.

Эффективность использования ветроустановки можно характеризовать с помощью коэффициента использования установленной мощности, который рассчитывается по формуле (7).

$$k_{исп} = \frac{P_{ср.уст}}{P_{ном.уст}} \quad (7)$$

где, $P_{ном.уст}$ -номинальная мощность установки.

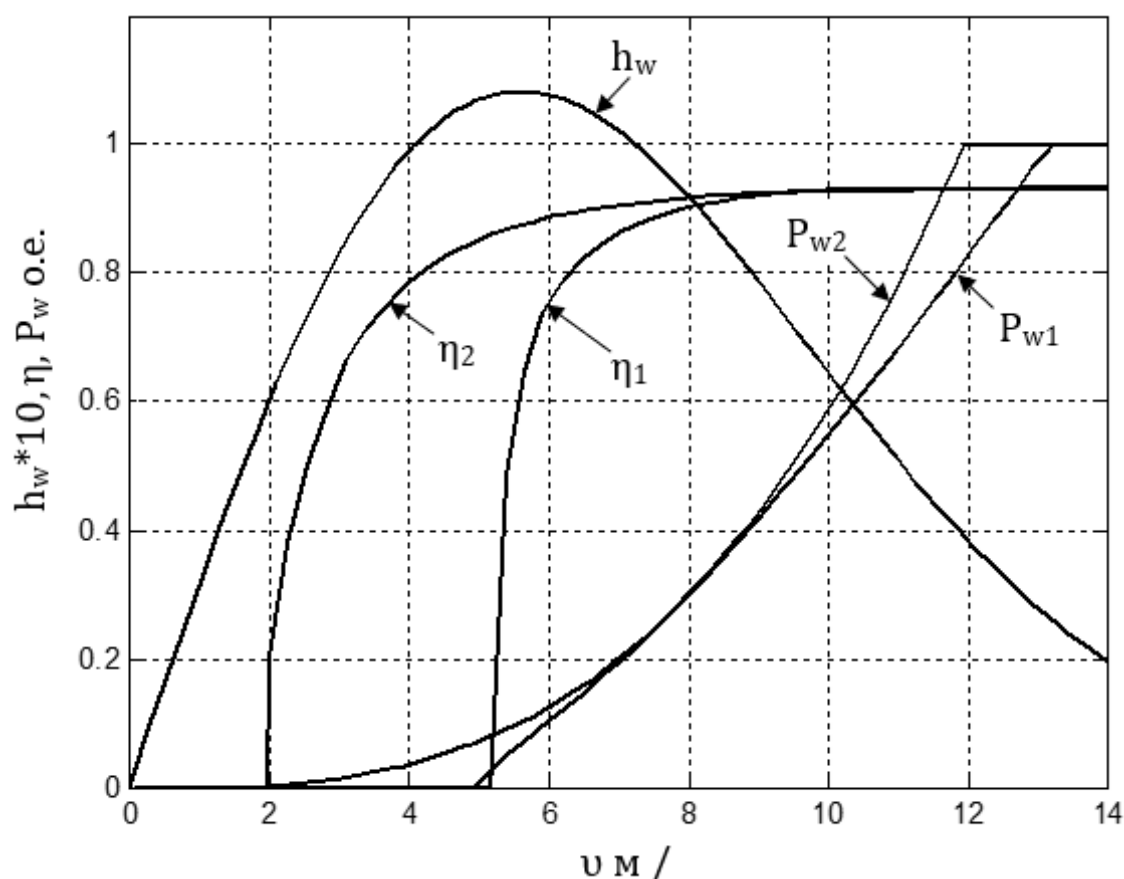


Рисунок 4 - Взаимное расположение зависимостей распределения Вайбула, мощности ветроколеса и к.п.д. генератора от скорости ветра для ветроустановки с неизменной (индекс 1) и переменной (индекс 2) частотой вращения ветроколеса.

Расчёты эффективности использования ветрогенераторной установки согласно формулам (6) и (7) были применены к ветроустановке с переменной скоростью вращения SWT-2,3, имеющей следующие технические параметры: мощность генератора – 2,3 МВт, диаметр ветроколеса – 76 м. высота башни – 80 м. [4].

В качестве опытного использовался регион со среднегодовой скоростью ветра $\bar{v}=6.1$ м/с. Такую среднегодовую скорость ветра имеет регион Новоазовской ветростанции.

Расчёт по приведенным выше формулам для указанной ветроустановки дал следующие результаты: среднегодовая мощность ветроустановки $P_{\text{ср.уст.}} = 860$ кВт, коэффициент установленной мощности $k_{\text{уст.}} = 37\%$. Расчётное значение коэффициента использования $k_{\text{уст.}}$ соответствует нормативам постановления правительства РФ 449 от 28.05.2013, согласно которому $k_{\text{уст.}}$ для ВЭС должен превышать 27% [5].

Выводы

1. Разработана методика определения энергоэффективности ВЭУ с учётом параметров всех её основных компонентов и параметров местности расположения.
2. Предложенная в статье методика была использована применительно к ветроустановке с переменной скоростью вращения ветроколеса SWT-2,3, что показало высокую степень её энергоэффективности в исследуемой местности расположения.

Перечень ссылок

1. Rekioua, D. *Wind Power Electric Systems: Modeling, Simulation and Control* / D. Rekioua. — London : Springer-Verlag, 2014. — 320 p. — ISBN 978-1-4471-6424-1.
2. Черников, В.Г. Совершенствование систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.3.3 / В. Г. Черников. — Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2023. — 24 с.
3. Черников В.Г. Отчет по научно-исследовательской работе Д-12-07 «Оптимизация режимов работы ветрогенераторных установок с использованием нейро-адаптивного регулятора мощности и систем векторного регулирования момента асинхронного генератора»/ Черников В.Г., Сивокобыленко В.Ф., Старостин С.С., Старостина В.М., Передрий А.В. – Донецк: ДонНТУ, 2008. - № гос. Регистрации 0107U001481. – 268 с.
4. Wu, B. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems* / B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. — 460 p. — ISBN 978-0-470-59407-1.
5. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2013 г. № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2013. — № 23. — Ст. 2909.

УДК 620.97

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Я.А. Воронин, Р.В. Булатов, И.А. Баннов, Н.А. Коренев, Ф.А. Чудин
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» г. Донецк, Россия

Аннотация: В рамках работы рассматривается применение аккумуляторной системы накопления электроэнергии (СНЭЭ) для увеличения доступной мощности технологического присоединения в распределительных электрических сетях 6/0,4 кВ за счет регулирования графика нагрузки на шинах трансформаторных подстанций (ТП)

Ключевые слова: система накопления электроэнергии, распределительная электрическая сеть, технологическое присоединение

Abstract: This study examines the use of a battery storage system (BESS) to increase the available grid connection capacity in 6/0.4 kV distribution networks by regulating the load profile on the transformer substation (TS) buses

Keywords: energy storage system, electrical distribution network, technological connection to electric networks

Система накопления электрической энергии (СНЭЭ) – установка с определенными границами, подключенная к электрической сети, включающая, как минимум один накопитель электрической энергии, которая извлекает электрическую энергию из электроэнергетической системы, хранит эту энергию внутри себя в какой-либо форме и отдает электрическую энергию обратно в электроэнергетическую систему [1]. Сегодня отрасль СНЭЭ активно развивается за счет поддержки режимов работы электрических станций на базе ВИЭ, благодаря открытиям в этой отрасли для СНЭЭ нашли применения в решении проблем, возникающих в различных схемно-режимных ситуациях, повышении качества электроэнергии, разгрузки оборудования и т.п.

СНЭЭ активно применяется в распределительных электрических сетях (РЭС) как инструмент управления потоками мощностей [2]. На данный момент СНЭЭ в РЭС применяются в большей части у особой группы первой категории электроснабжения, где требуется

непрерывное электроснабжение. В сетях внутреннего электроснабжения применяются СНЭЭ небольшой мощности для снижения цены на электроэнергию путем разряда СНЭЭ в часы максимумов или минимумов, что снижает величину покупной мощности. В отдельные месяцы значение оплаты за мощность будет стремиться к нулю. Также СНЭЭ используют в РЭС совместно с ВИЭ для регулирования уровня напряжения. В РЭС СНЭЭ позволяет управлять мощностью генерирующего оборудования, выступают в качестве источников питания или резервных источников, обеспечивают требуемое качество электроэнергии [3].

Целью данной работы является исследование возможности применения СНЭЭ в распределительных сетях с целью увеличения мощности технологического присоединения за счет выравнивания графика нагрузки ТП, повышения надежности функционирования РЭС, а также устранения перегрузки ТР или целых участков путем установки накопителя непосредственно на шинах 0,4 кВ.

Для достижения заданной цели был смоделирован фрагмент распределительной электрической сети 6/0,4 кВ, с центром питания 110 кВ. Имитационная модель РЭС представлена на рисунке 1.

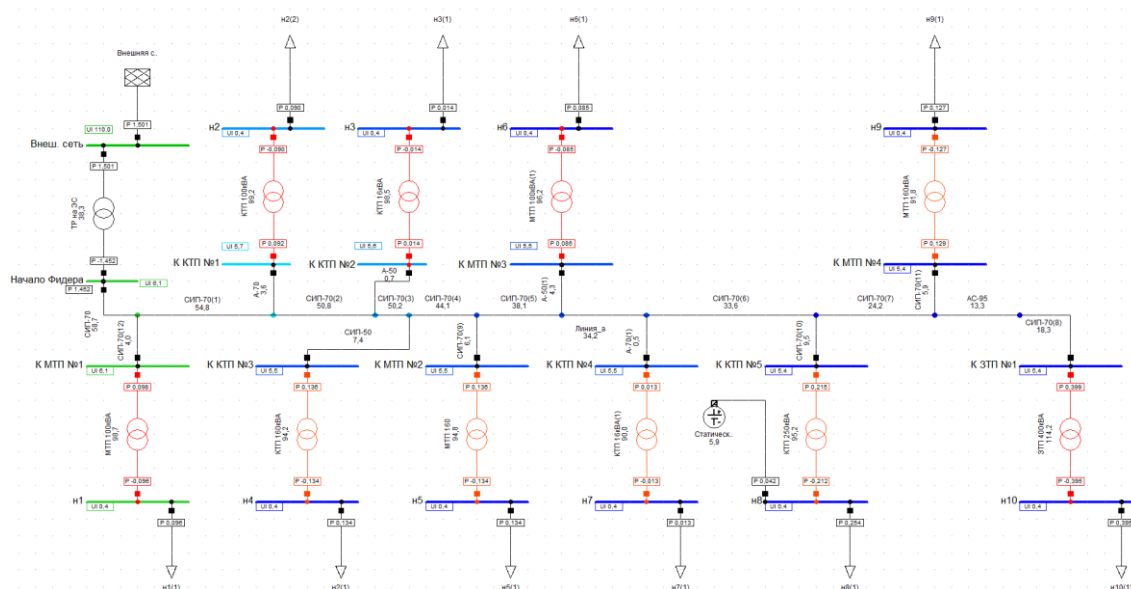


Рисунок 1 – Схема фидера 6 кВ в ПК PowerFactory

Фидер отходит от 2 секции ПС 110/6 кВ. Суммарная длина фидера, не учитывая отпайки к ТП составляет 8.36 км. Основная линия электропередачи, от которой идут отпайки проложена с помощью СИП-2 4×70 отпайки на рассмотренном участке проложены с помощью АС-95, А-50, А-70 и СИП-50. На трансформаторных подстанциях

установлены силовые трансформаторы типа ТМ, ТМГ мощностью от 16 до 400 кВА

Согласно графику почасовой нагрузки пиковая нагрузка за сутки на фидере составила 1,51 МВт, при этом известно, что все ТП, кроме КТП №5 и ЗТП №1, работают при номинальной нагрузке. Исходя из этих данных была составлена загрузка фидера в пиковые часы, представленная на рисунке 2.

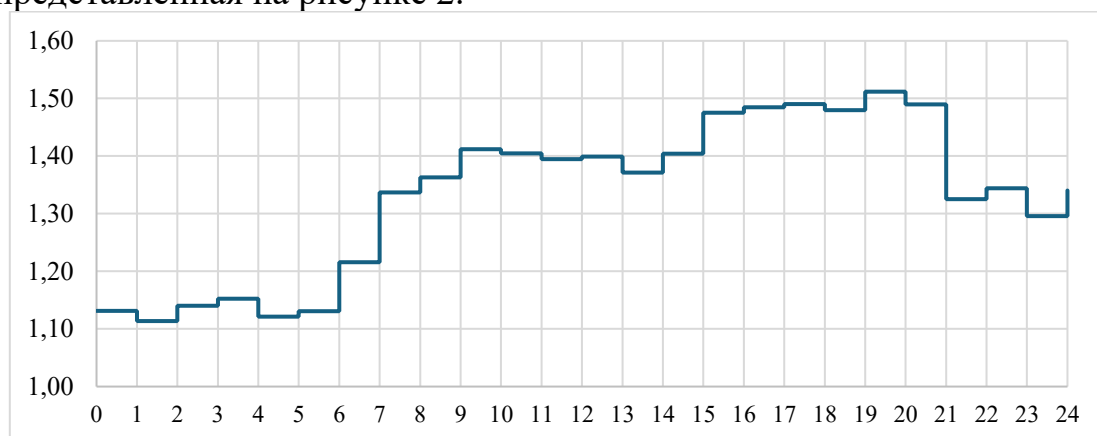


Рисунок 2 – Почасовая нагрузка на фидере 6 кВ

Применение СНЭЭ в данной работе заключается в увеличении суточной загрузки оборудования. В часы минимальной нагрузки, т.е. когда появляется возможность заряжать накопитель график нагрузки выравнивается путем заряда СНЭЭ. В часы максимальной нагрузки уже заряженная СНЭЭ отдает накопленную энергию в сеть, выравнивая график нагрузки. Таким образом коэффициент заполнения графика нагрузки ТП увеличивается, а в период пиковой нагрузки возможно передать дополнительный объем электроэнергии потребителям.

Выбор параметров СНЭЭ, мест их размещения с целью повышения пропускной способности сети, произведен, исходя из анализа загрузки ТП. Выбор рассматривается на примере графика суточной загрузки трансформаторов (рисунок 3).

На данном графике нагрузки, выделены два интервала времени, которые соответствуют времени заряда и разряда СНЭЭ. После выбора места установки СНЭЭ согласно методике, представленной в [2] и подключения СНЭЭ на шины 0,4 кВ график нагрузки ТП выравнивается (рисунок 4). Требуемая мощность СНЭЭ при этом составила 41,2 кВт, энергоемкость 42,773 кВт·ч.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

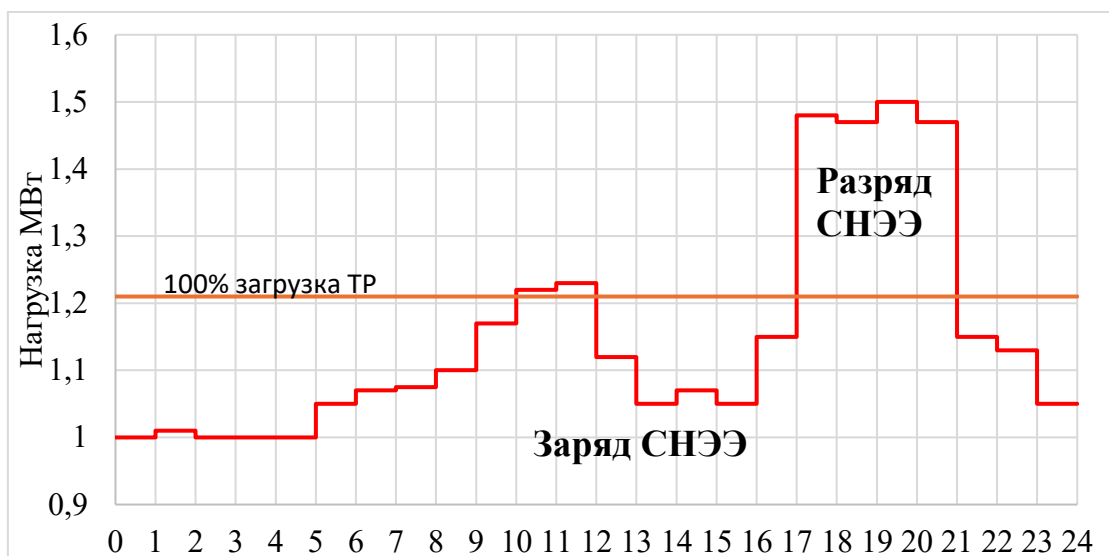


Рисунок 3 – Суточный график нагрузки с указанием работы СНЭЭ

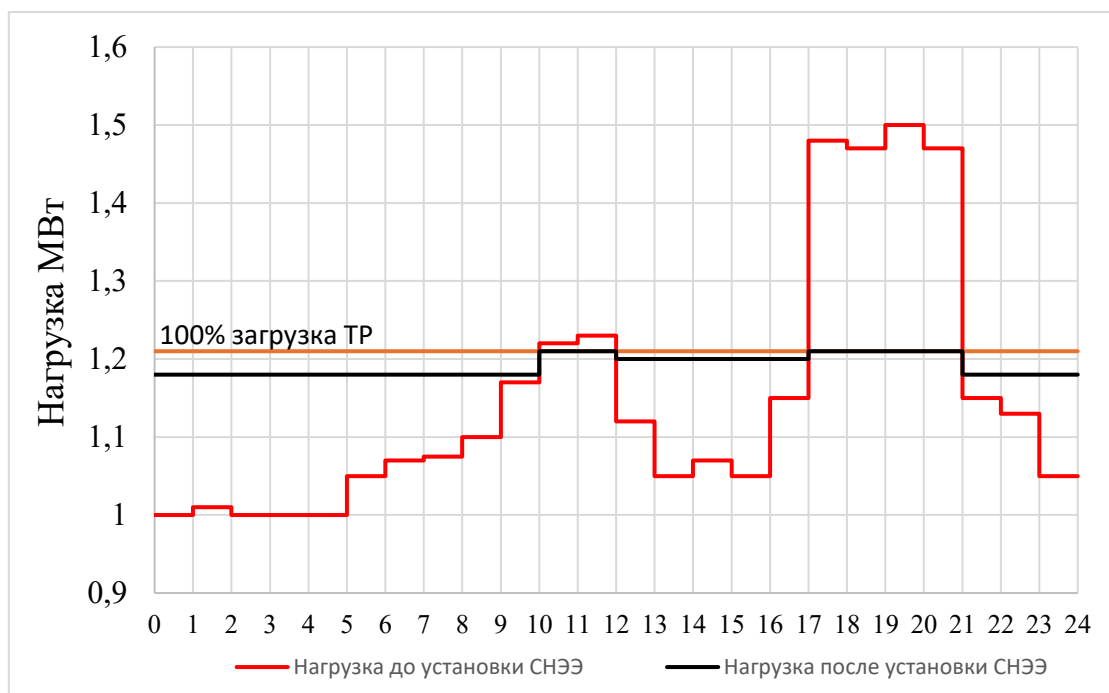


Рисунок 4 –Графики нагрузки на ТП с СНЭЭ и без

Вывод

Применение СНЭЭ позволило увеличить доступную мощность ТП на 40 кВт, а также разгрузить фидер 6 кВ. Согласно [4] был проведен технико-экономический расчет стоимость СНЭЭ составила 4,5 млн. руб. стоимость реконструкции исследуемой ТП составляет 4,7 млн.руб. Что дает нам доходность в 40 тыс. руб. в год. За счет отсрочки инвестиций в реконструкцию сети и увеличению отпускаемой мощности

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка физической модели системы накопления электроэнергии с реализацией цифрового управления различными подсистемами накопления» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.».

Перечень ссылок

1. ГОСТ Р 58092.3.2-2023. Системы накопления электрической энергии. Проектирование и оценка рабочих параметров. Применения с преимущественным использованием мощности и интеграция с возобновляемыми источниками энергии. - М.: Российский институт стандартизации, 2024. - 86 с.
2. Гусев Ю.П. Разработка усовершенствованной методики выбора параметров и мест размещения систем накопления электроэнергии в распределительных электрических сетях / Ю.П. Гусев, П.В. Субботин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 48–61.
3. Илюшин, П. В. Повышение надежности функционирования распределительных электрических сетей за счет эффективного применения систем накопления электроэнергии / П. В. Илюшин // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – № 6(75). – С. 64-74.
4. СТО 34.01-21-008-2025. Системы накопления электрической энергии. Методика оценки технико-экономической эффективности применения систем накопления электрической энергии в электрических сетях. Утвержден и введен в действие распоряжением ПАО «Россети» от 10.06.2025 № 304р: ПАО «Россети», 2022. 73 с.

УДК 621.311

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ РЕЖИМОВ БЕЛАЭС КАК ФАКТОР ОБОСНОВАНИЯ ВНЕДРЕНИЯ СИМ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ БЕЛАРУСИ

Н.В. Воюш, Е.Д. Гвоздовский, И.А. Леонович, Я.В. Жевнеров,
А.А. Широчин
УЗ «БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» г. Минск, РБ

Аннотация: Исследование посвящено обоснованию необходимости внедрения стандарта СИМ для устранения информационных барьеров при управлении Белорусской АЭС. Внедрение СИМ рассматривается как необходимое условие снижения операционных рисков.

Ключевые слова: БелАЭС, СИМ, МЭК 61850, семантика.

Annotation: The study focuses on the need to implement the CIM standard to eliminate information barriers in the management of the Belarusian NPP. The implementation of CIM is considered a critical condition for reducing operational risks.

Keywords: BelNPP, CIM, IEC 61850, semantics.

Ввод в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции стал крупнейшим инфраструктурным проектом в истории энергетики Республики Беларусь. Использование столь мощного источника генерации потребовало масштабной модернизации километров электросетей и внедрения цифровых технологий, призванных повысить надежность и стабильность снабжения.

Не стандартизированный обмен данными между диспетчерским центром, РУП «БелАЭС» и другими объектами порождает семантическую неоднозначность. В таких условиях использование общей информационной модели (СИМ) становится не просто удобно, но и служит условием снижения операционных рисков.

Для понимания необходимости интеграции необходимо рассмотреть особенности работы энергосистемы с высоким содержанием атомной генерации.

Атомные энергоблоки имеют узкий диапазон регулирования: глубокая разгрузка и частые пуски-остановы технологически невозможны или нецелесообразны. В белорусской энергосистеме, где доля АЭС значительна, это ограничивает манёвренность. Переменная часть графика покрывается тепловыми станциями и возобновляемыми

источниками, доля которых, по данным IRENA, составляет около 7,1 % и продолжает расти [3]. Диспетчерский персонал вынужден одновременно обеспечивать базовую нагрузку и регулировать пики ограниченными мощностями. Любое непрогнозируемое отклонение требует мгновенной реакции, поэтому качество и скорость обмена информацией напрямую определяют системную надёжность.

Анализ информационного обмена в ГПО «Белэнерго» выявил три ключевые проблемы.

Первой является семантическая неоднозначность. Модели сети в разных системах различаются в наименованиях аппаратов, нумерации узлов и детализации. При оперативных переключениях это задерживает принятие решений и создаёт риск ошибок. CIM даёт единый «язык» описания объектов, гарантируя совместимость по МЭК 61970 [1].

Далее выделяется потеря наблюдаемости. Данные о сетях 110–330 кВ поступают как разнородные массивы без привязки к единой модели. Возникает «информационная пробка», повышающая вероятность каскадной аварии.

Заключительной выступает разрыв между МЭК 61850 и CIM. Цифровые подстанции на МЭК 61850 без CIM-шины теряют при интеграции с устаревшим ПО данные самодиагностики, состояния приводов и параметров качества электроэнергии, что противоречит требованию целостного представления энергосистемы [2].

Оценка по адаптированной модели зрелости SIM3 [4] показала, что в контуре управления АЭС процессы обмена не формализованы, документация устарела, успех зависит от отдельных специалистов. Такой уровень неприемлем для атомной генерации и даёт количественное обоснование переходу к CIM.

Для устранения описанных выше барьеров предлагается концепция построения единой информационной шины на базе стандарта CIM (рисунок 1).

Центральный элемент такой архитектуры — сервисная шина предприятия (Enterprise Service Bus, ESB), которая организует обмен данными между разнородными приложениями в унифицированном формате, соответствующем модели CIM.

В такой архитектуре каждый программный комплекс взаимодействует с шиной через стандартизированный интерфейс. Данные переводятся в формат CIM и обратно с помощью адаптеров, реализующих семантическое отображение. Это даёт возможность сохранить существующие инвестиции в программное обеспечение — и при этом обеспечить их бесшовную интеграцию.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

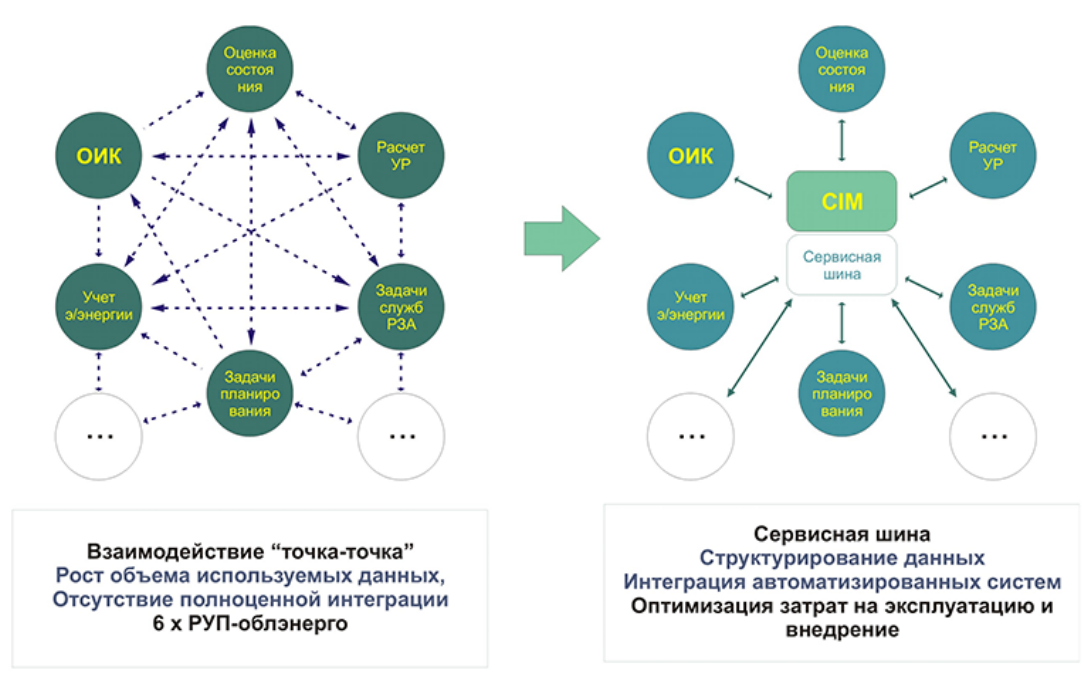


Рисунок 1 - Интеграция систем через сервисную шину.

Внедрение СИМ не требует одновременной замены всех программных комплексов. Переход идет поэтапно.

Практическая значимость предлагаемого подхода — в обосновании необходимости внедрения СИМ через призму безопасности и экономической эффективности работы БелАЭС, а не ИТ-модернизации как таковой. Стандартизация информационных потоков по модели СИМ дает ряд измеримых эффектов.

Во-первых, сокращается время расчета допустимых перетоков мощности при ремонтных схемах АЭС. Сейчас сбор и верификация исходных данных для расчетов занимают от нескольких часов до суток — это вынуждает консервативно занижать допустимые перетоки и, как следствие, недоиспользовать пропускную способность сети. С актуальной СИМ-моделью процесс автоматизируется, а время расчета сокращается до минут.

Во-вторых, все участники процесса — станция, сетевое предприятие и диспетчерский центр — получают единое понимание состояния коммутационного оборудования. Исчезают ситуации, когда диспетчер видит выключатель включенным, а на подстанции он уже выведен в ремонт.

В-третьих, формируется платформа для внедрения централизованной системы противоаварийной автоматики (ЦСПА) нового поколения — без жесткой привязки к конкретному

производителю. Открытость стандарта CIM дает возможность выбирать лучшие в своем классе решения.

В-четвертых, унификация данных закладывает основу для предиктивной аналитики и машинного обучения при прогнозировании режимов работы энергосистемы. Чистые, структурированные и семантически однозначные данные — необходимое условие для построения качественных прогнозных моделей.

Вывод

Проведенный анализ показывает, что для энергосистемы Беларуси внедрение стандарта Common Information Model переходит из разряда перспективных ИТ-инициатив в категорию критически важных мероприятий по обеспечению системной надежности. Переход к CIM является методологической и информационной мерой, которая способна кратно повысить эффективность и безопасность управления энергосистемой без несоразмерных капитальных затрат. Стандарт обеспечивает семантическую совместимость между разнородными системами, создает основу для автоматизации рутинных операций и высвобождает время диспетчерского персонала для решения действительно сложных и нестандартных задач. Применение подхода позволяет определить конкретные направления первоочередных улучшений и сформировать реалистичную дорожную карту внедрения CIM. Первоочередной областью внедрения должна стать информационная инфраструктура, обеспечивающая выдачу мощности Белорусской АЭС.

Перечень ссылок

1. Журнал «ИСУП». Интеграция информационных систем предприятий электроэнергетики на базе CIM-модели. — Текст: электронный — URL: <https://isup.ru/articles/18/535/>.
2. БЕЛЭНЕРГО. Создание единой информационной модели Белорусской энергосистемы. — Текст: электронный — URL: https://www.energo.by/content/infocenter/news/sozdanie-edinoj-informatsionnoy-modeli-belorusskoy-energositemy__12385.
3. Irena. International Renewable Energy Agency. Renewables Readiness Assessment: Belarus. — Текст: электронный — URL: <https://www.irena.org/Publications/2021/Jul/Renewables-Readiness-Assessment-Belarus>.
4. SOCCER — Cybersecurity for Academic Sector. Understanding and Using Maturity Models in SOC's: A Look at Chapter 2 of the Toolbox. — Текст: электронный — URL: <https://soccer.agh.edu.pl/en/detail/understanding-and-using-maturity-models-in-socs-a-look-at-chapter-2-of-the-toolbox>.
5. ScienceDirect. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication. — Текст: электронный — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191501483X>.

УДК 621.384.3:629.735

ТЕРМОГРАФИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ И ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА

Е.Д. Губина, П.Н. Кузнецов, А.В. Губин, Б.А. Андреев
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
г. Севастополь, Россия

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблема энергоэффективности и надежности тепловых сетей и зданий, а также проанализированы недостатки существующих методов диагностирования. Предложена новая технология обнаружения тепловых аномалий подземных сетей и надземных сооружений с использованием БПЛА и термографической съемки.

Ключевые слова: энергоэффективность, тепловые сети, диагностика, БПЛА, термографическая съемка.

Annotation: This article discusses the problem of energy efficiency and reliability of heating networks and buildings, and analyzes the shortcomings of existing diagnostic methods. It proposes a new technology for detecting thermal anomalies in underground networks and above-ground structures using UAVs and thermographic imaging.

Keywords: energy efficiency, heating networks, diagnostics, UAVs, thermographic imaging

Актуальность работы

Энергоэффективность и надежность тепловых сетей и зданий являются одними из критических проблем в области энергетики, особенно для регионов с холодными погодными условиями. Значительная часть трубопроводов эксплуатируется десятилетиями, что приводит к их физическому износу. Последующее нарушение теплоизоляции создает ряд проблем: утечка энергии, повреждение инфраструктуры и снижение эффективности теплоснабжения. По разным оценкам, тепловые потери составляют около 18 – 30 % от общего теплопотребления [1-2].

Существует множество методов диагностики тепловых сетей. Внутритрубная диагностика, несмотря на ряд преимуществ, таких как неразрушающее тестирование, сокращение объема земельных и подготовительных работ, имеет и ряд недостатков. Например, ограниченность диаметром трубопровода, небольшая скорость, наличие труднопроходимых вертикальных участков, высокая стоимость и т.д. Также существуют цифровые методы, которые позволяют проводить автоматизированную диагностику с достаточно

высокой точностью, но тем не менее, этот показатель нивелируется при удалении от измерительного прибора, а также являются очень чувствительны к изменениям температуры окружающей среды.

В данной работе предложена новая технология детектирования тепловых аномалий подземных тепловых сетей и надземных сооружений с использованием БПЛА и термографической съемки. Предлагаемая технология позволит снизить эксплуатационные и ремонтные расходы теплоснабжающих организаций на 10-15% за счет оперативного обнаружения утечек и дефектов.

Автоматизация мониторинга критически важна для повышения энергоэффективности промышленных объектов и оптимизации затрат на техническое обслуживание теплоснабжающей инфраструктуры. Предлагаемая система может стать ключевым инструментом повышения энергоэффективности и промышленной безопасности с потенциалом коммерциализации для других промышленных предприятий.

Используемые методы

Предлагаемая технология решает проблему оперативного обнаружения аварийных участков путем термографической диагностики с борта БПЛА и включает 3 этапа.

Первый этап включает в себя аэротермографическую съемку, которая подразумевает применение мультироторного БПЛА с тепловизионной камерой для получения термографических изображений подземных тепловых сетей и зданий по заранее спланированным маршрутам (см. рис. 1). Аэротермографическая съемка используется полностью автоматизированном режиме с использованием программы Mission Planner.

Во втором этапе, подразумевающий автоматическое распознавание аномалий, используются методы машинного зрения с применением нейросетевых моделей для автоматического анализа термограмм и классификации тепловых аномалий по типу и степени критичности дефектов [3].

Третий этап заключается в геопространственном анализе, в котором привязываются обнаруженные тепловые аномалии к географическим координатам с использованием GNSS-навигации и создание цифровых тепловых карт для мониторинга состояния теплоснабжающей инфраструктуры.

Впервые предложено комплексное решение, объединяющее аэротермографическую съемку с мультироторных БПЛА и нейросетевые алгоритмы автоматического детектирования тепловых аномалий подземных теплосетей и зданий, что обеспечивает

принципиально новый уровень точности и оперативности диагностики по сравнению с существующими методами контроля.

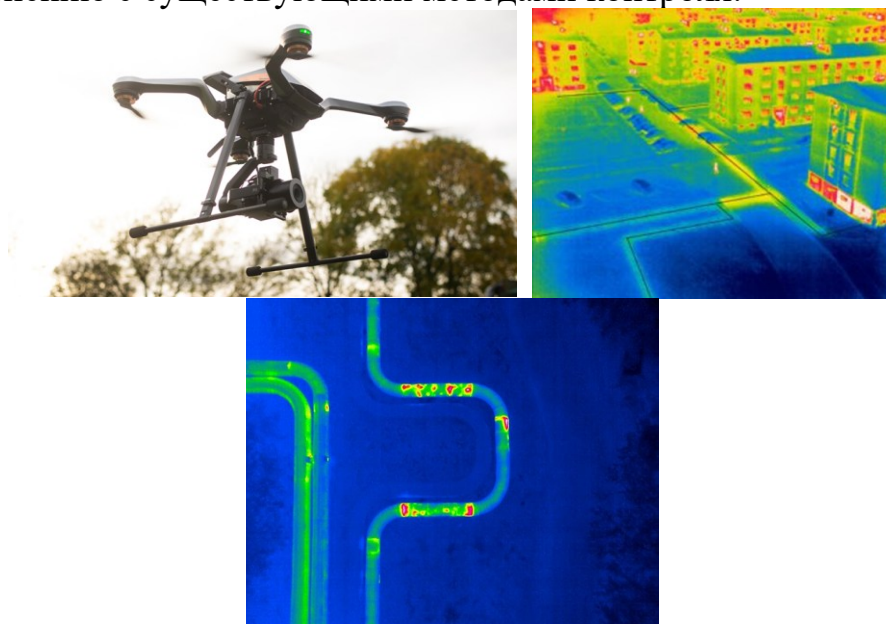


Рисунок 1 – Аэротермографическая съемка с применением БПЛА и примеры термограмм.

Автоматизированное детектирование тепловых аномалий обеспечит экономию операционных затрат на теплоснабжение промышленных объектов и городских агломераций на 5–10 % за счет снижения тепловых потерь, предотвращение аварийных ситуаций и перехода к предиктивному техобслуживанию с полной окупаемостью проекта в течение 2-3 лет [4].

Вывод

Метод аэротермографической диагностики представляет собой эффективное и экономически обоснованное решение для мониторинга тепловых потерь и технического состояния подземных трубопроводных систем, обеспечивая новый уровень в обслуживании и эксплуатации теплосетей.

Перечень ссылок

1. Канев С. Н., Ивашкевич А. А. Расчет тепловых потерь в системах теплоснабжения // Ученые заметки ТОГУ. 2013. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-teplopoter-v-sistemah-teplosnabzheniya> (дата обращения: 05.06.2025).
2. НЕКОММЕРЧЕСКОЕ ПАРТНЕРСТВО ИНЖЕНЕРОВ [Электронный ресурс]. «Тупиковость» теплоснабжения России — URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3697 (дата обращения: 07.06.2025).
3. Kuznetsov P., Kotelnikov D., Voronin D. et al. Intelligent monitoring of the physiological state of agricultural products using UAV // MM Science Journal. – 2024. – Vol. 2024, No. 5. – P. 7772-7781.
3. Смирнов А. Ю., Лосев А. В. Цифровые технологии в теплоснабжении: от мониторинга к предиктивному обслуживанию // Теплоэнергетика России. – 2024. – № 5. – С. 12–20.

УДК 316.42:643.5:004.896

КАК МАШИНЫ ИЗМЕНИЛИ ДОМАШНИЙ БЫТ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ ОТ СТИРАЛЬНЫХ МАШИН ДО РОБОТОВ- ПЫЛЕСОСОВ

С.А. Глазунова, Ю.И. Макаров.

*Петербургский университет путей сообщения императора
Александра I, г. Санкт-Петербург, РФ*

Аннотация: Статья посвящена комплексному анализу трансформации домашнего быта под влиянием технологического прогресса в XX–XXI веках. Авторы рассматривают не только технические характеристики и хронологию внедрения устройств, но и их глубинное воздействие на социальную структуру семьи, распределение домашнего труда, гендерные роли, использование свободного времени и качество жизни. Показано, что механизация и автоматизация быта не являются нейтральными технологическими процессами.

Ключевые слова: бытовая техника, домашний труд, технологическая трансформация, умный дом, роботы-пылесосы, стиральная машина, автоматизация быта.

Annotation: The article presents a comprehensive analysis of domestic life transformation under the influence of technological progress in the 20th–21st centuries. The authors examine not only the technical characteristics and chronology of device adoption, but also their profound impact on family social structure, distribution of domestic labor, gender roles, leisure time use, and quality of life. It is demonstrated that the mechanization and automation of everyday life are not neutral technological processes.

Keywords: household appliances, domestic labor, technological transformation, smart home, robotic vacuum cleaners, washing machine, home automation.

Дом как пространство повседневной жизни человека всегда был полем взаимодействия технологии и культуры. На протяжении большей части истории человечества домашний труд оставался неотъемлемой составляющей существования: приготовление пищи, стирка, уборка, освещение жилища требовали значительных физических усилий и времени. Промышленная революция XIX века запустила процесс, который в XX–XXI столетиях в корне изменил это

положение: последовательная механизация, электрификация, автоматизация и, наконец, роботизация бытового труда превратили дом в насыщенную технологическую среду [1].

Масштаб этой трансформации трудно переоценить. Если в начале XX века домохозяйка в городе средней руки тратила на домашний труд около 52 часов в неделю, то к концу столетия этот показатель сократился до 18–22 часов – преимущественно вследствие внедрения бытовой техники [2]. Сегодня, в эпоху искусственного интеллекта и Интернета вещей, домашняя техника приобретает черты интеллектуальных агентов, способных обучаться, адаптироваться и принимать решения.

Вместе с тем данная тема выходит далеко за рамки технической истории. Внедрение бытовых машин имело глубокие социальные последствия: перераспределение гендерных ролей, трансформацию структуры семейного времени, изменение стандартов чистоты и потребительских ожиданий. Парадоксально, что часть исследователей указывает на феномен «ловушки механизации»: улучшение бытовых технологий нередко влекло не сокращение, а перераспределение домашнего труда вследствие роста поведенческих стандартов [3]. Всё это делает исследуемую тему актуальной как в историческом, так и в социологическом, экономическом и технологическом измерениях.

Актуальность настоящего исследования определяется конвергенцией нескольких взаимосвязанных процессов. Первый из них – стремительное ускорение технологического прогресса в секторе бытовой электроники. Глобальный рынок умных домашних устройств оценивался в 2023 году в 121,4 млрд долларов США и, по прогнозам, достигнет 264,5 млрд долларов к 2029 году при среднегодовом темпе роста 13,8% [4]. Это означает, что технологическая трансформация быта не является завершённым историческим эпизодом – она происходит прямо сейчас и ускоряется.

Второй процесс – социальная реструктуризация домохозяйства. Рост числа одиночных домохозяйств, увеличение занятости женщин, старение населения и распространение удалённой работы формируют новый запрос на домашние технологии. Роботы-пылесосы, умные холодильники, системы голосового управления – это ответы индустрии на конкретные социальные запросы [5].

Третий процесс связан с возрастающим научным интересом к вопросу о том, как технологии меняют не только быт, но и психологию, идентичность и социальные отношения домохозяйства [6]. Критическое осмысление этих процессов представляет самостоятельную научную ценность.

Исследование носит комплексный характер и реализовано с применением мультидисциплинарной методологии, объединяющей подходы исторической социологии, экономики домохозяйства и науковедения.

Сравнительный анализ вторичных социологических данных позволил сопоставить результаты многолетних исследований использования времени (time-use studies) в США, Великобритании, Германии и России за период с 1960-х по 2020-е годы. Прежде всего использовались данные Американского обследования использования времени (American Time Use Survey, ATUS, Bureau of Labor Statistics, 2003–2023) и Российского мониторинга экономического положения и здоровья населения (RLMS-HSE).

Социологическое анкетирование в рамках данного исследования включало опрос 312 респондентов – жителей российских городов с населением свыше 500 тысяч человек – по вопросам владения бытовой техникой, субъективной оценки влияния устройств на качество жизни и готовности к использованию роботизированных систем. Статистическая обработка данных осуществлялась методами дескриптивной статистики, дисперсионного анализа (ANOVA) и кластеризации k-средних.

Исходной точкой технологической трансформации быта принято считать появление бытовых электрических приборов в последнем десятилетии XIX века. Первая электрическая стиральная машина была запатентована американским изобретателем Алва Фишером в 1908 году под маркой Thor – устройство имело деревянный бак, медный цилиндр и электродвигатель, обеспечивающий вращение барабана. Однако распространение стиральных машин оставалось ограниченным вплоть до 1930-х годов: высокая цена и неразвитость бытовой электросети делали их предметом роскоши [7].

Параллельно шло освоение других технологий. Первый бытовой холодильник с электрическим компрессором – Domelre – появился в 1913 году в США. К 1944 году холодильники имелись уже в 85% американских домохозяйств, коренным образом изменив модели продовольственного потребления: ежедневные походы на рынок уступили место еженедельным закупкам в магазинах, а домашнее приготовление пищи перестало быть жёстко привязанным к ритму производства продуктов [8].

В этот же период зарождается и индустрия пылеудаления: первые промышленные пылесосы появились в начале 1900-х годов; модель Hoover O, выпущенная в 1908 году, стала первым коммерчески успешным бытовым пылесосом. Характерно, что реклама бытовой

техники этой эпохи апеллировала прежде всего к образу освобождённой женщины-хозяйки, формируя специфический «дискурс бытового прогресса», который ассоциировал механизацию труда с социальным статусом и современностью [9].

Послевоенное экономическое восстановление и стремительный рост среднего класса в западных странах создали условия для массового распространения бытовой техники. Именно в 1950–1960-е годы холодильник, стиральная машина и телевизор превратились из атрибутов зажиточности в стандартные элементы домашней обстановки. В СССР этот процесс протекал с запозданием примерно в 10–15 лет, но к 1975 году обеспеченность городских семей холодильниками достигла 86%, стиральными машинами – 73% [10].

Принципиальным технологическим сдвигом этого периода стало появление полностью автоматических стиральных машин с программным управлением. Итальянский производитель Candy в 1951 году выпустил первую автоматическую стиральную машину-автомат Candy 50, работавшую по программе без ручного вмешательства оператора. Это означало качественный переход: от механизации труда (когда машина выполняет физическую работу, но требует управления) к его частичной автоматизации (когда машина выполняет последовательность операций автономно) [11].

Микроволновая печь, появившаяся в бытовом сегменте в 1967 году (модель Radarange компании Amana), стала символом трансформации пищевых практик: время приготовления еды сократилось кратно, а вместе с ним снизились требования к кулинарному мастерству. Посудомоечная машина прошла путь от экстравагантной новинки 1950-х до стандарта европейской кухни к концу 1980-х, устранив один из наиболее трудоёмких элементов ежедневного быта.

Внедрение микропроцессоров в бытовую технику в 1980-е годы открыло возможность программируемого управления устройствами. Стиральные машины получили цифровые панели с десятками программ; духовые шкафы освоили таймеры и автоматический режим; видеоманитроны с трудом поддавались программированию – и стали культурным символом разрыва между технологической возможностью и пользовательским опытом [12].

Качественно новый этап начался с появлением концепции «умного дома» (smart home). Стандарт X10, разработанный в 1975 году и получивший широкое распространение в 1990-е, впервые позволил объединить бытовые устройства в единую управляемую сеть. Централизованное управление освещением, отоплением, системами

безопасности и бытовой техникой через единый пульт или компьютер превращало дом из пассивной среды обитания в активную технологическую систему [13].

Принципиально новую страницу в истории домашних технологий открыл выпуск робота-пылесоса Roomba компанией iRobot в 2002 году. Устройство стало первым бытовым роботом, получившим массовое распространение: к 2023 году продано свыше 40 миллионов единиц Roomba по всему миру. С технологической точки зрения ранние модели использовали реактивную навигацию со случайным обходом препятствий; современные модели оснащены картографированием помещения (SLAM-алгоритмы), компьютерным зрением и адаптивным планированием маршрута [14].

Параллельно развивается рынок роботов-мойщиков окон (Ecovacs Winbot, Hobot), роботов-газонокосилок (Husqvarna Automower, выпускается с 1995 года), автоматических систем полива и кормления домашних животных. Голосовые ассистенты – Amazon Alexa (2014), Google Home (2016), российский Яндекс.Станция (2018) – превращаются в центральные интерфейсные узлы умного дома, управляя всей экосистемой устройств через команды на естественном языке [15].

Связь между механизацией быта и гендерными ролями является одной из наиболее дискуссионных тем в социологии технологий. Работа историка Рут Шварц Коуэн «Больше работы для матери» (1983) поставила эту интерпретацию под сомнение: исследователь показала, что механизация домашнего труда нередко сопровождалась повышением стандартов чистоты и качества ведения хозяйства, что нивелировало выигрыш во времени [16].

Данные обследований использования времени подтверждают: несмотря на масштабное внедрение бытовой техники, время, затрачиваемое женщинами на домашний труд, в США сократилось с 52 часов в неделю в 1900 году до 22 часов в 2000-м – то есть более чем вдвое, но не до нуля. При этом мужское участие в домашнем труде возросло с 1,5 до 10 часов в неделю за тот же период [17]. Таким образом, технологизация быта способствовала постепенному, пусть и неполному, перераспределению гендерной нагрузки в домохозяйстве.

Высвобождение времени от домашнего труда создало основу для качественного изменения структуры досуга в XX веке. Проведённый авторами анализ данных RLMS-HSE за 2000–2023 годы показывает, что домохозяйства с более высоким уровнем технологической оснащённости демонстрируют на 23–31% больший объём времени, уделяемого образованию, хобби и социальному взаимодействию.

Субъективная оценка качества жизни также коррелирует с наличием автоматизированной бытовой техники. В рамках проведённого авторами анкетирования 312 респондентов 78,4% отметили, что использование робота-пылесоса «значительно» или «существенно» снизило стресс, связанный с поддержанием чистоты. Среди пользователей умных термостатов и голосовых ассистентов 61,2% сообщили о субъективном ощущении большего контроля над домашней средой.

Технологизация быта порождает и принципиально новые вызовы. Умные устройства собирают обширные массивы персональных данных о ритме жизни, пищевых привычках, маршрутах передвижения по дому и речевой активности.

Не менее острой является проблема «цифрового неравенства в быту»: высокая стоимость роботизированных и IoT-устройств формирует технологический разрыв между домохозяйствами различных доходных групп. По данным Росстата (2023), роботы-пылесосы присутствуют лишь в 14,3% российских домохозяйств; при этом в домохозяйствах с доходом выше среднего их проникновение достигает 38,7%, а в низкодоходных – не превышает 3,1%.

Современная концепция умного дома (smart home) принципиально отличается от простой совокупности автоматизированных устройств. Речь идёт об интегрированной социотехнической экосистеме, в которой устройства обмениваются данными, координируют свою работу и адаптируются к поведенческим паттернам жильцов.

Социальные последствия механизации и роботизации быта носят неоднозначный характер. Безусловным достижением является масштабное сокращение времени, затрачиваемого на рутинный домашний труд: за столетие этот показатель снизился более чем вдвое. Однако технологический прогресс не всегда приводил к ожидаемому освобождению – рост стандартов чистоты, сложность обслуживания новых устройств и цифровое неравенство частично компенсировали выигрыш во времени и создавали новые виды нагрузки.

Современный этап – эпоха умного дома и роботизации – знаменует принципиальный переход от механизации к делегированию: человек передаёт бытовые задачи не просто машинам, но автономным интеллектуальным агентам. Это ставит новые исследовательские вопросы: о границах человеческого контроля над домашней средой, об этике доверия к алгоритмам в частном пространстве, о новых формах зависимости и уязвимости, рождающихся в подключённом доме.

Перспективы дальнейших исследований авторы связывают с лонгитюдным изучением психологических эффектов роботизации

быта, анализом влияния умных домашних технологий на когнитивную нагрузку и ментальное здоровье, а также с разработкой этических рамок для проектирования домашних роботизированных систем.

Перечень ссылок

1. Денисова В.А., Макаров Ю.И. роль машин и механизмов в жизни людей / В сборнике6 Студент: Наука, Профессия, Жизнь. Материалы VIII всероссийской студенческой научной конференции с международным участием: в 4ч. Омск, 2021. С. 607-612. EDN. TNSOZE.
2. Vanek J. Time Spent in Housework // Scientific American. – 1974. – Vol. 231, № 5. – P. 116–121.
3. Cowan R.S. More Work for Mother: The Ironies of Household Technology from the Open Hearth to the Microwave. – New York: Basic Books, 1983. – 257 p.
4. MarketsandMarkets. Smart Home Market Size, Share and Industry Trends Analysis. – Chicago: MarketsandMarkets Research, 2024. – 310 p.
5. Gram-Hanssen K., Darby S.J. 'Home is Where the Smart Is'? Evaluating Smart Home Research and Approaches against the Concept of Home // Energy Research & Social Science. – 2018. – Vol. 37. – P. 94–101.
6. Bijker W.E., Hughes T.P., Pinch T.J. The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology. – Cambridge: MIT Press, 1987. – 405 p.
7. Hardyment C. From Mangle to Microwave: The Mechanization of Household Work. – Cambridge: Polity Press, 1988. – 224 p.
8. Levenstein H. Revolution at the Table: The Transformation of the American Diet. – New York: Oxford University Press, 1988. – 289 p.
9. Nickles S. 'Preserving Women': Refrigerator Design as Social Process in the 1930s // Technology and Culture. – 2002. – Vol. 43, № 4. – P. 693–727.
10. Лебина Н.Б. Советская повседневность: нормы и аномалии от военного коммунизма до большого стиля. – М.: Новое литературное обозрение, 2015. – 488 с.
11. Sparke P. Electrical Appliances. – London: Unwin Hyman, 1987. – 160 p.
12. Forty A. Objects of Desire: Design and Society since 1750. – London: Thames and Hudson, 1986. – 256 p.
13. Harper R. Inside the Smart Home. – London: Springer, 2003. – 280 p.
14. Jones J.L. Robots at the Tipping Point: The Road to iRobot Roomba // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2006. – Vol. 13, № 1. – P. 76–78.
15. Neff G., Nagy P. Talking to Bots: Symbiotic Agency and the Case of Tay // International Journal of Communication. – 2016. – Vol. 10. – P. 4915–4931.
16. Cowan R.S. The Industrial Revolution in the Home: Household Technology and Social Change in the 20th Century // Technology and Culture. – 1976. – Vol. 17, № 1. – P. 1–23.
17. Bianchi S.M., Milkie M.A., Sayer L.C., Robinson J.P. Is Anyone Doing the Housework? Trends in the Gender Division of Household Labor // Social Forces. – 2000. – Vol. 79, № 1. – P. 191–228.

УДК 621.182

ЭКСПРЕСС-СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРИСОСОВ ВОЗДУХА В ТОПОЧНУЮ КАМЕРУ КОТЛА

А.С. Гнитиёва, А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
г. Донецк, ДНР

Аннотация: С целью проведения диагностики работы котельного оборудования, в частности по вопросам определения присосов воздуха в котел разработана методика для оперативного анализа величины присоса воздуха с использованием минимального количества измерительных устройств. Данная методика будет полезна при оперативной подстройке оборудования для максимизации КПД.

Ключевые слова: водогрейный котел, подсос воздуха, коэффициент полезного действия, газоанализатор, расход воздуха

Annotation: For the purpose of diagnosing the operation of boiler equipment, particularly with regard to determining air in-leakage into the boiler, a method has been developed for the operational analysis of the air in-leakage rate using a minimum number of measuring devices. This method will be useful for on-site adjustment of the equipment to maximize efficiency.

Keywords: hot water boiler, air infiltration, energy efficiency, gas analyzer, air flow rate

С каждым годом возрастает потребление электрической и тепловой энергии потребителями, что вызывает увеличение потребления энергетических ресурсов. Для сохранения уровня себестоимости производимой продукции целесообразно контролировать и удерживать высокие значения коэффициента полезного действия котельных агрегатов [1]. Данную проблему можно решать в рамках оперативной диагностики оборудования. Вопросам диагностики теплоэнергетического оборудования, как важнейшим с точки зрения энергоэффективности, уделяется достаточное внимание в литературе, однако остается ряд вопросов, которые не до конца изучены. Так, например, для корректной работы котельного оборудования важным является соблюдение стехиометрического соотношения топливо/воздух в топочной камере котла [2]. Если при горении топлива не соблюдается требуемое расчетное значение – это напрямую повлияет на значение коэффициента полезного действия

котельного агрегата. В то же время следует отметить, что котел не является полностью герметичной установкой, в нем предусмотрен ряд технологических отверстий, а также футеровка котла не всегда представляет из себя монолитную герметичную конструкцию. Все это вызывает неконтролируемый подсос холодного воздуха внутрь топочной камеры. Вследствие данных подсосов, несмотря на расчетные значения расхода топлива и воздуха нарушается их реальное соотношение, что влечет за собой снижение КПД, а также температуры в топочной камере из-за увеличения количества воздуха, идущего на горение. Экспериментальным способом напрямую измерить количество присосов не представляется возможным. Зачастую на производстве не проводится постоянный контроль состава продуктов сгорания. Компонентный состав оценивают в период наладки котла или при составлении режимной карты котла.

Для диагностирования присосов воздуха в топочную камеру котла предлагается использовать экспресс-систему, которая основывается на измерении реальной концентрации кислорода в продуктах сгорания с последующей обработкой, полученной цифровой информации в режиме реального времени.

Аппаратное обеспечение системы составляет портативный газоанализатор Delta 2000, который способен определять концентрацию кислорода в диапазоне от 0 до 21% и работать со средой в диапазоне температур от 0 до 650 °С, обеспечивая абсолютную погрешность измерений менее 0,2%. Результаты измерения посредством интерфейса RS 232 передаются данных в персональный компьютер.

Математическое обеспечение системы представлено методикой расчета параметров процесса горения газообразного топлива известного состава, включающего определение низшей теплоты сгорания; теоретически необходимого количества кислорода; действительного количества кислорода с учетом реального коэффициента расхода воздуха; количества и состава продуктов сгорания.

Для оценки количества присосов воздуха в котельный агрегат необходимо разместить газоанализатор на выходе продуктов сгорания из котла и вести оперативный учет количества кислорода в дымовых газах.

Согласно [3], баланс кислорода в топочной камере котельного агрегата может быть разрешен относительно реальной концентрации кислорода в продуктах сгорания согласно:

$$O_2^R = \frac{V_{\text{пс}}^{\text{расч}} \cdot O_2^{\text{расч}} + \Delta\alpha_{\text{д}} \cdot V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot O_2^{\text{вл}}}{V_{\text{пс}}^{\text{расч}} + \Delta\alpha_{\text{д}} \cdot V_{\text{в}}^{\text{теор}}},$$

где $O_2^R, O_2^{\text{расч}}$ – реальное и расчетное содержание кислорода в продуктах сгорания, выраженное в долях единицы;

$V_{\text{пс}}^{\text{расч}}$ – расчетный удельный выход продуктов сгорания, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$\Delta\alpha_{\text{д}}$ – добавочный коэффициента избытка воздуха, соответствующий его присосам в рабочую камеру котла;

$V_{\text{в}}^{\text{теор}}$ – теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания единицы топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

$O_2^{\text{вл}}$ – концентрация кислорода во влажном воздухе, выраженное в долях единицы.

Разрешение данного выражения относительно добавочного коэффициента избытка воздуха позволяет получить следующее выражение:

$$\Delta\alpha_{\text{д}} = \frac{V_{\text{пс}}^{\text{расч}} \cdot (O_2^R - O_2^{\text{расч}})}{V_{\text{в}}^{\text{теор}} \cdot (O_2^{\text{вл}} - O_2^R)}. \quad (1)$$

Таким образом, получено значение добавочного коэффициента избытка воздуха для условий работы водогрейного котельного агрегата.

Полученное значение далее используется для оценки реальных присосов воздуха в котел и внесении корректировок в работу агрегата с обеспечения необходимого уровня КПД.

По выражению (1) получены значения добавочного коэффициента избытка воздуха от концентрации кислорода, измеряемой газоанализатором (рис. 1). Можно отметить, что зависимость имеет возрастающий нелинейный характер. Из графика видно, что при наличии концентрации кислорода, определяемой газоанализатором на уровне 3%, добавочный коэффициент расхода воздуха должен составлять $\Delta\alpha_{\text{доб}}=0,14$.

Таким образом с целью диагностирования присосов воздуха в топочную камеру котла в работе предложено использовать экспресс-систему, которая базируется на измерении реальной концентрации кислорода в продуктах сгорания с последующей обработкой, полученной цифровой информации в режиме реального времени. Установлено, что характер зависимости значения добавочного

коэффициента избытка воздуха от концентрации кислорода носит не линейный характер.

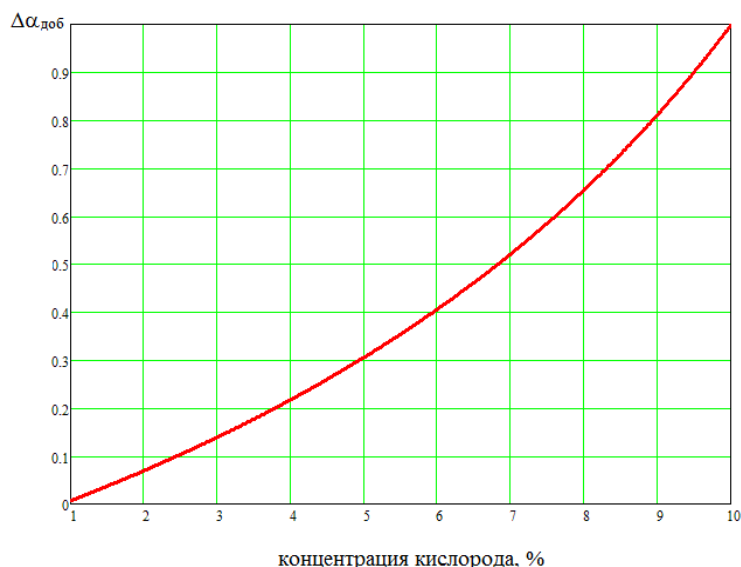


Рисунок 1 – Зависимость добавочного коэффициента избытка воздуха от концентрации кислорода

Данная система может быть полезна для оперативной диагностики котельного агрегата при использовании минимального количества измерительных устройств.

Перечень ссылок

1. Байбаков Р.А. Анализ состояния и разработка мероприятий по повышению эффективности водогрейных котлов // Шаг в науку, 2023. – № 1. – С. 17-20.
2. Журавлев В.А. Энергосбережение в котельных / В.А. Журавлев // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2019. – № 13. – С. 157-158.
3. Система диагностики состояния газовой фазы при работе пламенных печей, позволяющая оценивать степень развития процессов окисления и обезуглероживания металла / А.Б. Бирюков, А.А. Иванова, П.А. Гнитилов// Труды института прикладной математики и механики. – 2020. – Том 34. – С. 3-10.

УДК 621.315.05

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Д.В. Полковниченко, Ю.С. Дорофеева, Д.В. Ковалёв
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: *Анализируются особенности применения электропередачи постоянного тока в электроэнергетике. Показано, что в энергосистемах развитых стран, особенно в странах с большой территорией, технология электропередачи посредством постоянного тока играет важную роль.*

Ключевые слова: *постоянный ток, энергосистема, линия электропередачи, потери, преобразовательная подстанция, напряжение, пропускная способность.*

Annotation: *The application of direct current (DC) power transmission in the electric power industry is analyzed. It is shown that DC power transmission technology plays a significant role in the power systems of developed countries, particularly those with large territories.*

Keywords: *direct current, power system, transmission line, losses, converter substation, voltage, capacity.*

Исторически техника передачи посредством постоянного тока (ПТ, DC) развивалась параллельно с техникой передачи посредством переменного тока (АС). К настоящему времени передача и распределение электроэнергии осуществляется, главным образом, на переменном токе, что обусловлено очевидными преимуществами переменного тока при производстве электроэнергии, трансформации напряжения, коммутировании и ряде других процессов. В то же время известен целый ряд условий, при которых технически и экономически целесообразно применение ПТ – передача на дальние расстояния; кабельные, прежде всего подводные, передачи; объединение электроэнергетических систем (ЭЭС) с разными условиями регулирования частоты и др. [1].

Целью работы является исследование отечественного и зарубежного опыта построения передач постоянного тока, их преимуществ и недостатков, особенностей конструктивного исполнения.

Передачи постоянного тока (ППТ) – это совокупность

электроустановок и аппаратов, которые обеспечивают передачу мощности из системы в систему на дальних расстояниях путём преобразования переменного тока в постоянный, с последующей трансформацией обратно в переменный, в конце линии электропередачи (ЛЭП).

Схема ППТ приведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Схема ППТ

Выпрямительная станция преобразует трёхфазный переменный ток, поступающий из ЭЭС, в ПТ высокого напряжения. Исторически для этих целей использовались ртутные вентили, позже их заменили тиристорные преобразователи, а в современных системах всё чаще применяются полупроводниковые преобразователи на основе IGBT-транзисторов и диодов.

Преобразовательная станция содержит трансформатор, повышающий напряжение переменного тока до требуемого уровня – обычно это 110–500 кВ на переменном токе, который затем выпрямляется. После выпрямления устанавливаются сглаживающие реакторы и фильтры, которые уменьшают пульсации напряжения и предотвращают проникновение высокочастотных помех в окружающие сети. Фильтры также необходимы для защиты от высоких гармоник, которые неизбежно возникают при работе полупроводниковых преобразователей.

На приёмной стороне работает инверторная станция, которая выполняет прямо противоположную функцию: преобразует полученный ПТ высокого напряжения обратно в трёхфазный переменный ток требуемого напряжения. Инвертор также требует фильтров и реакторов для подавления высших гармоник и стабилизации напряжения.

Сама линия передачи может быть выполнена либо как воздушная ЛЭП на опорах, либо как кабельная линия, проложенная в земле или под водой [2].

Практически общепризнано, что применение ППТ определяется их специфическими техническими характеристиками, основные из которых [3, 4]:

– с помощью ППТ осуществляется несинхронная связь между

ЭЭС, что позволяет регулировать частоту в каждой из них; через них могут объединяться ЭЭС, работающие с различной номинальной частотой;

- сбой режима (короткие замыкания (КЗ), сбросы и набросы мощности) в одной из ЭЭС не сказываются, практически, на работе другой;

- направление и величину потока энергии можно безынерционно изменять с помощью быстродействующих систем регулирования; законы регулирования могут выбираться независимо от изменений режима (уровней напряжения, частоты) в связываемых ЭЭС, что позволяет поддерживать частоту, демпфировать колебания и т. п.;

- ППТ обладают существенно большей надежностью по сравнению с одноцепной электропередачей переменного тока одинаковой пропускной способности;

- объединение ЭЭС переменного тока через ППТ не приводит к увеличению токов КЗ;

- нет ограничений передаваемой мощности по условиям нарушения устойчивости при использовании протяженных воздушных ЛЭП;

- возможность передавать большие объёмы электроэнергии на большие расстояния с меньшими потерями, чем у ЛЭП переменного тока (в зависимости от напряжения и способа преобразования тока потери могут быть снижены до 3% на 1000 км)

- меньше, примерно в 1,5 раза, зона отчуждения для воздушных ЛЭП ППТ по сравнению с ЛЭП переменного тока; требуется лишь два провода вместо трех или даже один, если использовать в качестве второго землю;

- меньшее экологическое воздействие на окружающую среду;

- ППТ для перехода через широкие водные преграды с подводным кабелем безальтернативны;

- экономия на изоляции.

Существует пять различных схем исполнения ППТ [5]:

- монополярная;

- вставка постоянного тока (ВПТ);

- биполярная;

- трехполярная;

- мультитерминальная.

В монополярной схеме (рис. 2) одни из полюсов выпрямителя и инвертора связаны между собой линией, а вторые заземлены. При таком исполнении ток одновременно протекает в проводе и земле. В

такой схеме возможна передача обратного тока не только по земле, но и по воде, если ППТ прокладывается в море.

Прохождение обратного тока по воде или земле имеет негативные последствия: коррозия подземных трубопроводов; изменение состава морской воды с выделением хлора; возникновение магнитного поля, которое создаёт помехи в навигационном оборудовании. Негативные факторы устраняются путем установки между заземленными выводами обратного неизолированного металлического проводника, решение по использованию которого принимается на основании технических, экологических и экономических факторов.

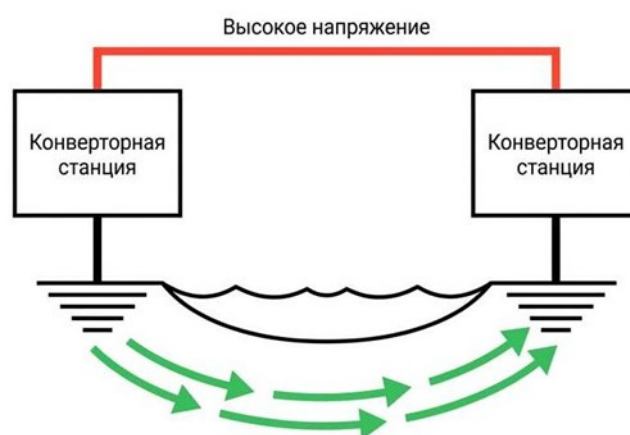


Рисунок 2 – Схема монополярной ППТ

Экономические преимущества монополярной схемы очевидны: для её построения требуется только один провод вместо двух, нужны более простые и дешёвые опоры, не требуется вся та сложная система управления, которая необходима для балансировки токов двух полюсов в биполярной системе. Поэтому монополярная схема применяется для передачи относительно небольших мощностей (100–300 МВт) на средние расстояния (100–200 км).

Так же получили распространение ВПТ, которые применяются в случаях, когда ЭЭС примыкают непосредственно друг к другу. Связь выпрямитель – инвертор выполняют на территории одной ПС без применения ЛЭП ПТ. ВПТ используются для связи смежных ЭЭС переменного тока различной частоты в случаях межгосударственной связи.

Биполярная схема (рис. 3) состоит из пары проводников противоположной полярности с заземлением одного из выводов. При этом величина протекающих токов крайне мала. Если будет повреждена одна из ЛЭП, то данная система продолжит свою работу в режиме монополярной схемы, а передаваемая мощность в этом случае

составит половину от нагрузки в нормальном режиме.

Биполярная схема является наиболее распространённым и рекомендуемым способом организации ППТ для передачи больших мощностей [2].

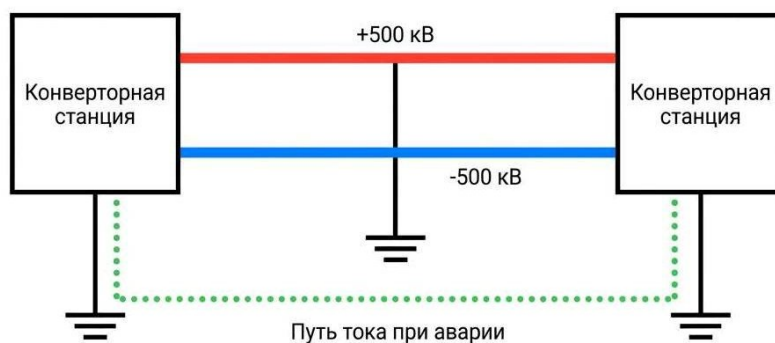


Рисунок 3 – Схема биполярной ППТ

Мультитерминальная схема – это совокупность сложных линий с двумя и более пунктами. Они бывают последовательные или последовательно-параллельные (гибридные) (рис. 4). В мире существуют только две линии этого типа, одна из которых Quebec – New England Transmission напряжением 450 кВ и мощностью до 2000 МВт, в данное время это крупнейшая мультитерминальная ППТ система в мире [2].

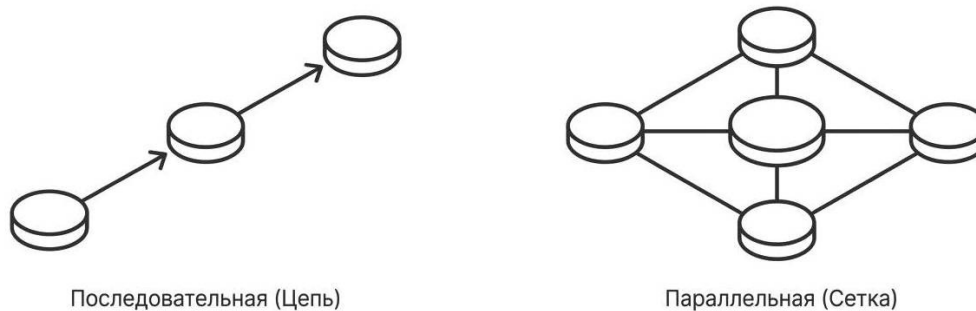


Рисунок 4 – Схема мультитерминальной ППТ

Трехполярная схема (рис. 5) разработана с целью переоборудования существующих воздушных ЛЭП переменного тока на ПТ, при этом используя существующие опоры, провода и трассу линии.

Трёхполярная система использует все три провода, которые обычно имеются на линии переменного тока. Два из этих проводников работают в классическом биполярном режиме (один с положительной, один с отрицательной полярностью), а третий проводник функционирует как дополнительный монополь, но с одной

особенностью: его полярность периодически переключается. Включены реверсные вентили (тиристоры, включённые в обратной полярности), которые позволяют третьему проводнику передавать ток как положительной, так и отрицательной полярности поочередно [2].

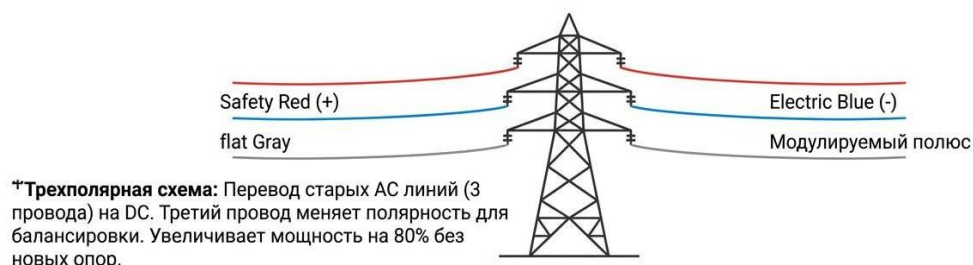


Рисунок 5 – Схема трехполярной ППТ

Расчёты показывают, что при переводе трёхпроводной линии переменного тока на трёхполярную схему ППТ пропускная способность может увеличиться на 80% без каких-либо изменений в конструкции опор, проводов и прочих компонентов линии.

Однако трёхполярная система требует значительно более сложной системы управления и защиты, так как необходимо постоянно мониторить нагрузку на каждый полюс и осуществлять высокочастотные переключения полярности. Кроме того, при такой работе возникают дополнительные пульсации напряжения и тока, которые требуют установки мощных фильтров [2].

Существуют две технологии ППТ: на базе преобразователей тока и преобразователей напряжения.

Многие годы концевые ПС ППТ выполнялись на базе двухмостовых преобразователей тока с фазовым регулированием. И выпрямительная, и инверторная ПС потребляли реактивную мощность, величина которой зависела от глубины регулирования [6]. Это требовало установки источников реактивной мощности на концевых ПС. Регулирование и напряжения, и реактивной мощности в примыкающих сетях затруднялось, а в длительных режимах функция ППТ сводилась только к электропередаче активной мощности. Быстродействие регулирования расширяло функции таких ППТ в аварийных режимах примыкающих сетей.

С конца XX века на ППТ и ВПТ начали широко применяться силовые транзисторы IGBT, тиристоры GTO и IGCT, которые можно не только включать, но и выключать по цепи управления. В этих случаях концевые ПС выполняются на базе преобразователей напряжения, что приводит к существенному изменению функций современных передач и ВПТ [7].

Из презентации министра энергетики Российской Федерации С.Е. Цивилева к выступлению в Совете Федерации указано, что в России в период 2030-2036 гг. в рамках пяти проектов планируется возвести 4370 км ЛЭП ПТ мощностью до 1,5 ГВт, которые предназначены для эффективной передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния.

Актуальность развития технологий ПТ высокого напряжения для отечественной электроэнергетики обусловлена как внутренними объективными условиями ее функционирования, особенностями ЕЭС России как крупнейшей ЭЭС, а также особенностями работы технологически изолированных ЭЭС России, так и внешними условиями, связанными с условиями функционирования сопредельных с Россией ЭЭС зарубежных стран и государственных объединений [8].

Учитывая перечисленные характеристики объектов ПТ, перспективность их применения в ЕЭС России определяется такими объективными предпосылками, как [4, 8]:

- 1) большая протяженность территории страны;
- 2) удаленность объектов генерации и потребителей (в Сибири – наибольшие запасы минерального топлива и гидроресурсов, на западе – сосредоточение населения и промышленности);
- 3) сосредоточение далеко от центров потребления перспективных электростанций и островных (труднодоступных) территорий;
- 4) наличие крупных региональных объединений (ОЭС), связанных между собой сравнительно слабыми связями;
- 5) проблема ограничения токов КЗ в мегаполисах;
- 6) проблема энергоснабжения нефтяных оффшорных платформ и территорий с доступом через водные преграды;
- 7) проблема подключения возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетических установок, к ЕЭС и к локальным ЭЭС.
- 8) значительный износ и старение существующего сетевого оборудования, условия эксплуатации которого не соответствуют современным нормам ПУЭ;
- 9) проблема модернизации и развития ЕЭС с последовательным присоединением к ней объединенной ЭЭС Востока и ряда изолированных ЭЭС;
- 10) большие потери при передаче электроэнергии в распределительных сетях.

Предпосылками к использованию техники ПТ для связи ЕЭС России с ЭЭС других государств являются [8]:

– наличие избыточных энергоресурсов, обеспечивающих возможность создания значительного экспортного потенциала в электроэнергетической отрасли;

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

– значительные сложности объединения на переменном токе с крупными зарубежными ЭЭС из-за различий в системах регулирования частоты и мощности, других систем автоматики, различий в системах оперативного управления, нормативной базы, рабочего языка и т.д.;

– большие расстояния, затрудняющие создание синхронных связей с ЭЭС стран, расположенных к югу от границ с Россией (энергообъединение Среднеазиатских республик бывшего СССР, ЭЭС Китая, Кореи, Ирана, и др.);

– наличие водных преград (Япония);

– необходимость считаться с возможностью объединения пока небольших ЭЭС азиатского региона в крупные центры энергопотребления, что приведет к переходу связей между ними и ЕЭС России в категорию «слабых» и практически неработоспособных при использовании переменного тока, особенно в случае образования кольцевых структур;

– разные стандарты частоты (Северная Америка, Япония);

– сложности экономических взаиморасчетов при вовлечении в обменные перетоки мощности большого количества ЭЭС других государств (связи с энергообъединениями Западной Европы через сети бывших республик СССР и Восточноевропейских государств, связи со странами Средней и Центральной Азии через сети ЭЭС Закавказских и Среднеазиатских республик бывшего СССР и т.д.).

К недостаткам ППТ можно отнести следующие:

1) дороговизна, т.к. преобразовательные подстанции (ПС), необходимые для присоединения к электрическим сетям переменного тока, стоят дороже, чем ПС переменного тока, что связано с дополнительным преобразовательным оборудованием и сложными системами автоматики и регулирования;

2) сложность проектирования и эксплуатации, т.к. управление перетоками мощности в многоконцевых ППТ требует непрерывной коммуникации между оборудованием всех концов;

3) преобразовательные ПС генерируют высокие гармоники тока и напряжения, при этом сам процесс преобразования сопровождается потреблением реактивной мощности. Поэтому возникает необходимость установки дорогих фильтро-компенсирующих устройств, а также устройств компенсации реактивной мощности;

4) ограничение пропускной способности, т.к. количество ПС в составе современных ППТ не может превышать 6–8 ПС. При этом не допускается большое различие в величине их пропускной способности;

5) КЗ на стороне выхода инвертора может привести к полной неработоспособности всей ППТ;

6) при близких КЗ в системах переменного тока, есть и воздействие на ППТ;

7) высокочастотная составляющая в системах ППТ может вызвать радиопомехи в линиях связи, расположенных вблизи.

8) заземление ЛЭП ПТ заключается в установке сложного комплекса оборудования, т.к. необходимо создать надёжный и постоянный контакт с землёй, чтобы обеспечить правильную работу и исключить возможность возникновения опасного «шагового напряжения»;

9) протекание ПТ через землю в однополюсной системе может вызвать электрическую коррозию подземных металлических конструкций, в основном трубопроводов.

На рис. 6 приведены сравнительные стоимости ППТ и передач переменного тока. Из рисунка видно, что стоимость строительства преобразовательной ПС на постоянном токе значительно выше той, что на переменном токе (пунктирные линии). Сплошными показаны стоимости строительства линий переменного и постоянного тока. Удешевление последнего происходит из-за меньшего количества проводов, изоляторов, линейной арматуры, более легких опор и отсутствия компенсаторов реактивной мощности, которые, в свою очередь, дают скачок в стоимости линии переменного тока [9].

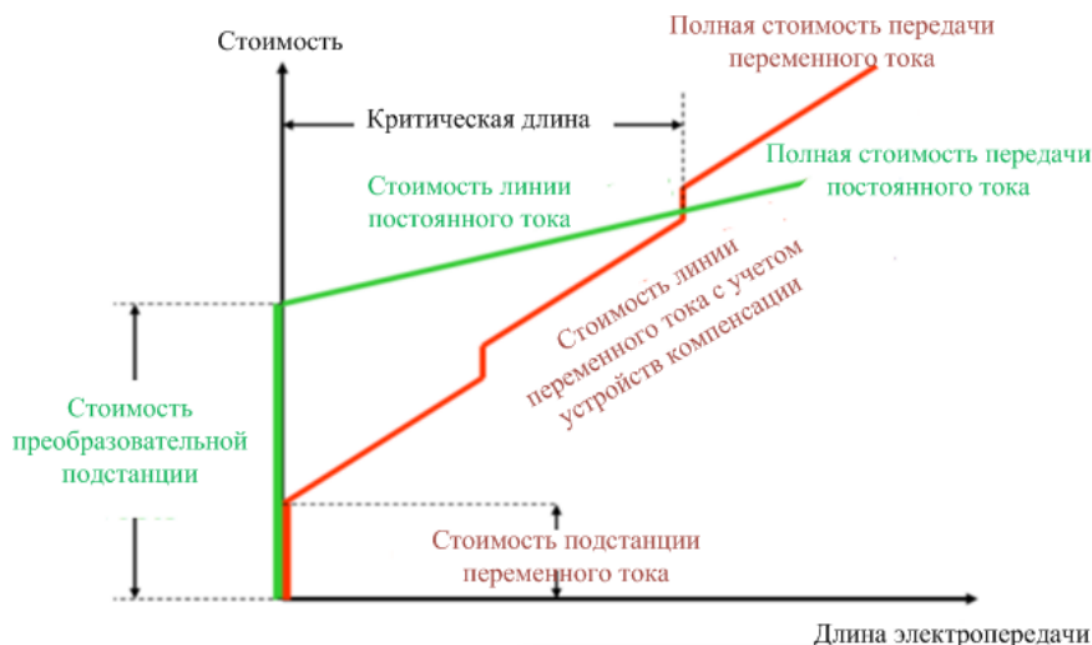


Рисунок 6 – Сравнительные стоимости передач переменного и постоянного тока

Общая цена современных воздушных ЛЭП ПТ и преобразовательных ПС приближается к стоимости линий на

переменном токе и ПС при передаче электроэнергии на расстояния от 0,5 до 1,2 тыс. км. А при передаче на расстояния выше 2 тыс. км цена строительства ЛЭП ПТ значительно ниже стоимости строительства линии переменного тока.

Передача электроэнергии ПТ экономически оправдывает себя только при передаче больших мощностей на большие расстояния. Так, мощность в 750 МВт выгоднее передавать постоянным током, начиная с расстояний в 650 км, а мощность в 1500 МВт – начиная с 500 км [9].

Рассмотрим некоторые этапы развития ППТ:

1882 г. – запущена первая ЛЭП ПТ для передачи электроэнергии на большое расстояние на линии Мисбах-Мюнхен (Германия). Передаваемая мощность составляла всего 2,5 кВт, на линии не было преобразователей постоянного тока в переменный.

1889 г. – построена первая ЛЭП, использующая метод преобразования токов генератор-двигатель, разработанный швейцарским инженером Рене Тюри. Линия работала на ПТ, передавала мощность 630 кВт на постоянном напряжении 14 кВ на расстояние 120 км.

1930-е гг. – шведская компания ASEA разработала первые практически применимые системы высоковольтных ППТ, основанные на ртутных выпрямителях – предшественниках современных тириستоров и IGBT-транзисторов.

1950 г. – в СССР введена в действие первая опытно-промышленная ППТ Кашира – Москва номинальной мощностью 30 МВт. Посредством высоковольтного кабеля и воздушной ЛЭП электростанцию в Кашире соединили с ПС в Москве. ППТ была построена с применением ртутных выпрямителей, разработанных в Швейцарии.

1954 г. – положено начало современным высоковольтным ЛЭП ПТ, первая такая линия на 10 МВт создана компанией ASEA между материковой Швецией и островом Готланд.

1962-1965 гг. – поэтапный ввод в эксплуатацию ППТ Волгоград – Донбасс с постепенным увеличением напряжения и мощности преобразовательных ПС. ППТ имела пропускную способность 720 МВт с годовым объемом передаваемой энергии 4 млрд. кВт·ч, напряжение между полюсами 800 кВ (± 400 кВ между проводами и «землей»). Длина линии ППТ – 473 км [4].

«Вентильные мосты Волжской подстанции через трансформаторы соединены с восемью гидрогенераторами и шинами 220 кВ. Последние имеют связь с системой Волгоградэнерго и через автотрансформаторы с шинами 500 кВ, от которых отходят ЛЭП 500 кВ в Центр страны; на

шины 500 кВ работают другие генераторы ГЭС. Таким образом, передача постоянного тока с одной стороны соединена с системой Донбассэнерго, а с другой – с Волжской ГЭС имени XXII съезда КПСС и через ее шины 220 кВ и 500 кВ с системами Волгоградэнерго и Центра страны» [6].

Схема ППТ Волгоград – Донбасс приведена на рис. 7.

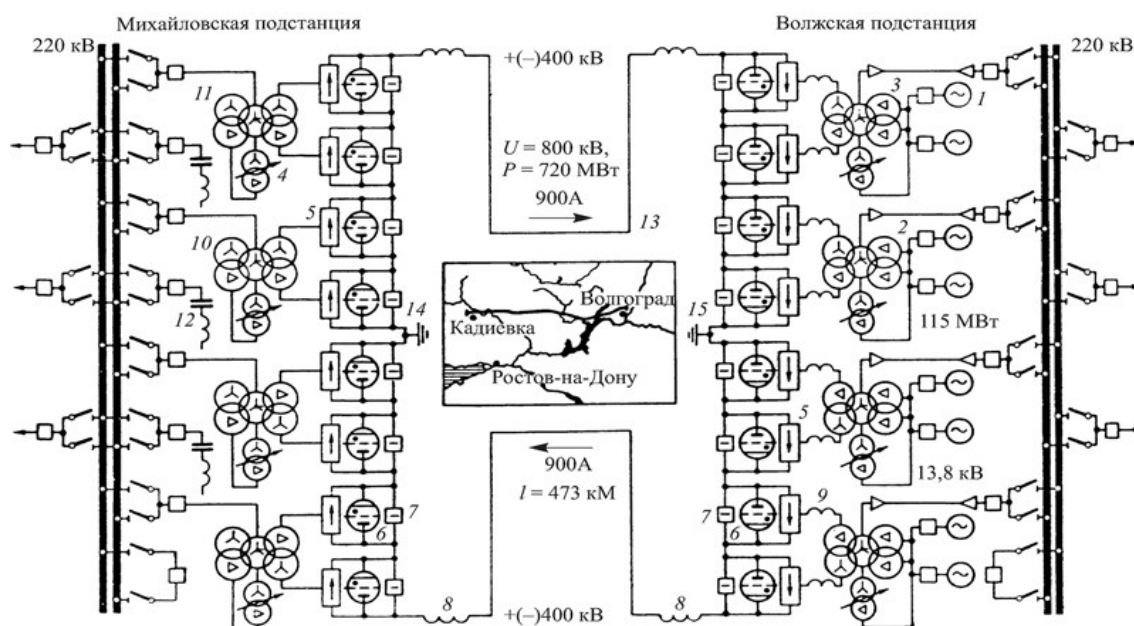


Рисунок 7 – Схема ППТ Волгоград – Донбасс

Воздушная ЛЭП ППТ Волгоград – Донбасс была выполнена из сталеалюминиевого провода марки АСО-600. Металлические опоры ЛЭП достигали в высоту 22,5 м. Потери мощности в линии длиной почти 500 км составили 3,2%. Передача могла работать в реверсивном режиме. В этот раз применили ртутные выпрямители полностью советского производства. В общей сложности соорудили по восемь каскадно включенных мостов на ртутных вентилях, которые на ПС в Донбассе работали до отключения передачи, т. е. свыше 50 лет.

В дальнейшем ртутные выпрямители частично заменили на тиристорные, а в конце 1970-х гг. была намечена полноценная реконструкция ППТ Волгоград – Донбасс с обновлением выработавшего свой ресурс оборудования. Однако реализовать эту задумку тогда не удалось из-за нехватки средств.

В начале следующего десятилетия по ряду причин располагаемая мощность ППТ ограничивается значением 180 МВт. В работу стало возможным включать только одну полуцепь ППТ при напряжении 200 кВ. В середине 1980-х гг. все-таки удалось провести частичную модернизацию, что позволило эксплуатировать ППТ Волгоград –

Донбасс с параметрами ± 200 кВ, 360 МВт.

К сожалению, масштабная реконструкция ПТТ с целью повышения пропускной способности и надежности ЛЭП после распада СССР так и не была осуществлена.

1980 г. – вводом трех преобразовательных блоков по 355 МВт в (четвертый блок был добавлен в 2000 г.) была осуществлена ВПТ на ЛЭП 330/400 кВ Россия – Финляндия мощностью 1400 МВт. Она проектировалась как неререверсивная, но в начале XXI века на одном из блоков показана возможность ее работы в двухстороннем режиме [4].

Выборгский преобразовательный комплекс – единственная в России ВПТ. Была построена для экспорта электроэнергии из СССР в Финляндию. ВПТ обеспечивает бесперебойную связь двух независимых ЭЭС России и Финляндии с различным уровнем напряжения.

В настоящее время Китай стал бесспорным мировым лидером в технологиях и масштабах внедрения сверхвысоковольтной передачи, построив более 30 линий переменного и постоянного тока общей протяженностью свыше 35 тыс. км с суммарной передаваемой мощностью более 100 ГВт.

Линия Чанцзи-Гуцюань (рис. 8) представляет собой вершину развития технологий ПТТ с рекордным напряжением ± 1100 кВ, введенную в эксплуатацию в январе 2019 г. Протяженность 3324 км – крупнейшая в мире для ПТТ — связывает ветровые и солнечные парки Восточного Синьцзяна с провинцией Аньхой в центральном Китае. Проектная мощность 12 ГВт обеспечивает электроснабжение около 50 млн. человек.

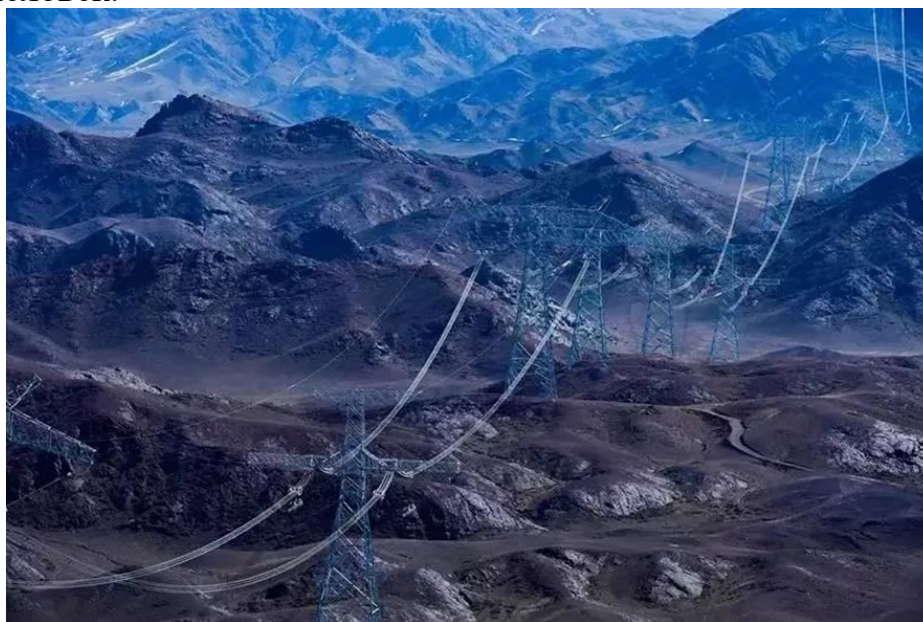


Рисунок 8 – ПТТ Чанцзи-Гуцюань (Китай)

Технические инновации включают впервые примененные тиристорные вентили класса ± 1100 кВ с более чем 600 последовательно соединенными тиристорными модулями в каждом вентиле. Башни вентиля достигают высоты 25-30 метров, требуя специальных конструкций зданий преобразовательных станций. Изоляционные системы используют композитные полимерные изоляторы длиной до 15 метров для обеспечения необходимой электрической прочности.

ЛЭП использует расщепленные проводники из 8 проводов диаметром 43 мм каждый на полюс, обеспечивая суммарное сечение свыше 2000 мм^2 алюминия. Высота подвеса проводов достигает 40-50 м в равнинных участках и до 70-80 м при пересечении рек. Опоры высотой до 100 м представляют собой сложнейшие стальные конструкции массой до 300 т.

Потери при передаче 12 ГВт на 3324 км составляют около 7,5%, что соответствует удельным потерям 2,26% на 1000 км — существенное улучшение по сравнению с линиями ± 800 кВ благодаря более высокому напряжению. Годовая передача энергии превышает 66 млрд. кВт·ч, эквивалентная замещению около 20 млн. т угля и снижению выбросов CO_2 на 53 млн. т ежегодно.

Линия Белу-Монти-Рио-де-Жанейро протяженностью 2543 км стала крупнейшей в мире ППТ в западном полушарии. Введенная в эксплуатацию в апреле 2019 г. линия ± 800 кВ мощностью 4000 МВт передает электроэнергию от гидроэлектростанции Белу-Монти мощностью 11233 МВт в штате Пара к мегаполису Рио-де-Жанейро. Линия проходит через 81 город в пяти бразильских штатах, пересекая 13 крупных рек включая Амазонку.

Эксплуатационные результаты подтверждают эффективность решения. Линия обеспечивает электроснабжение около 10 млн. человек в Рио-де-Жанейро и окрестностях, снижая зависимость от тепловых электростанций на природном газе. Потери при передаче составляют около 6,5% на полной протяженности, что соответствует 2,56% на 1000 км. Коэффициент готовности превышает 98% при круглогодичной работе в тропическом климате [10].

Western HVDC Link — первая подводная ППТ высокого напряжения для передачи энергии от ветроэлектрических станций через водные преграды (Шотландия – Англия, Уэльс). ППТ, которая полностью заработала в 2019 г., имеет пропускную способность 2250 МВт, напряжение ПТ – 600 кВ. Состоит из 422 км кабеля, из которых 385 км находится под водой [11].

Выводы

Проведенные в статье исследования подтверждают потенциал использования передач постоянного тока для улучшения эффективности и устойчивости современных энергосистем, однако подчеркивают необходимость решения ряда технических, экономических и социальных проблем для достижения полного потенциала данной технологии.

Перечень ссылок

1. Герасимов, А. С. Использование передачи постоянного тока в электроэнергетике / А. С. Герасимов, Л. А. Кошечев, А. А. Лисицын // Энергия единой сети. – 2017. – № 6(35). – С. 42–48.
2. Как устроены и работают высоковольтные линии электропередачи постоянного тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/main/vl/3300-kak-ustroeny-i-rabotayut-hvdc.html>
3. Исмаилова, Г. Исследование параметров и режимов работы линии электропередачи постоянного тока / Г. Исмаилова, Э. Рзаев // Вестник науки. – 2025. – №6 (87), том 2. – С. 1918-1924.
4. Балыбердин, Л. Л. Развитие техники электропередачи постоянным током высокого напряжения в отечественной энергетике. Вклад НИИПТ в теорию и практику создания ППТ и ВПТ (краткий исторический очерк) / Л. Л. Балыбердин // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2013. – № 2(69). – С. 130-148.
5. Беляев, П. В. Передача постоянного тока / П. В. Беляев // Молодежь XXI века: шаг в будущее : Материалы XXV региональной научно-практической конференции: в 2 томах, Благовещенск, 22 мая 2024 года. – Благовещенск: Амурская государственная медицинская академия, 2024. – С. 534–535.
6. Поссе, А.В. Схемы и режимы электропередачи постоянного тока / А.В. Поссе. – Л.: Энергия, 1973. – 302 с.
7. Гольдштейн, М. Е. Регулирование напряжения и потоков реактивной мощности в сети, содержащей электропередачу постоянного тока на базе преобразователей напряжения / М. Е. Гольдштейн, Н. В. Корбуков // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2016. – № 2.
8. Повышение эффективности передачи электроэнергии / Ю. В. Коновалов, А. А. Терехова, Г. А. Шитенков [и др.] // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2023. – № 17. – С. 39–44.
9. Абдулина, Е. Р. Электрические сети постоянного тока / Е. Р. Абдулина // Молодежный вестник ИргТУ. – 2016. – № 2. – С. 1.
10. Сверхвысоковольтные линии электропередачи: новые технологии передачи энергии при напряжениях свыше 800 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/sety/3242-sverhvysokovoltnye-linii-elektroperedachi-novye-tehnologii.html>
11. Лозина, Н. Развитие технологий передачи электроэнергии постоянным током – путь повышения энергоэффективности, надёжности и управляемости энергосистем / Н. Лозина, О. Суслова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b4_rus/events/other/%D0%9B%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B0_2018.pdf

УДК 621.311

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Булгаков, Б.А. Дворецкий
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы статической устойчивости для простейшей электрической системы. Выполнен анализ устойчивости режима при изменении угла нагрузки, мощности генератора и параметров сети. Определены условия потери устойчивости типа самораскачивание и самовозбуждение.

Ключевые слова: статическая устойчивость, синхронный генератор, электрическая система, самораскачивание, самовозбуждение

Annotation: The paper considers the issues of static stability for the simplest electrical system. An analysis of the stability of the mode was performed when changing the load angle, generator power, and network parameters. Conditions for loss of stability such as self-oscillation and self-excitation are determined.

Keywords: static stability, synchronous generator, electric power system, self-oscillation, self-excitation

Постановка задачи. Статическая устойчивость электрической системы характеризует способность системы сохранять установившийся режим при малых возмущениях. Обеспечение статической устойчивости является одним из основных требований, предъявляемым к электрическим системам [1, 2]. Для простейшей системы «генератор – линия – шины бесконечной мощности» устойчивость определяется балансом между электромагнитным и механическим моментами генератора. Нарушение этого баланса приводит к возникновению электромеханических колебаний ротора и потере синхронизма.

Рассматривается простейшая электрическая система, подключенная к шинам бесконечной мощности через эквивалентную реактивность линии электропередачи. Схема простейшей системы показана на рис.1. При анализе устойчивости следует учитывать переходные процессы в роторе генератора.

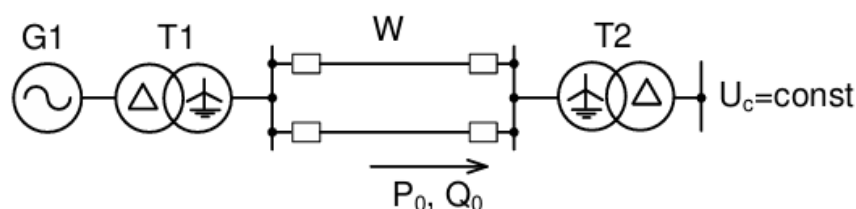


Рисунок 1 – Схема простейшей электрической системы

Математическая модель. Для простейшей электрической системы без учета влияния переходного процесса в роторе генератора и АРВ, переходный процесс описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка [2]

$$T_j p^2 \delta + P_d p \delta = P_t - P_{эл} \quad (1)$$

где T_j – постоянная инерции генератора, P_d – мощность демпфирующей обмотки, P_t – мощность турбины, $P_{эл}$ – электромагнитная мощность генератора. Для анализа малых отклонений используется линеаризованная система уравнений. Оценка состояния системы выполняется по корням характеристического уравнения

$$T_j p^2 + P_d p + c_1 = 0, \quad (2)$$

где c_1 – синхронизирующая мощность.

Для простейшей системы учет переходных процессов в роторе генератора описывается характеристическим уравнением третьего порядка [2, 3]

$$T_d' T_j p^3 + (T_d' P_d + T_j) p^2 + (T_d' c_2 + P_d) p + c_1 = 0, \quad (3)$$

где c_1, c_2 – частные производные от мощностей, выраженных через E_q и E_q' по углу соответственно. Оценка состояния системы выполняется по корням характеристического уравнения. Устойчивое состояние обеспечивается при отрицательных мнимых частях всех корней.

Для исследования статической устойчивости простейшей электрической системы с учетом переходных процессов в роторе генератора разработан файл в программе *Mathcad*, на основе которого выполнены расчеты и проведен анализ статической устойчивости при различных значениях параметров элементов системы. Фрагмент

расчета показан на рис.2, где математическая функция $F(t)$ отображает решение характеристического уравнения.

$P_0 = 0$	$C_1(\delta_0) = 0.711$ $C_2(\delta_0) = 1.401$	$\delta_0 \cdot \frac{180}{\pi} = 30$	Корни характеристического уравнения $P_1(\delta_0) = 0.377i$ $P_2(\delta_0) = -0.377i$
Коэффициент демпфирования $P_d = 0$			

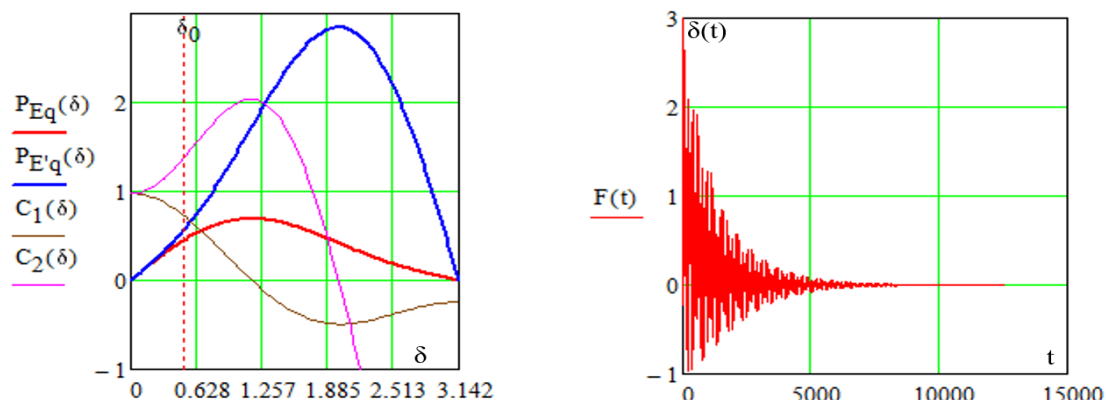


Рисунок 2 – Результаты моделирования статически устойчивой системы с учётом переходных процессов

Моделирование самораскачивания. Самораскачивание представляет собой процесс возникновения и нарастания электромеханических колебаний ротора генератора [4]. Самораскачивание генератора может возникать в двух случаях: при отрицательном значении P_d , что вызвано некорректным регулированием, и при значительном активном сопротивлении в цепи статора ($r_\Sigma / x_\Sigma > 0,05$), что равносильно отрицательному значению P_d .

Значительное активное сопротивление в цепи статора r_Σ обуславливает величину критического угла $\delta_{кр}$. При небольших нагрузках и относительно весомых значений активного сопротивления при углах вылета ротора δ_0 от 0 до 20-30, можно получить процесс самораскачивания. При данном процессе любое небольшое возмущение в системе приводит к возникновению синусоидальных колебаний с нарастающей амплитудой (рис.3), из-за чего генератора переходит в асинхронный режим.

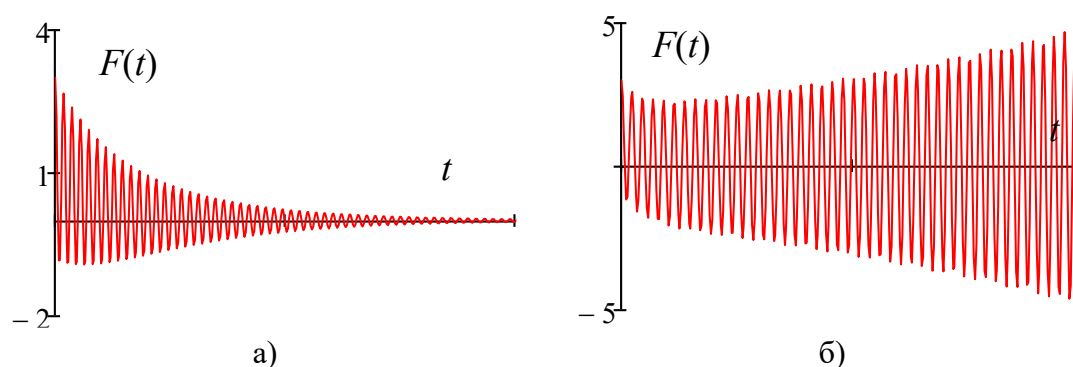


Рисунок 3 – Моделирование самораскачивания $r_{\Sigma} = 0,2$ $\delta_{кр} = 18,5^\circ$: $\delta_0 = 40^\circ > \delta_{кр}$ система устойчива (а), $\delta_0 = 12^\circ < \delta_{кр}$ система неустойчива (б)

Моделирование самовозбуждения. Самовозбуждение – это процесс самопроизвольного нарастания токов и напряжений генератора вследствие обмена реактивной энергией между генератором и емкостными элементами сети.

Самовозбуждение генератора возникает при наличии значительного емкостного сопротивления в цепи статора x_C , что отвечает теоретическому условию из [1] $T'_d < 0$. Такой случай имеет место при подключении генератора к ненагруженной линии электропередач. Анализ характеристического уравнения, которое учитывает переходные процессы в роторе, показывает, что для возникновения процесса самовозбуждения необходимо выполнения условия

$$x'_i \leq \leq \quad (4)$$

где $x'_i = +$ $x_{d\Sigma} = +$ $x_{вн} = +$ $+$ – внешнее сопротивление в схеме на рис.1.

На рис.4 показаны результаты моделирования для двух случаев величины емкостного сопротивления в цепи статора. В первом случае самовозбуждение отсутствует (рис.4, а), во втором случае условие (4) выполняется, и устойчивость нарушена (рис.4, б).

Самовозбуждение может иметь место при отсутствии изменения угла ротора δ во времени, то есть при синхронной скорости вращения генератора. Характерным признаком самовозбуждения является экспоненциальное нарастание тока статора до больших значений, которое практически ограничивается насыщением магнитных цепей генераторов и трансформаторов.

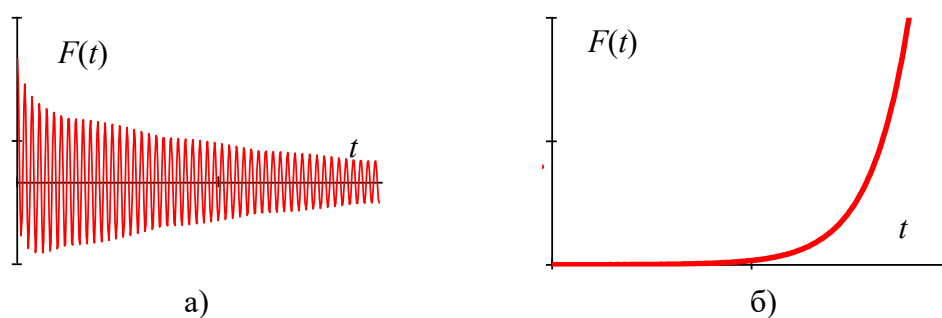


Рисунок 4 – Моделирование самовозбуждения системы с параметрами $x_{d\Sigma} = 1,369$, $x'_i =$: $x_C = -0,3$ система устойчива (а), $x_C = -0,7$ система неустойчива (б)

Выводы

1. Рассмотрена простейшая электрическая система с синхронным генератором, и выполнен анализ статической устойчивости режима.
2. Граница статической устойчивости неявнополюсного генератора без регулирования возбуждения и без учёта переходного процесса в роторе достигается при угле нагрузки $\delta = 90^\circ$.
3. Для анализа статической устойчивости в простейшей системе при учете переходных процессов в роторе генератора процесс описывается характеристическим уравнением третьего порядка.
4. Наличие значительного активного сопротивления в цепи статора обуславливает возможное нарушение устойчивости типа самораскачивание при малых углах вылета ротора генератора.

Перечень ссылок

1. ГОСТ Р 58058-2018. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Устойчивость энергосистем. Нормы и требования. – Введ. 2019-03-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 15 с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – Москва: Высшая школа, 1985. – 536 с.
3. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. – Москва: Энергия, 1979. – 456 с.
4. Андреев В.А. Режимы и устойчивость электрических систем. – Москва: Энергоатомиздат, 1990. – 296 с.

УДК 621.43-4:629.1.056

РАЗРАБОТКА АВТОМОБИЛЬНОГО СКАНЕРА ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЯ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ АРДУИНО

С.С. Данилов, Д.Н. Мирошник
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Разработан автомобильный сканер для считывания параметров автомобиля на базе микроконтроллера Atmega 328p, CAN-UART преобразователя ELM327 и светодиодной матрицы MAX7219. Сканер позволяет в реальном времени производить мониторинг параметров автомобиля по шине CAN и выводит значения параметров на дисплей.

Ключевые слова: CAN-шина, микропроцессорный контроллер, Ардуино, парсинг, CAN-UART преобразователь, ELM327, светодиодная матрица, OBD-II, идентификатор параметра (PID), монитор порта, 3Д-печать.

Annotation: An automotive scanner for reading vehicle parameters has been developed based on an Atmega 328p microcontroller, an ELM327 CAN-UART converter, and a MAX7219 LED matrix. The scanner enables real-time monitoring of vehicle parameters via the CAN bus and displays the parameter values on a display.

Keywords: CAN bus, microprocessor controller, Arduino, parsing, CAN-UART converter, ELM327, LED matrix, OBD-II, parameter identifier (PID), port monitor, 3D printing.

Постановка задачи. Современный автомобиль — это распределённая электронная система, где десятки электронных блоков управления (ЭБУ) и датчиков обмениваются данными по общей шине CAN. CAN-шина выполняет роль «нервной системы» автомобиля, передавая критически важные параметры: обороты двигателя, скорость, температуры, состояния систем безопасности и диагностические коды.

Актуальность темы определяется несколькими факторами. Во-первых, рост сложности бортовой электроники и распространение сетевых протоколов в автомобилях увеличивают потребность в доступных средствах мониторинга и анализа. Во-вторых, профессиональные диагностические сканеры и анализаторы CAN остаются дорогими и часто избыточными для задач обучения,

хобби-проектов и оперативной проверки — поэтому доступное устройство на базе Arduino закрывает нишу дешёвой, наглядной и гибкой платформы для мониторинга в реальном времени.

Анализ существующих готовых устройств для мониторинга CAN. Определение необходимого функционала устройства. Выбор аппаратных и программных компонентов, необходимых для реализации устройства для мониторинга CAN. Сборка и тестирование устройства.

Устройства для мониторинга CAN могут представлять собой как простые приборы, выводящие только основные параметры (скорость автомобиля, обороты двигателя) без возможности изменения набора выводимых параметров, так и более сложные бортовые компьютеры с расширенным набором параметров для мониторинга и возможностью изменения параметров для вывода из набора, полноценные приборные панели и сложные системы, позволяющие подключать дополнительные приборы, дисплеи и датчики.

Однако все эти готовые решения обычно имеют общий недостаток — невозможность изменения и добавления собственных идентификаторов параметров (PID) для их мониторинга. **Целью работы** является разработка универсального устройства для мониторинга любых идентификаторов параметров, доступных через CAN-шину.

Можно выделить набор ключевых функций устройства, которые обеспечат его практическую ценность и удобство использования: Приём и отправка CAN-сообщений: поддержка стандартных идентификаторов, работа на скорости 500 кбит/с, индикация в реальном времени: вывод значений параметров на большой дисплей с минимальной задержкой, возможность изменения набора параметров для мониторинга из списка стандартных идентификаторов параметров (PID), возможность установки устройства в удобное место в автомобиле.

В качестве CAN-UART преобразователя был выбран двухплатный ELM327 Bluetooth, на корпусе которого уже есть OBD-II разъём для подключения к автомобилю. В преобразователе был заменён модуль Bluetooth на плату Arduino. Подключение показано на рисунке 1.

Для вывода данных используется светодиодная 8x32 матрица MAX7219. Питание Arduino +5 В подключено от понижающего преобразователя через тумблер для защиты от подключения Arduino к компьютеру. Предусмотрена также кнопка для переключения режимов работы устройства.

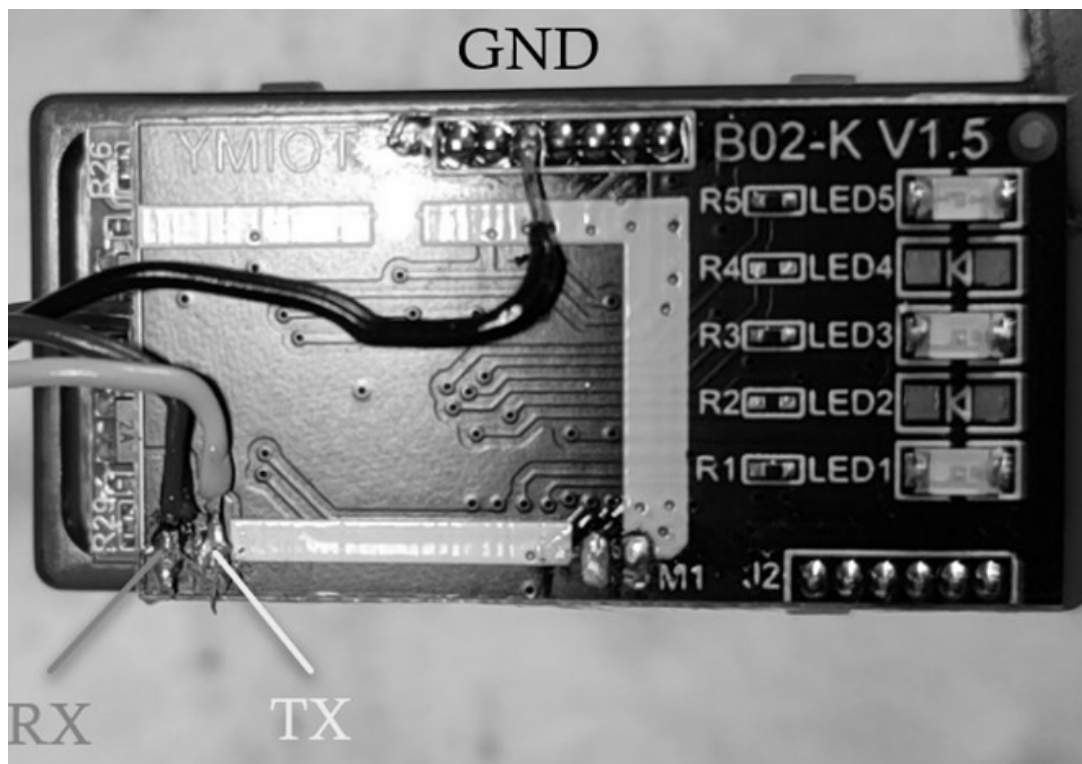


Рисунок 1 – Подключение к ELM327

Процесс сборки устройства показан на рисунке 2.

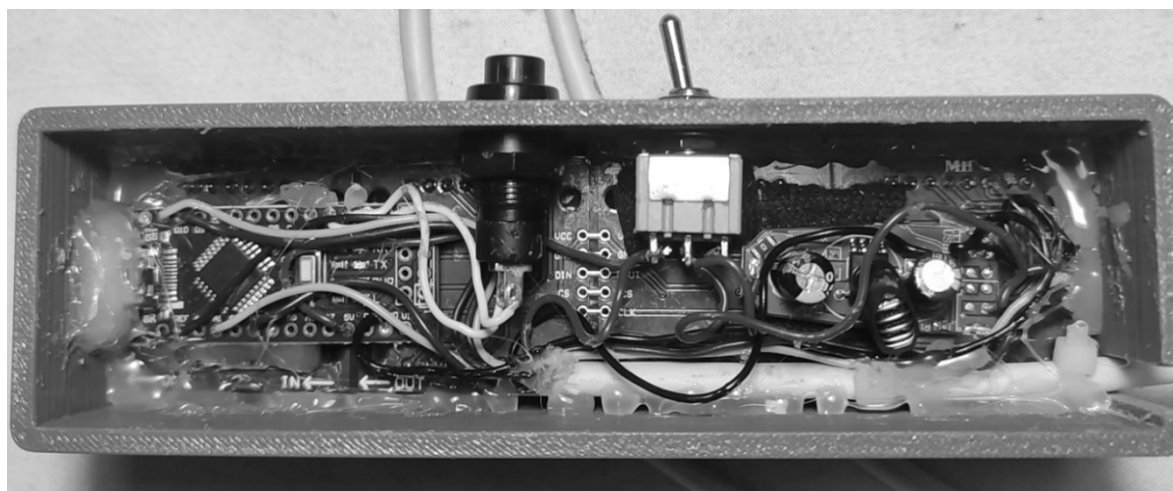


Рисунок 2 – Промежуточный этап сборки устройства

На рисунке 3 показана работа устройства, подключённого к автомобилю Ford Fiesta 2013 г.в. и отображающего обороты двигателя.



Рисунок 3 - Демонстрация работы устройства

Выводы

1. Исследована работа шины CAN и изучены методы парсинга идентификаторов параметров.
2. Проведён анализ готовых устройства для мониторинга CAN и выбран функционал разрабатываемого устройства.
3. Разработано и собрано устройство для мониторинга CAN.
4. Проведено тестирование корректной работы устройства.

Перечень ссылок

1. Турищев, Д. В. Обзор сканеров на базе микросхемы ELM327 / Д. В. Турищев, Д. Г. Тертерашвили, О. С. Ведринский // Молодежный вектор развития аграрной науки : Материалы 70-й научной студенческой конференции, Воронеж, 01 февраля – 01 2019 года / Воронежский государственный аграрный университет. Том Часть I. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. – С. 137-140. – EDN LYMSPL.

УДК 621.311.4

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛЭП И ПОДСТАНЦИЙ: МОДУЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ БЫСТРОГО РАЗВЁРТЫВАНИЯ В ЗОНЕ АКТИВНОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ

Г.М. Емелин

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва», г. Саранск, РМ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы восстановления электросетевой инфраструктуры Донбасса. Предлагается подход к зонированию территории по степени разрушений. Разработана методика выбора модульных решений (блочно-модульные подстанции, композитные опоры, мобильные ПС). На условном примере показано, как предлагаемая методика может быть применена для восстановления ПС 35 кВ. Обсуждаются перспективы дальнейшего внедрения.

Ключевые слова: восстановление ЛЭП, модульные подстанции, композитные опоры, методика выбора, зонирование, Донбасс.

Annotation. The article considers the problems of restoring the power grid infrastructure of Donbass. An approach to zoning the territory by degree of destruction is proposed. A method for choosing modular solutions (block-modular substations, composite supports, mobile substations) is developed. A conditional example shows how the proposed method can be applied to restore a 35 kV substation. Prospects for further implementation are discussed.

Keywords: power line restoration, modular substations, composite supports, selection method, zoning, Donbass.

Введение. Электросетевая инфраструктура Донбасса характеризуется высоким износом (по оценкам специалистов — до 70–80 %) и значительными боевыми повреждениями, полученными в ходе активной фазы конфликта. По данным эксплуатационных организаций, за период боевых действий разрушены или получили критические повреждения десятки подстанций 35–110 кВ, сотни трансформаторных пунктов, тысячи опор ЛЭП. На сегодняшний день отсутствует системный подход к выбору технологии восстановления в зависимости от степени разрушений. Часто применяется либо капитальное строительство (долго и дорого, требует больших объёмов бетонных и строительных работ), либо временные «латания» (замена отдельных узлов без системного подхода), не обеспечивающие долговременной надёжности.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Цель данной работы — предложить подход к зонированию территории и методику выбора модульных решений, которые могут быть использованы при восстановлении ЛЭП и подстанций Донбасса. В дальнейшем предполагается апробация предложенной методики на реальных объектах. В статье на условном примере демонстрируется, как эта методика может работать.

Для системного выбора технологии восстановления предлагается разделить все объекты электросетевого хозяйства Донбасса на три зоны в зависимости от степени полученных повреждений. Данная классификация является необходимым первым шагом перед принятием любого технического решения, поскольку выбор технологии (капитальное строительство, модульная замена, поэлементный ремонт или модернизация) напрямую зависит от того, с какой степенью разрушений мы имеем дело.

Таблица 1 – Предлагаемое зонирование территории по степени разрушений

Зона	Характер повреждений	Рекомендуемый тип решения (предварительно)
«Красная»	Полное разрушение ПС, опор, зданий	БМП, мобильные ПС, композитные опоры
«Жёлтая»	Частичные повреждения, фундаменты/стены сохранились	Контейнерные КРУ, столбовые ТП, быстросборные опоры
«Зелёная»	Износ, боевых повреждений нет	Энергосберегающие модули, модернизация

Предлагаемое зонирование не является жёсткой классификацией и уточняется по результатам детального обследования каждого объекта. В перспективе предполагается разработка количественных критериев (процент сохранившегося оборудования, стоимость восстановления относительно замены, сроки ввода). Один объект может сочетать признаки разных зон — в таком случае его относят к наиболее критической зоне (например, при сочетании «жёлтой» и «красной» выбирают «красную»). Зонирование можно использовать для планирования очередности работ, распределения ресурсов и оценки финансирования: объекты «красной» зоны получают приоритет номер один, требуют наибольших вложений и сложной логистики; «жёлтой» — восстанавливаются силами местных бригад без тяжёлой техники;

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

«зелёной» — включаются в программы долгосрочной модернизации с отдельным финансированием.

Разработана методика выбора оптимального модульного решения для восстановления ЛЭП и подстанций. Методика включает следующие этапы:

1. Оценка состояния – отнесение объекта к одной из трёх зон по таблице 1.
2. Определение требуемой мощности – расчёт по текущей нагрузке с запасом 20–30 %.
3. Установление срока ввода – аварийный (до 7 дней), плановый (до 30 дней) или модернизация (до 90 дней).
4. Анализ транспортной доступности – возможность подъезда тяжёлой техники.
5. Выбор типового модуля – по номенклатуре (см. таблицу 2).
6. Планирование логистики и монтажа – расчёт ресурсов.
7. Пусконаладка и ввод в эксплуатацию.

Таблица 2 – Предлагаемая номенклатура модульных решений

Тип модуля	Назначение	Ориентировочное время ввода
Композитная опора на винтовых сваях	Замена опор ЛЭП 10–110 кВ	1–3 дня
БМП контейнерная (2–10 МВА)	Замена разрушенной ПС 35–110 кВ	10–14 дней
Мобильная ПС на шасси	Временное замещение	1–2 дня
Контейнерное КРУ (4–12 ячеек)	Восстановление РП 0,4–10 кВ	3–5 дней
Столбовая ТП с сухим трансформатором	Замена КТП 10/0,4 кВ	1–2 дня

Методика может быть реализована в виде чек-листа или программного модуля для аварийно-восстановительных бригад. Её апробация на реальных объектах является задачей следующих этапов работы.

Покажем, как предлагаемая методика может быть применена на практике. Рассмотрим условный объект – питающую подстанцию 35 кВ в одном из населённых пунктов Донбасса. Исходные данные:

- подстанция полностью разрушена (прямое попадание);
- требуемая мощность потребителей – 5 МВА;

- необходимый срок ввода – 14 дней (для восстановления теплоснабжения);
- подъездные пути сохранились частично, возможен подъезд крана грузоподъемностью до 25 т;
- капитальное строительство оценивается в 9 месяцев и 120 млн руб.

Применяем методику шаг за шагом:

Шаг 1. Оценка состояния – по таблице 1 объект относится к «красной» зоне (полное разрушение). Принимаем решение о полной замене, а не ремонте.

Шаг 2. Требуемая мощность – 5 МВА, с запасом на развитие сети принимаем 6,3 МВА (два трансформатора по 6,3 МВА или один на 10 МВА). Выбираем вариант 2×6,3 МВА как более надёжный (резервирование).

Шаг 3. Срок ввода – 14 дней, что соответствует плановому восстановлению с элементами аварийного. Это допустимо для БМП, но не для капитального строительства.

Шаг 4. Транспортная доступность – подходит для доставки контейнерной БМП (вес одного контейнера до 25 т). Дорога требует небольшой подготовки (подсыпка на 100 м).

Шаг 5. Выбор модуля – по таблице 2 выбираем БМП контейнерного типа 2×6,3 МВА с ячейками 10 кВ и 35 кВ в одном блоке.

Шаг 6. Логистика – заказ двух контейнеров с ближайшего склада (300 км), подготовка площадки 12×12 м (расчистка, выравнивание), монтаж на винтовые сваи (8 свай глубиной 3 м).

Шаг 7. Пусконаладка – 3 дня, включая проверку изоляции, заземления, релейной защиты, автоматики, опробование под нагрузкой.

Результат по примеру: срок ввода – 14 дней, ориентировочная стоимость – 90 млн руб., что в 6 раз быстрее и на 25 % дешевле капитального строительства. При повторном повреждении до 60 % модулей (контейнеры, ячейки КРУ) может быть использовано повторно после ремонта.

Данный пример является условным и служит для иллюстрации работоспособности методики. Для получения достоверных экономических и временных оценок необходима апробация на реальных объектах.

На пути реализации предложенного подхода выделяется несколько проблемных зон: отсутствие утверждённого перечня типовых модульных решений для Донбасса, недостаточная

квалификация персонала, несовершенство нормативной базы и отсутствие резервного склада модулей. В качестве первоочередных мер предлагается разработать региональный каталог модульных решений, организовать обучение бригад, создать склад-распределитель и упростить регламенты ввода в эксплуатацию для зоны активной реконструкции.

Выводы.

В ходе работы были предложены классификации территорий Донбасса на три зоны по степени разрушений; разработана семиэтапная методика выбора модульного решения; на условном примере показано сокращение сроков в 3–6 раз и затрат на 15–30 %. Дальнейшие исследования предполагают апробацию методики на реальных объектах, разработку программного модуля для автоматизированного выбора и оценку устойчивости композитных опор.

Список литературы

1. Шпота, А. А., Ремесник, Д. В. Композитные опоры // Современные инновации. 2015. № 2 (2). С. 37–40.
2. Акимов, В. А., Мишурный, А. В. Аварии на системах электроснабжения: определение индекса приоритета восстановления электроснабжения // Технологии гражданской безопасности. 2022. Т. 19. № 4 (74). С. 44–47.
3. Васильев, К. О. Особенности монтажа комплектных трансформаторных подстанций блочно-модульного типа // Вестник науки. 2022. Т. 4. № 5 (50). С. 138–142.
4. Хаев, А. Л. Оценка сроков службы электрического оборудования станции и подстанции // Наука и образование сегодня. 2022. № 1 (70). С. 43–48.

УДК 004.896

РАЗРАБОТКА ДВУХОСЕВОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Б.Г. Ермоленко, Д.В. Бажутин

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: В работе рассматривается разработка системы технического зрения и управления сервоприводами на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 5. Реализован алгоритм обработки видеопотока с использованием методов компьютерного зрения для обнаружения и отслеживания объектов. Обеспечено формирование управляющих сигналов для сервоприводов с применением контроллера PCA9685 по шине I2C. Рассмотрены преимущества, ограничения и области применения разработанной системы.

Ключевые слова: техническое зрение, Raspberry Pi 5, сервоприводы, обработка изображений, I2C, PCA9685, автоматическое управление

Annotation: The paper presents the development of a computer vision system and servo control based on the Raspberry Pi 5 single-board computer. An algorithm for real-time video stream processing using computer vision methods for object detection and tracking is implemented. Control signals for servo motors are generated using the PCA9685 controller via the I2C interface. Advantages, limitations, and application areas of the developed system are discussed.

Keywords: computer vision, Raspberry Pi 5, servo motors, image processing, I2C, PCA9685, automatic control

В настоящее время системы технического зрения и автоматизированного управления являются неотъемлемой частью современных робототехнических и мехатронных комплексов. Они находят применение в промышленности, системах безопасности, автономных роботах и интеллектуальных устройствах.

Актуальной задачей с этой точки зрения является разработка быстродействующих систем с использованием доступных компонентов, обеспечивающих возможность автоматического и ручного управления исполнительными механизмами.

Целью данной работы является разработка системы технического зрения с функцией центрирования изображения на обнаруженных объектах путем управления подвижной двухосевой платформой с сервоприводами управления сервоприводами на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi 5, модель которой показана на рисунке 1.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- анализ аппаратной платформы Raspberry Pi 5;
- изучение методов обработки изображений;
- разработка алгоритма управления сервоприводами;
- реализация взаимодействия между системой зрения и исполнительными механизмами.

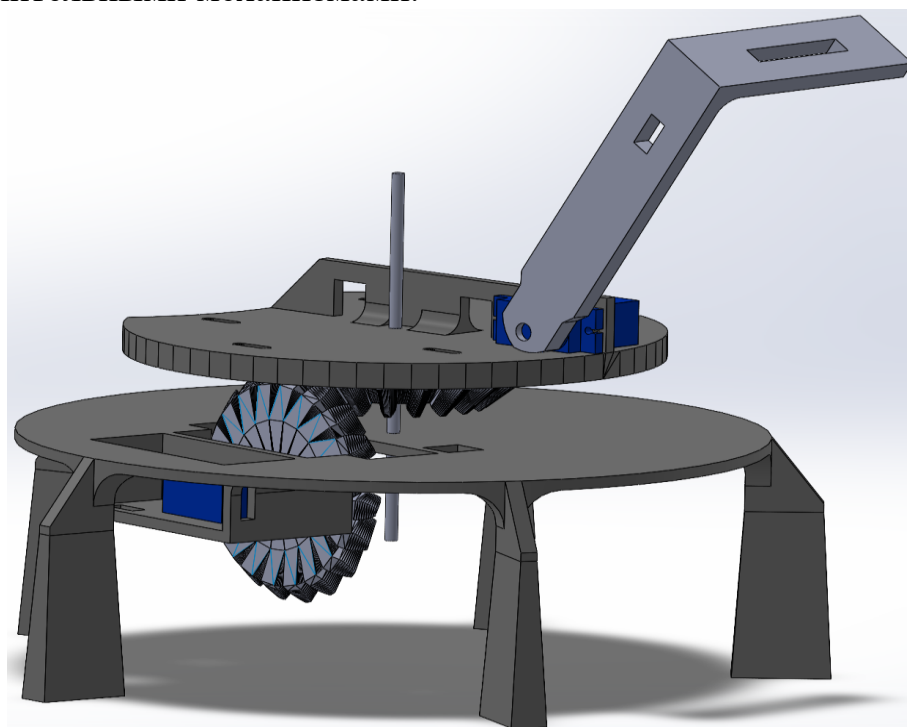


Рисунок 1 — Общий вид двухосевого следящего механизма в
SOLIDWORKS

В качестве центрального вычислительного элемента выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi 5. Данная платформа обладает достаточной вычислительной мощностью для обработки видеопотока в реальном времени [1].

Для управления сервоприводами в системе используется специализированный контроллер PCA9685, подключаемый по шине I2C. Он позволяет формировать до 16 независимых ШИМ-сигналов с высокой точностью, что существенно упрощает управление исполнительными механизмами [2].

Для обработки видеопотока с целью обнаружения в кадре объектов, используются модули OpenCV и MediaPipe. В рамках данной работы рассматривается задача поиска в кадре лиц методами сегментирования изображений, как это показано на рисунке 2 [3].

Оригинальное изображение

Обнаружение лица и ключевые точки

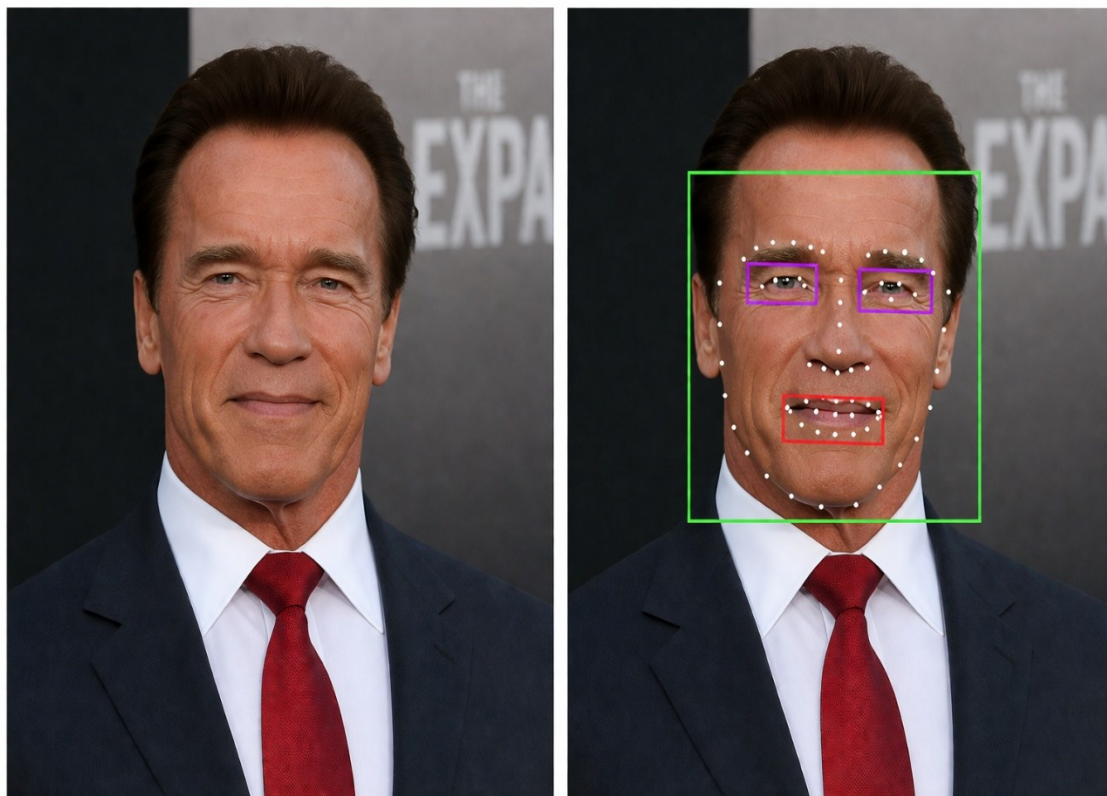


Рисунок 2 — Пример обработки изображения в OpenCV

Основные этапы работы системы:

1. Захват изображения с камеры в реальном времени;
2. Предобработка изображения (масштабирование, фильтрация);
3. Выделение объекта интереса;
4. Определение координат объекта в кадре;
5. Формирование управляющего сигнала.

Координаты объекта используются для вычисления отклонения от центра кадра. На основе этого отклонения формируется управляющее воздействие, направленное на корректировку положения системы. Функциональная схема разработанной системы показана на рисунке 3.

Для реализации движения механической части используются сервоприводы, что позволяет обеспечить точное позиционирование без необходимости применения сложных алгоритмов управления [4, 5]. С учетом особенностей схемы питания сервоприводов возникает необходимость использования промежуточного модуля усилителя

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

мощности для обеспечения допустимого уровня силы тока, протекающего через периферийные порты платы Raspberry Pi. Из этих соображений принято решение использовать ШИМ-модуль PCA9685, управляемый по шине I2C. Принципиальная электрическая схема соединений разработанного устройства оказана на рисунке 4.

УПРАВЛЕНИЕ СЕРВОПРИВОДАМИ И ГЕНЕРАЦИЯ ШИМ-СИГНАЛОВ

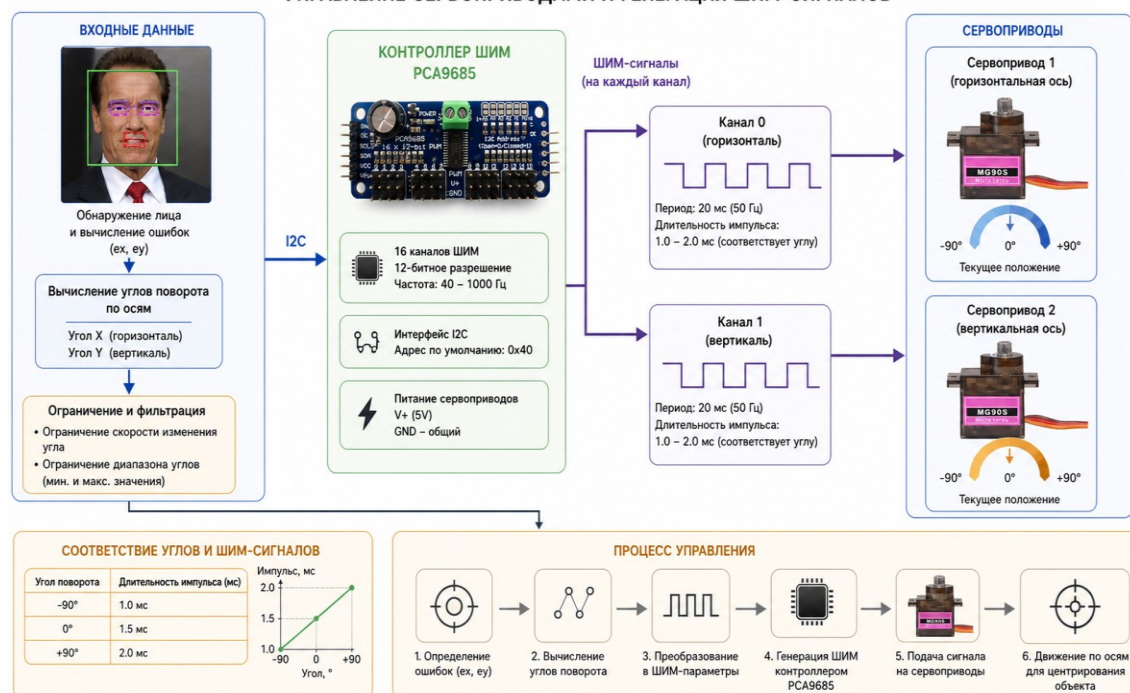


Рисунок 3 — Структурная схема основных этапов работы системы

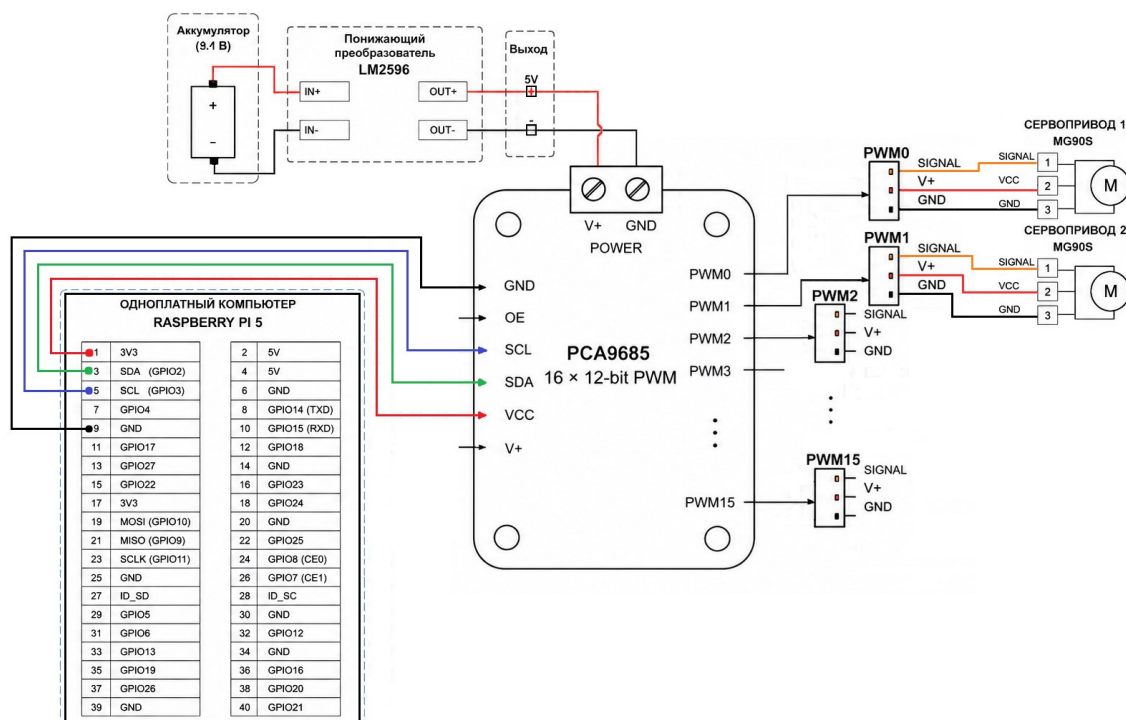


Рисунок 4 — Принципиальная схема подключения компонентов

Алгоритм управления включает следующие этапы:

1. Нахождение объекта в кадре и определение его положения;
2. Расчёт ошибки центрирования объекта;
3. Преобразование ошибки в угол поворота сервоприводов;
4. Передача команд на ШИМ-контроллер.

В результате система способна автоматически отслеживать объект и изменять положение в пространстве, обеспечивая его удержание в центре кадра. Дополнительно система оснащается модулем трансляции результатов распознавания через локальную сеть, а также элементами ручного управления сервоприводами, для чего используется модуль Flask.

Выводы

В ходе работы была разработана система технического зрения и управления сервоприводами на базе Raspberry Pi 5. Реализован алгоритм обработки изображений и управления исполнительными механизмами, обеспечивающий автоматическое отслеживание объекта.

Полученные результаты подтверждают возможность использования одноплатных компьютеров для построения функциональных систем технического зрения. Дальнейшее развитие работы может быть связано с применением нейронных сетей; улучшением алгоритмов управления; повышением точности и скорости обработки; интеграцией дополнительных датчиков.

Перечень ссылок

1. Hobbs T., Ali A. Smart home control using real-time hand gesture recognition and artificial intelligence on Raspberry Pi 5 // Electronics. – 2025. – Vol. 14, №20. – Article 3976.
2. Karim M.Z.B.A., Thamrin N.M. Servo motor controller using PID and graphical user interface on Raspberry Pi for robotic arm // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2319. – 012015.
3. Arjunkrishna P.R., Aswin R.N., Atchaya V., Devanarayanan S., Malik G.R., Jayasree K.R. Vision-based gesture-controlled servo motor positioning on Raspberry Pi using MediaPipe and OpenCV // Proceedings of the 4th International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS 2026). – 2026. – C. 277–281.
4. Lopez A.M., Ardila Uribe J.E. Visual servo control law design using 2D vision approach for a 3 DOF robotic system built with LEGO EV3 and a Raspberry Pi // Proceedings of the IEEE Symposium on Signal Processing, Images and Artificial Vision (STSIVA). – 2016. – C. 1–6.
5. Kavitha A. IoT driven servo motor control on Raspberry Pi 3B // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2024. – Vol. 12, Issue 01.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF A SPACE-BASED SOLAR POWER STATION (SBSP)

M.V. Zhyr, A.V. Zhyr A.A. Chushkov, O.A. Kravchenko
STATE BUDGETARY NON-TYPICAL EDUCATIONAL
INSTITUTION “REPUBLICAN LYCEUM-BOARDING SCHOOL
‘ERUDIT’ – CENTER FOR GIFTED CHILDREN”, DONETSK, DPR

Аннотация. Статья посвящена анализу концепции космической солнечной электростанции (SBSP) как перспективного направления развития мировой энергетики. Рассматривается историческая эволюция беспроводной передачи энергии и ключевые этапы становления SBSP-технологий. Описываются архитектура станции, варианты орбитального размещения, методы передачи энергии и другие вопросы.

Abstract. The article examines the concept of a Space-Based Solar Power (SBSP) station as an innovative direction for the long-term development of the global energy sector. It reviews the historical evolution of wireless power transmission and modern SBSP concepts by international programs. The architecture of the station, orbital placement options, energy transmission methods, and related issues are described.

Ключевые слова: Космическая солнечная энергетика, беспроводная передача энергии, микроволновая передача, лазерная передача, орбитальные системы, ректенна, SBSP

Keywords: Space-based solar power, wireless power transmission, microwave beaming, laser power beaming, orbital systems, rectenna, SBSP.

Introduction

The global energy system is undergoing rapid transformation. Rising electricity demand, depletion of fossil fuels, and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions push our society towards renewable energy. Although renewable energy technologies have achieved significant progress, their dependence on weather conditions, diurnal cycles, and geographical limitations restricts their ability to provide stable, uninterrupted power. These constraints stimulate interest in fundamentally new approaches.

SBSP station offers a radical solution. Operating above the atmosphere, such a station receives continuous sunlight without interruptions caused by clouds, night-time, or seasonal variations. This unique advantage makes SBSP station fundamentally different from terrestrial solar power. However,

accomplishing it requires overcoming immense technical, economic, and environmental challenges.

Historical Development of Wireless Power Transmission

The origins of SBSP trace back to Nikola Tesla. In the early 20th century, Tesla's Wardencliff Tower experiments demonstrated that electricity could be transmitted wirelessly using electromagnetic waves. Though unfinished, they laid the foundation for long-distance wireless energy.

By the mid-20th century, laboratory experiments confirmed microwave transmission's feasibility. Microwaves could be directed, focused, and converted back into electricity with relatively high efficiency. Meanwhile, photovoltaic technology evolved, enabling solar-powered satellites. Vanguard 1 (1958) proved solar panels could reliably harvest energy in space.

A breakthrough came in 1968 when Peter Glaser proposed the first engineering design for SBSP station [1]: large orbital solar arrays transmitting microwaves to Earth. In the 1970s, NASA and the U.S. Department of Energy studied the Satellite Power System concept. The studies confirmed that SBSP was physically viable, but significant barriers remained: poor photovoltaic efficiency, restricted launch capacity, and no available technology for large-scale orbital assembly.

By the 21st century, conditions changed. Photovoltaic cells became highly efficient, phased-array antennas precise, microwave transmitters reliable, and reusable rockets reduced launch costs. Nations including Japan, China, the U.S., Russia and the EU launched SBSP research programs, moving the idea from theory to experimental prototypes.

Architecture and Main Components of SBSP Systems

The design of a Space-Based Solar Power (SBSP) station is made out of several subsystems:

Thin-film solar arrays unfold in orbit to capture nearly constant sunlight, engineered to withstand radiation, micrometeoroids, and extreme temperatures. Power conditioning units regulate voltage and protect against overloads, preparing energy for conversion. Microwave generators—such as klystrons or magnetrons—transform DC electricity into high-frequency microwaves, which are directed through phased-array antennas that electronically steer beams with precision. On the ground, vast rectennas receive these microwaves and convert them back into DC power, achieving efficiencies above 77% but requiring large land areas and strict safety measures. Finally, orientation and stabilization systems, using gyroscopes, sensors, and algorithms, keep arrays pointed at the Sun and antennas aligned

with rectennas, while thermal control systems manage the intense heat from high-power equipment.

Together, these subsystems form a complex but well-structured architecture capable of delivering orbital solar power to Earth.

Microwave and Laser Transmission

Wireless power transmission is a key element of Space-Based Solar Power, enabling energy collected in orbit to be delivered to Earth. Two main methods are used today: microwave transmission and laser-based transmission [2].

Microwave Transmission

Microwave transmission sends energy from space to Earth by converting satellite-generated DC power into microwaves via klystrons or magnetrons. A phased-array antenna directs the beam to a rectenna, which reconverts it into electricity. The method works reliably in most weather, but beam spreading demands very large antennas and strict safety limits to avoid harmful exposure.

Laser Transmission

Laser transmission converts electricity into a tightly focused beam aimed at photovoltaic receivers that turn the light back into power. It offers precise control and smaller hardware than microwaves, but performance is limited by clouds, fog, and turbulence. High-power lasers also pose safety risks, requiring strict protective measures.

Orbital Placement and Transmission Channel

The choice of orbit is a fundamental design decision for SBSP systems. Geostationary orbit (GEO) provides nearly continuous sunlight and a fixed position, enabling uninterrupted power delivery to a single rectenna. Its drawbacks are high launch costs, transmission losses over long distances, and the need for very large antennas. Low Earth orbit (LEO) reduces launch costs and transmission losses but suffers from rapid motion and frequent eclipses, requiring complex satellite constellations. Sun-synchronous orbit (SSO) offers predictable lighting yet still faces eclipses and tracking challenges. Lunar and cislunar concepts envision infrastructure on the Moon or in lunar orbit, potentially using local materials to reduce Earth launch mass, though these remain speculative. Ultimately, transmission efficiency depends on orbital geometry, atmospheric conditions, and beamforming, with factors such as divergence, attenuation, and scattering shaping how much power reaches the rectenna [4].

Safety and Economic Assessment

Safety is a central concern in the implementation of SBSP stations. It relies on keeping microwave beams within strict power-density limits to avoid hazardous exposure. Safety measures include restricting access to

rectenna zones, implementing automatic shut-off in case of misalignment, and continuous monitoring of atmospheric conditions. With highly directional beams, risks to aircraft and wildlife can be minimized through proper procedures [2].

From an economic perspective, the main expenses in SBSP systems come from launching large masses into orbit and assembling extensive structures in space. Traditional expendable rockets make SBSP systems prohibitively expensive, but reusable launchers and robotic assembly could reduce the overall cost. Even so, SBSP station remains a long-term prospect, facing competition from rapidly advancing terrestrial renewables and storage. Current research emphasizes small-scale demonstrations and practical deployment scenarios [4].

Conclusion

Space-Based Solar Power stations represent a technologically ambitious yet conceptually robust approach to clean energy generation. By relocating solar power collection to space and delivering energy to Earth via microwaves, SBSP can provide continuous, weather-independent power. Although significant challenges remain, advances in science, materials, robotics, and reusable launch technologies are gradually shifting SBSP systems from theoretical exploration to practical feasibility. In the context of the innovative development of Donbass, SBSP research contributes to technological modernization, energy security, and integration into global scientific trends.

REFERENCES

1. Glaser P. Power from the Sun: Its Future // Science. – 1968.
2. Dakora, J.D.Y., Davidson, I.E. and Sharma, G., 2020, August. Review of modern solar power satellite and space rectenna systems.
3. logla, A., Eleiwa, M.A.H. and Alshortan, H., 2021. Design and Evaluation of Transmitting Antennas for Solar Power Satellite Systems.
4. Space-based solar power: Unlocking continuous, renewable energy through wireless transmission from space; Kelvin Edem Bassey, Shahab Anas Rajput and Olaniyi Oluwaseun Oladepo.

УДК 621.311:654.1

УДАЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОСИСТЕМАМИ ДОМА С ПОМОЩЬЮ ПРИЛОЖЕНИЯ VIRTUINO MODBUS

В.П. Заярный, А.А. Широчин, Я.В. Жевнеров, И.А. Леонович, Е.Д.
Гвоздовский

ВУЗ «БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» г. Минск, РБ

Аннотация. В работе разработана система удаленного управления электросистемами дома на базе контроллера ОВЕН ПЛК100 и приложения *Virtuino Modbus*. Система обеспечивает управление электроприводом, мониторинг параметров сети и контроль энергопотребления. Программная реализация выполнена в среде *CoDeSys* на языке *FBD*.

Ключевые слова: ПЛК, удаленное управление, *Modbus RTU*, *RS-485*, *CoDeSys*, частотный преобразователь, умный дом.

Annotation. This work involved developing a remote control system for a home's electrical systems based on the *OWEN PLC100* controller and the *Virtuino Modbus* application. The system enables electric drive control, network parameter monitoring, and energy consumption monitoring. The software was implemented in the *CoDeSys* environment using the *FBD* language.

Keywords: *PLC*, remote control, *Modbus RTU*, *RS-485*, *CoDeSys*, frequency converter, smart home.

Современные системы «умного дома» направлены на повышение комфорта, безопасности и энергоэффективности жилья. Однако большинство коммерческих решений обладают высокой стоимостью или ограниченной надежностью, особенно при использовании беспроводных технологий. В связи с этим актуальной является разработка доступной и устойчивой системы удаленного управления электросистемами дома.

В рамках курсового проектирования была поставлена цель создать систему дистанционного управления на базе промышленного оборудования с использованием облачного приложения *Virtuino Modbus*. Для достижения поставленной цели решаются задачи организации обмена данными по протоколу *Modbus RTU*, разработки алгоритма управления и обеспечения удаленного контроля параметров электросистем.

При выборе оборудования обязательно учитываются надежность и безопасность, репутация производителя, в данном случае ОВЕН – известный российский бренд с развитой сервисной сетью, наличие гарантии и технической поддержки. Важную роль играет простота монтажа и настройки, так как система устанавливается не на промышленном объекте с штатом инженеров, а в обычном доме. Оборудование должно быть рассчитано на работу при комнатных температурах и нормальной влажности, но с запасом по надежности, чтобы выдерживать возможные перепады напряжения в сети.

Для домашней системы автоматизации класс защиты IP оборудования не менее важен, чем для промышленной, хотя требования здесь несколько иные. В отличие от промышленной системы, обычные жилые помещения имеют относительно мягкие условия эксплуатации. Однако контроллеры и преобразователи часто размещаются в электрических щитах на улице, в неотапливаемых коридорах, подвалах или гаражных помещениях, где возможны перепады температур, запыленность и риск попадания воды при утечках. Поэтому для контроллера и преобразователя частоты, установленных внутри дома в закрытом щитке, достаточно класса защиты IP20 – это стандартная защита от частиц. Но если оборудование монтируется в неотапливаемом подвале или на улице, минимально допустимым становится класс IP54, который защищает от пыли и брызг воды с любого направления. Для датчиков, которые могут устанавливаться непосредственно в зоне насоса или в сыром подвале, требования еще выше – здесь уже требуется IP65 или даже IP67, чтобы прибор не вышел из строя при случайном затоплении или конденсате. Игнорирование класса защиты при выборе места установки может привести к коррозии контактов, ложным срабатываниям или полному выходу автоматики из строя в самый неподходящий момент, например во время зимних морозов или летней грозы. Поэтому необходимо заранее оценить реальные условия в каждом конкретном помещении и выбрать оборудование с соответствующим классом защиты корпуса.

Предлагаемая система построена на основе программируемого логического контроллера, частотного преобразователя, GSM-модуля и исполнительных механизмов. В качестве центрального элемента выбран контроллер ОВЕН ПЛК100, обеспечивающий обработку сигналов и управление устройствами. Его выбор обусловлен поддержкой стандарта МЭК 61131-3, наличием интерфейса RS-485 и протокола Modbus RTU, а также доступной стоимостью и надежностью эксплуатации.

Для управления электроприводом используется частотный преобразователь ОВЕН ПЧВ1, позволяющий регулировать скорость вращения асинхронного двигателя. Применение частотного регулирования обеспечивает снижение пусковых токов, повышение энергоэффективности и продление срока службы оборудования. В системе используется трехфазный асинхронный двигатель мощностью 0,5 кВт, что является оптимальным решением для бытовых задач, таких как управление насосами или вентиляцией.

Передача данных между компонентами системы осуществляется по промышленному протоколу Modbus RTU через интерфейс RS-485. Данный подход обеспечивает высокую помехоустойчивость и надежность связи по сравнению с беспроводными технологиями. Для удаленного доступа используется GSM-модуль ПМ01, позволяющий управлять системой независимо от наличия проводного интернета.

Программная реализация системы выполнена в среде CoDeSys с использованием языка функциональных блоков FBD. Разработанный алгоритм (

Листинг 1) включает обработку дискретных и аналоговых сигналов, управление режимами работы двигателя, а также контроль параметров, таких как напряжение, ток, мощность и частота. Использование библиотек упрощает взаимодействие между контроллером и частотным преобразователем.

Листинг 1 – Фрагмент программы управления с обменом по Modbus RTU

VAR

Voltage : REAL; (* Напряжение *)

Current : REAL; (* Ток *)

Power : REAL; (* Мощность *)

Frequency : REAL; (* Частота *)

MB_VoltReg AT %MW2 : WORD;

MB_CurrReg AT %MW3 : WORD;

MB_PowerReg AT %MW4 : WORD;

MB_FreqFB AT %MW5 : WORD;

END_VAR

Voltage := WORD_TO_REAL(MB_VoltReg) / 10.0;

Current := WORD_TO_REAL(MB_CurrReg) / 10.0;

Power := WORD_TO_REAL(MB_PowerReg) / 10.0;

Frequency := WORD_TO_REAL(MB_FreqFB) / 10.0;

Одним из ключевых преимуществ разработанной системы является возможность мониторинга энергопотребления. Это позволяет пользователю анализировать расход электроэнергии и принимать решения по его оптимизации. Таким образом достигается повышение энергоэффективности и снижение эксплуатационных затрат.

Также важным аспектом является надежность системы. Использование проводной связи RS-485 и промышленного оборудования обеспечивает стабильную работу даже в условиях помех и нестабильного электропитания. Применение GSM-связи гарантирует доступ к системе из любой точки, где есть мобильная сеть.

В результате проведенной работы разработана система удаленного управления электросистемами дома (рис. 1), сочетающая в себе надежность промышленных решений и доступность для бытового применения. Предложенный подход может быть использован при модернизации существующих систем автоматизации или создании новых решений в области «умного дома».



Рисунок 1 – Структурная схема системы дистанционного управления электросистемами дома

Перечень ссылок

1. Лившиц, Ю. Э. Программируемые логические контроллеры для управления технологическими процессами. В 2 ч. Ч 1. / Лившиц, Ю. Э., Лакин, В. И., Монич, Ю. И. – БНТУ, 2014.
2. Лившиц, Ю. Э. Программируемые логические контроллеры для управления технологическими процессами. В 2 ч. Ч 2. / Лившиц, Ю. Э., Лакин, В. И., Монич, Ю. И. – БНТУ, 2014.
3. ПЛК100 контроллер для средних систем автоматизации с DI/DO (обновленный). – URL: https://owen.ru/product/plk100_m02 (дата обращения: 09.03.2026).
4. Руководство по эксплуатации ПЛК100. – URL: https://owen.ru/product/plk110_m02/documentation (дата обращения: 16.03.2026).
5. Языки программирования, используемые в проектах CoDeSys. – URL: <https://www.sdt42.ru/yazyki-programmirovaniya-ispolzuemye-v-proektah-codesys/> (дата обращения: 05.04.2026).

УДК 620.97

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ ИНЕРЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ АВТОНОМНОСТИ РАБОТЫ СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА

И.А. Земсков, М.В. Бурмейстер, И.И. Бердышев, Д.К. Чесноков
ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ»
г. Донецк, Россия

Аннотация: В настоящее время на многих промышленных объектах находит широкое применение распределенная генерация (РГ). Данный подход позволяет увеличить экономическую эффективность работы предприятия. В рамках данной статьи описан подход, позволяющий снизить негативный эффект от возникновения резких возмущений во внутренней распределительной сети промышленных.

Ключевые слова: изолированные энергосистемы, распределенная генерация, система виртуальной инерции.

Annotation: Distributed generation (DG) is currently widely used at many industrial facilities. This approach allows for increased economic efficiency. This article describes an approach to reducing the negative impact of sudden disturbances in the internal distribution network of industrial facilities.

Keywords: isolated power systems, distributed generation, virtual inertia systems, VIS.

В последнее время на различных промышленных объектах (нефтедобывающих, нефтеперерабатывающих, металлургических, горно-обогатительных и пр.) наблюдается значительное развитие распределенной генерации (РГ), включающей дизель-генерирующие установки (ДГУ), газотурбинные установки (ГТУ), газопоршневые установки (ГПУ) и возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Применение РГ позволяет снижать нагрузку на распределительную электрическую сеть, уменьшать величину потерь, происходящих при передаче и распределении электроэнергии и, как следствие, увеличивать экономическую эффективность работы предприятия. Однако несмотря на то, что на сегодняшний день существует множество примеров успешного использования РГ в энергосистемах промышленных предприятий, существуют примеры, когда с генерирующих установок (ГУ) объектов РГ возникали технические проблемы, которые влекли за собой негативные финансовые

последствия [1]. Из отечественной практики известен ряд причин возникновения технических проблем эксплуатации объекта РГ, среди которых можно выделить следующие:

- отключение ГУ при небольших кратковременных отклонениях напряжения (ниже 90% и выше 100% от номинального значения $U_{ном}$) или частоты (более чем на 1-1,5 Гц), вызванные переходными процессами в сети;
- отключение ГУ при набросе нагрузки на генератор в размере 20-30% от номинальной мощности без перегрузки ГУ в устанавливаемом режиме (относится к ГПУ);
- значительно более жесткие ограничения номинальной мощности электродвигателей при их прямом пуске от ГУ объекта РГ в изолированном режиме работы, чем это имело место при использовании традиционных паротурбинных или ДГУ.

Для иллюстрации одного из вариантов негативных эффектов от использования ГУ РГ можно привести следующий пример. Промышленный потребитель на своем объекте установил ряд ГУ на случай потери питания от энергосистемы. Вскоре в результате КЗ во внешней сети связь с ней данного объекта была разорвана. Но при этом отключились и все ГУ, которые – как оказалось – имеют быстродействующую защиту от понижения напряжения. В результате объект с весьма строгими требованиями к бесперебойности электроснабжения на время повторного запуска ГУ оказался и без собственного, и без внешнего питания [1].

Подробнее рассмотрим два сценария, а именно: отключение ГУ при отклонениях напряжения или частоты и отключение ГУ при набросе нагрузки. Кроме того, будет говорить лишь о двух типах ГУ – ДГУ и ГПУ.

В случае возникновения переходного процесса в энергосистеме наблюдается кратковременное отклонение напряжения или частоты от значений установившегося режима. В результате возможно срабатывание автоматических устройств защиты, отключающих ГУ. Таким образом система стремится минимизировать риски развития аварийной ситуации (например, лавины частоты или напряжения). Отключение ГУ РГ может усугубить дефицит мощности в энергосистеме объекта РГ, что в свою очередь вызовет немедленное срабатывание автоматической частотной разгрузки, то есть отключение части потребителей (Рисунок 1).

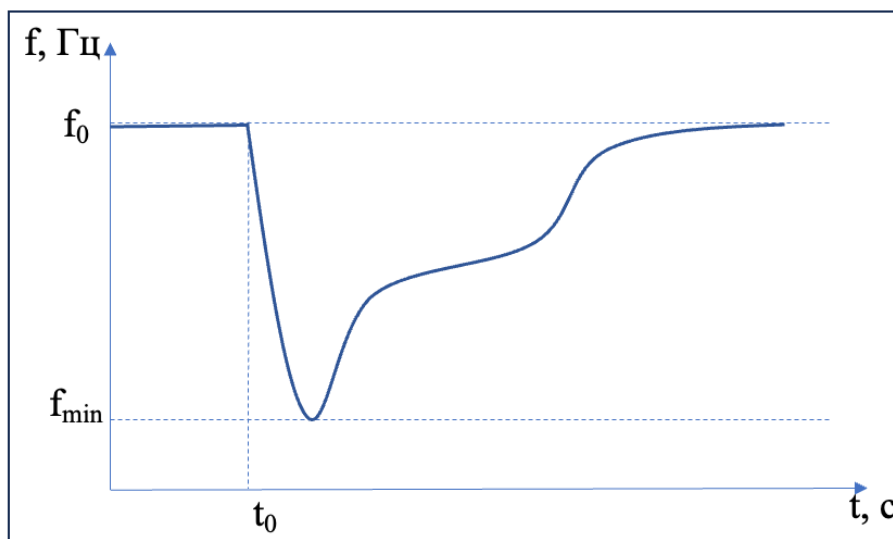


Рисунок 1 – Отклонение частоты в энергосистеме объекта РГ

При набросе нагрузки отключение может быть вызвано одним из (или совокупностью) следующих факторов: перегрузка по току статора и статора, снижение частоты и напряжения ниже допустимых значений, недостаточная мощность ГУ, возникновение вибрации и повышение температуры рабочего тела. Принципиальная схема процесса, происходящего при набросе нагрузки на ГУ РГ приведена на рисунке 2 – в результате большого единовременного наброса нагрузки увеличение мощности ГУ превышает максимально допустимое по его рабочей характеристике, что приводит к отключению ГУ технологической защитой. На Рисунок 2 пунктирной линией показано увеличение нагрузки.

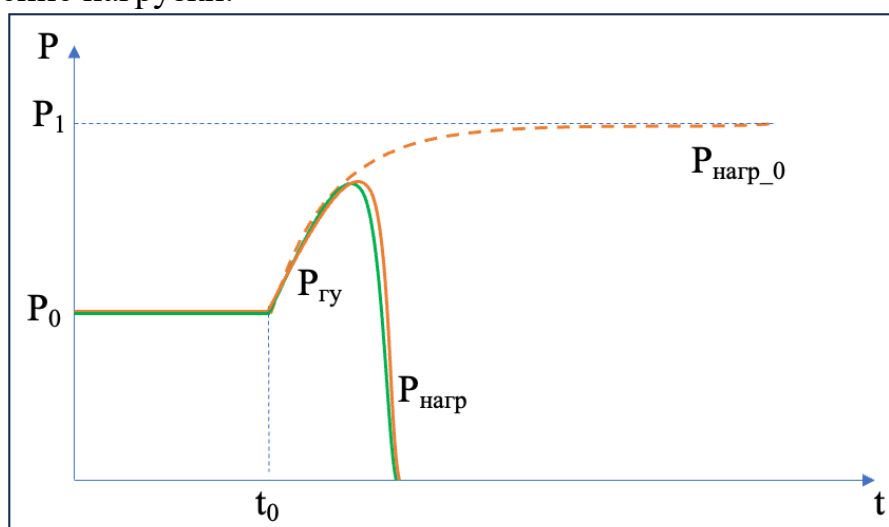


Рисунок 2 – Принципиальная схема наброса нагрузки на ГУ

Для решения обозначенных проблем применяют следующие подходы: использование преобразователей частоты (ПЧ), использование устройств плавного пуска (УПП), оптимизация настройки регуляторов. Использование преобразователей частоты позволяет реагировать на увеличение нагрузки, ограничивая ток, что предотвращает перегрев обмоток генератора. При перегрузке или аварийном повышении частоты в сети, преобразователь частоты может мгновенно (в течение нескольких миллисекунд) снизить выходную активную мощность, тем самым стабилизируя частоту и предотвращая срабатывание защиты по частоте.

Применение УПП в системе с РГ позволяет снизить пусковые токи крупных электродвигателей, предотвращая резкое падение напряжения в сети и перегрузку генератора. Кроме того, использование УПП предотвращает срабатывание автоматических выключателей на выходе генератора при прямом пуске мощных двигателей. На ряду с этим, УПП позволяет продлить срок службы валопровода, редуктора и подшипников ГУ за счет снижения рывковых нагрузок.

Одним из перспективных подходов к решению описанных выше задач является применение систем виртуальной инерции (СВИ). СВИ – это комплекс устройств и алгоритмов, выполняющий преобразование постоянного тока в переменный ток промышленной частоты, имитирующий инерционный отклик синхронных машин на возмущения в ЭЭС [2]. Принципиальная схема СВИ показана на Рисунок 3.

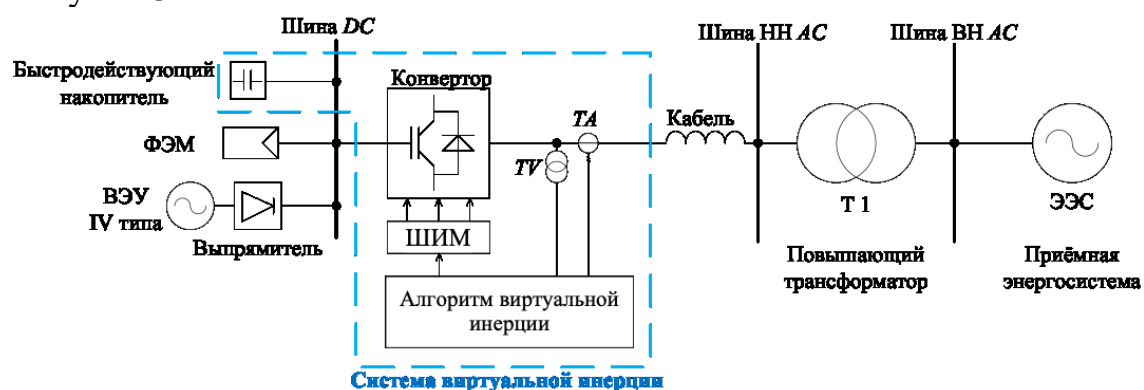


Рисунок 3 – Принципиальная схема устройства СВИ

В случае применения ГПУ даже технологически нормальные, но резкие и значительные изменения нагрузки приводят к их отключению технологической защитой, так как для ГПУ наиболее актуально не только отклонение частоты, но и скорость ее изменения. Согласно [3], распространена ситуация, когда при кратковременных отклонениях частоты более чем на 1,0–1,5 Гц происходят неселективные

отключения генераторных установок при отсутствии угрозы их механического или термического повреждения. Применение СВИ может решить эту проблему, за счет использования мощности накопителя, быстро реагирующей на изменение величины нагрузки, беря на себя часть нагрузки ГУ (Рисунок 4). Это позволяет ГУ избежать критических режимов работы и срабатывания защитной автоматики.

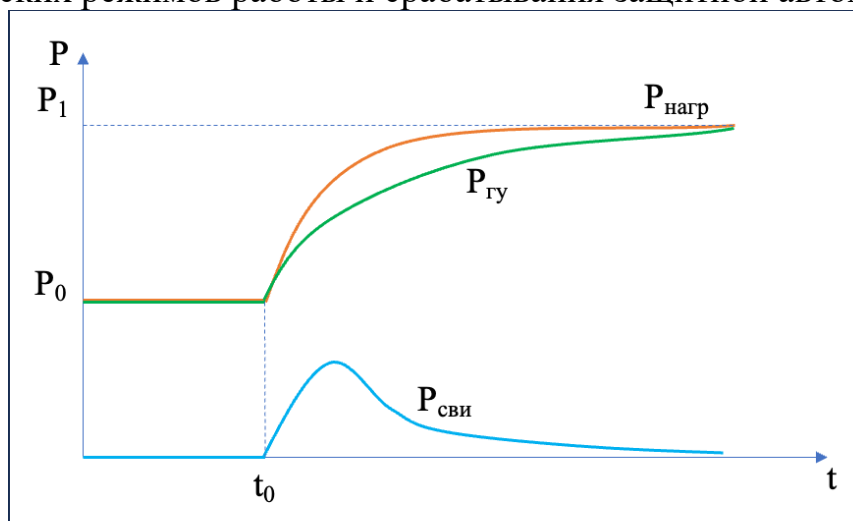


Рисунок 4 Схема процесса наброса нагрузки на ГУ с применением СВИ

Благодаря наличию СВИ, ГУ испытывает меньшую нагрузку при набросе мощности, вызванным включением мощного электроприёмника. Таким образом обеспечивается плавное выведение генератора на новый режим работы и предотвращается срабатывание противоаварийной автоматики. Кроме того, в случае возникновения в сети возмущения, то есть отклонения по напряжению и (или) по частоте, применение СВИ снижает максимальные значения амплитуд отклонения частоты в сети и напряжения в узле подключения, снижая риск срабатывания защитной автоматики, отключающей ГУ.

Перечень ссылок

1. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография. – Нижний Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.
2. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.
3. Бурмейстер М.В., Бердышев И.И., Булатов Р.В., Насыров Р.Р. Системы виртуальной инерции: новый подход к интеграции ВИЭ в электроэнергетические системы // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 6(81). – С. 74-81.

УДК 620.97

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СО СТАТИЗМОМ ПО ЧАСТОТЕ

А.Д. Иваницкий, М.В. Бурмейстер, В.А. Пронина, И.И. Бердышев,
Ю.Д. Кавойков
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» г. Донецк, Россия

Аннотация: Для подключения ВИЭ к сети используются преобразователи, которые должны участвовать в регулировании частоты. Для этого необходимо модифицировать их САУ. В статье разработана САУ на основе статизма по частоте. Для её проверки была разработана физическая модель. Результаты проведенных опытов показали снижение отклонения частоты при применении разработанной САУ.

Ключевые слова: регулирование частоты, САУ преобразователя, статизм по частоте.

Annotation: To connect RES to the grid, converters are used, which must be involved in frequency regulation. To do this, it is necessary to modify their ACS. In this article, an ACS based on frequency statism has been developed. A physical model has been created to test the system. The results of the experiments have shown a decrease in frequency deviation when the developed ACS is used.

Keywords: frequency control, converter control system, droop control.

В настоящее время активно развиваются возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечные (СЭС) и ветроэлектрические станции (ВЭС). Поскольку они имеют стохастический характер выработки, поддержание баланса активной мощности в энергосистеме значительно усложняется. Согласно [1, 5], к силовым преобразователям, подключающим ВИЭ к сети, предъявляются требования по участию в первичном регулировании частоты.

Исторически первое упоминание регулятора на основе статизма датируется 1994 годом, а в 2017 году использование такого контроля было одобрено NREL для крупных электросетей [2, 3]. Для удовлетворения современных требований перспективным подходом является применение системы автоматического управления (САУ) силового преобразователя на основе статизма по частоте.

Современной альтернативой классическому статизму является концепция виртуального синхронного генератора (ВСГ), однако она требует высокой вычислительной мощности микропроцессорных устройств и кратно увеличивает токи в преобразователе в переходных режимах. К тому же данная САУ не может в полной мере удовлетворить требования российских нормативно-технических документов (НТД) [1, 5]. Поэтому разработка САУ на основе статизма по частоте является актуальной научной задачей. На текущий момент существуют исследования, в которых изучается имитационное моделирование таких САУ, но отсутствует проверка данных САУ на физическом стенде [2, 4].

Целью работы является разработка физической модели силового преобразователя с управлением на основе статизма по частоте. Физическая модель позволит верифицировать имитационные модели и исследовать режимы работы силового преобразователя.

Для построения имитационной модели был выбран комплекс *Matlab Simulink*. Была разработана структурная схема САУ, представленная на рис. 1, где входными сигналами являются уставка по частоте ($f_{\text{ном}}$) и фактическая частота сети ($f_{\text{факт}}$). Разница этих значений образует отклонение частоты (Δf), которое переводится в относительные единицы и умножается на номинальную мощность станции ($P_{\text{ном}}$). Затем полученный сигнал делится на коэффициент статизма ($k_{\text{ст}}$), определяющий крутизну статической характеристики первичного регулирования. Полученная добавочная мощность (ΔP) суммируется с уставкой по мощности преобразователя для компенсации отклонений частоты. При снижении частоты регулятор увеличивает выдаваемую мощность, а при увеличении – снижает.

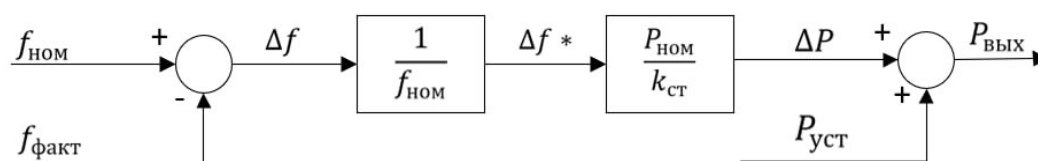


Рисунок 1 – Структурная схема САУ преобразователя со статизмом по частоте

В работе [2] была разработана имитационная модель изолированной энергосистемы, содержащая преобразователь с САУ на основе статизма по частоте. Анализ графика зависимости частоты от времени, представленный на рис. 1, показывает, что применение САУ со статизмом снижает отклонение частоты в переходном режиме по сравнению с традиционной САУ преобразователя [2]. Чем меньше

коэффициент статизма, тем быстрее преобразователь демпфирует возмущение. С традиционной САУ минимальное значение частоты в переходном режиме (f_{min}) составило 49,610 Гц (максимальное отклонение $\Delta f_{max}=0,78\%$). При настройке коэффициента статизма на типичные для турбин значения (4-6%) частота снижалась до 49,666 – 49,689 Гц. Использование технических преимуществ быстродействия преобразователя позволило установить $k_{ст}=2\%$. В этом случае f_{min} составила 49,740 Гц, а Δf_{max} снизилось до 0,52%. Таким образом, отклонение частоты было снижено на 33,3%.

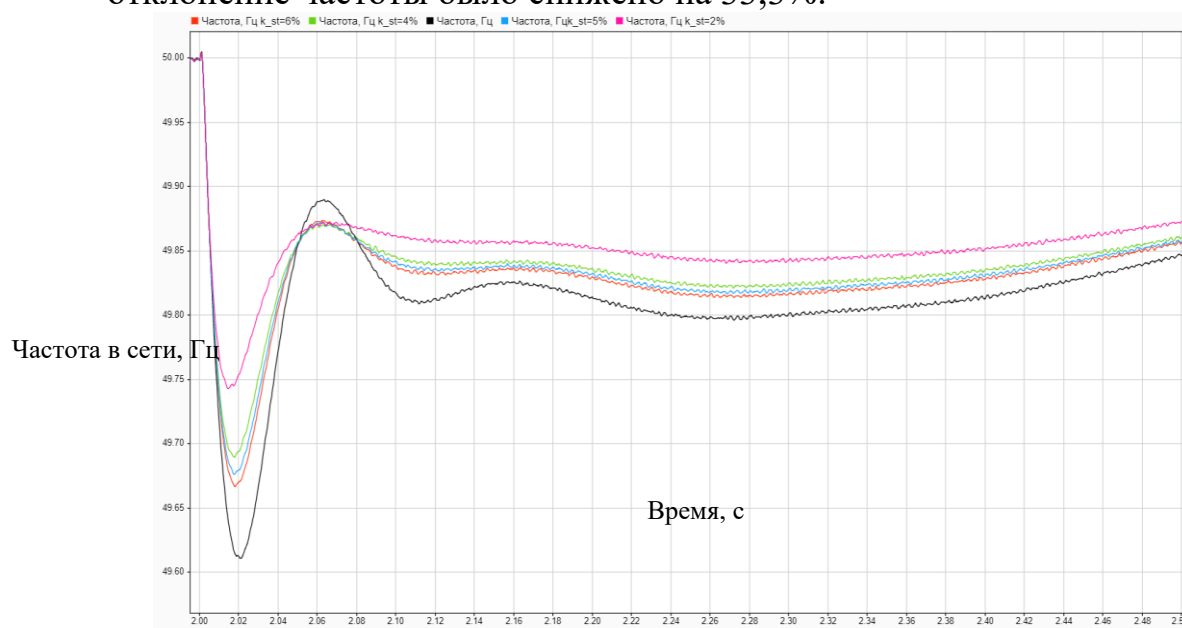


Рисунок 2 – Зависимость частоты от времени при применении разработанной САУ на основе статизма по частоте

Разработка физической модели осуществлялась в рамках создания испытательного стенда для тестирования цифровых систем управления силовыми преобразователями. Физическая модель, представленная на рис. 3, включает в себя источник постоянного тока – АКБ, суперконденсатор – СК, DC/DC-преобразователь, AC/DC-преобразователь, кабельную линию 36 В, трансформатор и измерительные блоки. Измерения токов и напряжений осуществляются с помощью АЦП на микропроцессорном блоке, на вход которого подаются аналоговые сигналы мгновенных фазных напряжений и токов. Полученные данные обрабатываются в блоке «Система управления», где формируются управляющие ШИМ-сигналы для управления IGBT-транзисторов.

В ходе физических испытаний исследовались переходные процессы при набросе и сбросе активной мощности. На полученных

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

осциллограммах проводится сопоставление работы классической, разработанной САУ и САУ с алгоритмом ВСГ. График, представленный на рис. 4, подтверждает, что переходные процессы в физической модели с различными САУ коррелирует с высокой степенью с имитационной моделью.

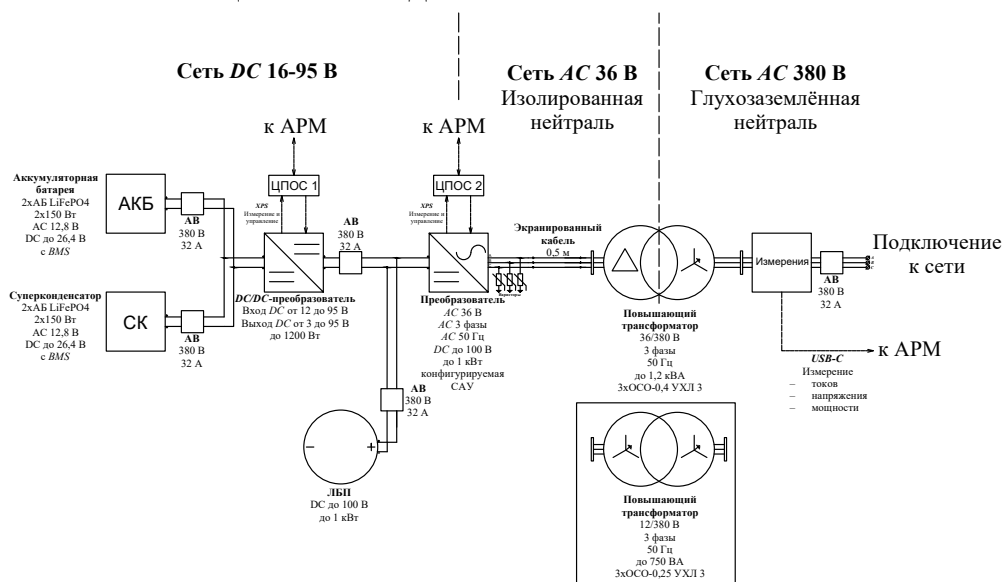


Рисунок 3 – Принципиальная схема физической модели для проверки работоспособности САУ преобразователя на основе статизма по частоте

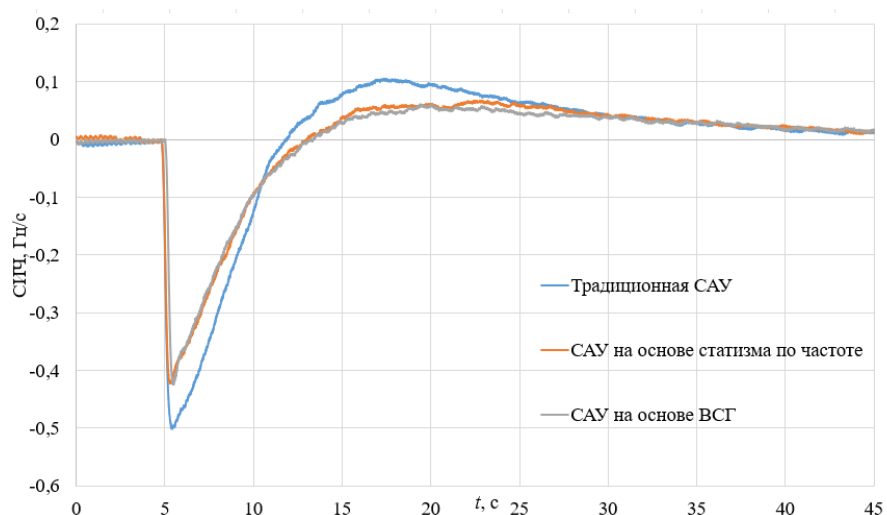


Рисунок 4 – Зависимость СИЧ в энергосистеме от времени для различных САУ при набросе активной мощности

Физическая модель позволила исследовать динамические свойства системы: изменение мощности преобразователя (P , Вт) и скорость изменения частоты (СИЧ, Гц/с). Результаты подтвердили, что предложенная САУ со статизмом по частоте снижает СИЧ на ~16% по

сравнению с традиционной САУ, при этом избегая токовых перегрузок преобразователя, характерных для САУ преобразователя на основе ВСГ.

Физическая модель учитывает реальные аппаратные ограничения: задержки на оцифровку сигналов в блоке АЦП, передачу сигналов и реальные электромагнитные процессы в модулях IGBT-транзисторов. В то время как имитационная модель оценивалась преимущественно по степени снижения частоты, физическая модель позволила на практике сравнить переходные процессы при использовании традиционной САУ, на основе статизма по частоте и ВСГ при реальных набросах и сбросах активной мощности. Обе модели подтвердили адекватность и работоспособность разработанной САУ преобразователя на основе статизма по частоте.

В результате исследования была разработана физическая модель САУ силового преобразователя со статизмом по частоте. Проведенные опыты доказали, что снижение коэффициента статизма преобразователя до 2% позволяет уменьшить максимальное отклонение частоты в сети на 33,3% при большом набросе активной мощности. Кроме того, заложена аппаратная база для физического испытательного стенда, что позволит в дальнейшем исследовать реальные электромагнитные и электромеханические переходные процессы в изолированных энергосистемах с СЭС и ВЭС.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка испытательного стенда для тестирования цифровых систем управления силовыми преобразователями с алгоритмами виртуальной инерции» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Перечень ссылок

1. ГОСТ Р 58092.3.2 – 2023. Системы накопления электрической энергии. Проектирование и оценка рабочих параметров. Применения с преимущественным использованием мощности и интеграция с возобновляемыми источниками энергии.
2. D'Arco S., Suul J.A. Equivalence of Virtual Synchronous Machines and Frequency-Droops for Converter-Based MicroGrids // IEEE Trans. Smart Grid 2014, 5, pp. 394–395.
3. Burmeyster M.V., Berdyshev I.I., Bulatov R.V., Nasyrov R.R. and Bakasova A.B. Investigation of the Influence of the Virtual Inertia System on the Stability of a PV Plant // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-7.
4. Пронина В.А., Бурмейстер М.В., Бердышев И.И., Веренцов Л.А. Разработка имитационной модели системы автоматического управления силового преобразователя со статизмом по частоте для расчета переходных процессов в изолированной энергосистеме // Инновационные перспективы Донбасса: сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – с. 73–77.
5. СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России.

УДК 621.311

РЕКОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЕНИЧЕСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

О.А. Кайфель

ФГБОУ ВО «Херсонский технический университет»

Аннотация: При износе сетей до 70% и 120–150 ч/год перебоев предложена концепция реконструкции на основе ВИЭ: солнечная генерация (30–50 МВт), ветропарк (15–25 МВт), накопители (100 МВт·ч) и Smart Grid. Ожидается рост доли ВИЭ до 65–75%, снижение потерь до 8–10% и сокращение CO₂ в ~4 раза. Реализация: 2026–2028 гг., бюджет 4,5–6 млрд руб., окупаемость 7–9 лет.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная генерация, ветроэнергетика, Smart Grid, системы накопления энергии, реконструкция электроснабжения, Генический городской округ.

Annotation: With network wear reaching up to 70% and power outages totaling 120–150 hours per year, a reconstruction concept based on renewable energy sources (RES) is proposed: solar generation (30–50 MW), a wind farm (15–25 MW), energy storage systems (100 MWh), and a Smart Grid. The expected outcomes include an increase in the RES share to 65–75%, a reduction in network losses to 8–10%, and an approximately 4-fold decrease in CO₂ emissions. Implementation timeline: 2026–2028, budget: 4.5–6 billion rubles, payback period: 7–9 years.

Keywords: renewable energy sources, solar generation, wind energy, Smart Grid, energy storage systems, power supply reconstruction, Genichesk Urban District.

Генический городской округ, расположенный на побережье Азовского моря, характеризуется высокой степенью износа традиционной электросетевой инфраструктуры. По данным предпроектного обследования, до 70% линий электропередач и трансформаторных подстанций требуют замены. Удалённость от крупных генерирующих мощностей обуславливает зависимость от внешних поставок и частые перебои в энергоснабжении. В качестве резервных источников используются устаревшие дизельные генераторы, создающие значительную экологическую нагрузку. В этих условиях реконструкция системы электроснабжения на основе

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является стратегической задачей.

Природно-климатические условия округа создают благоприятные предпосылки для развития ВИЭ. Показатель инсоляции достигает 2400–2500 солнечных часов в год, а прибрежная зона Арабатской стрелки характеризуется стабильными ветровыми нагрузками. В рамках предлагаемой концепции предусмотрено три ключевых направления. Первое — строительство сетевых и гибридных фотоэлектрических станций совокупной мощностью 30–50 МВт, включая крупные наземные станции на свободных территориях западнее города и кровельные станции на социальных объектах (больницы, школы, администрации). Для сглаживания пиковых нагрузок предусматриваются системы накопления энергии на основе Li-ion или NaS батарей ёмкостью до 100 МВт·ч.

Ожидаемые результаты реконструкции представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение показателей системы электроснабжения до и после реконструкции

Показатель	Текущее значение	После реконструкции
Доля ВИЭ в балансе	<5%	65–75%
Потери в сетях	18–22%	8–10%
Перебои в подаче (часов/год)	120–150	<20
Выбросы CO ₂ (тыс. т/год)	~45	~12

Второе направление — строительство прибрежного ветропарка в районе Арабатской стрелки мощностью 15–25 МВт. Планируется установка 5–8 турбин единичной мощностью 3–4,5 МВт со среднегодовой выработкой порядка 45–55 млн кВт·ч. Третье направление — внедрение элементов Smart Grid: автоматизированных систем управления распределением, «умных» счётчиков у всех категорий потребителей, а также балансировка нагрузки между ВИЭ и резервными газовыми поршневыми установками малой мощности.

Заключение

Проведённый анализ состояния системы электроснабжения Генического городского округа подтвердил её критический износ и высокую аварийность, что в сочетании с благоприятными природно-климатическими условиями региона

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

формирует объективную необходимость перехода к модели децентрализованной энергетики на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Предложенная в работе концепция реконструкции, включающая строительство солнечных и ветровых генерирующих объектов, внедрение систем накопления энергии и элементов Smart Grid, позволяет решить ключевые проблемы энергоснабжения территории.

Реализация проекта в запланированные сроки (2026–2028 гг.) обеспечит:

1. рост доли ВИЭ в энергобалансе округа с текущих <5% до 65–75%;
2. снижение потерь в сетях с 18–22% до 8–10%;
3. сокращение выбросов CO₂ приблизительно в 4 раза;
4. повышение надёжности электроснабжения и снижение перебоев.

Ориентировочный бюджет 4,5–6 млрд руб. и срок окупаемости 7–9 лет свидетельствуют об экономической обоснованности проекта. Таким образом, предложенная концепция может служить основой для практической модернизации энергохозяйства Генического городского округа и тиражирования данного подхода в других прибрежных муниципалитетах со схожими климатическими и инфраструктурными условиями.

Список источников

1. Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» — с изм. и доп.
2. Безруких П.П. Возобновляемая энергетика: состояние, проблемы, перспективы. — М.: Институт устойчивого развития, 2023. — с.320
3. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Электроснабжение промышленных и гражданских зданий. — М.: Академия, 2022. — с.416
4. Лямец Ю.Я., Мартьянов А.С. Smart Grid: концепция, технологии, перспективы // Электроэнергия. Передача и распределение. — 2024. — № 3. — с.22–29.
5. Оценка ветроэнергетического потенциала прибрежных зон Азовского моря / В.В. Елистратов, И.Г. Кудряшов // Альтернативная энергетика и экология. — 2023. — № 4. — с.15–24.

УДК 007.52:62-519

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБМЕНА ДАННЫМИ С ВНЕШНИМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ С ПОДДЕРЖКОЙ ФРЕЙМВОРКА ROS2

Б.А. Калиниченко, Д.В. Бажутин

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: В работе рассмотрена методика обмена данными между двумя вычислительными устройствами, находящимися в одной локальной сети, с помощью функциональных возможностей ROS2 и MATLAB. Представлены общие требования к взаимодействующим системам, особенности реализации и ограничения.

Ключевые слова: ROS2, MATLAB Simulink, передача данных, коммуникация.

Annotation: The article presents an approach for data exchange implementation between two computational devices connected to the same LAN using functions and features of ROS2 and MATLAB. The basic requirements for both devices, implementation features and limitations are discussed.

Keywords: ROS2, MATLAB Simulink, data transfer, communication

Robot Operating System 2 (ROS2) – это фреймворк с открытым исходным кодом для создания робототехнических приложений, обеспечивающий стандартизированную среду для разработки, тестирования, запуска и масштабирования программ, связанных с управлением роботами. В настоящее время данный программный модуль является стандартом разработки робототехнических систем, в особенности для учебных и исследовательских целей.

Ключевыми особенностями данного программного модуля являются:

а) широкая функциональность и расширяемость за счет возможности подключения большого количества пользовательских библиотек, написанных на языках Python и C++;

б) значительная ориентация на Linux-платформы, в особенности Ubuntu;

в) отсутствие встроенных элементов графического интерфейса, основная часть взаимодействий осуществляется через командную строку.

Наибольшие неудобства с этой точки зрения представляет отсутствие встроенных возможностей анализа, обработки и визуализации численных данных. Одновременно с этим следует отметить, что универсальным средством обработки информации в различных инженерных отраслях является программный пакет MATLAB, обладающий в том числе широкими возможностями для визуализации результатов в реальном времени. С учетом наличия в данном программном продукте модуля ROS Toolbox актуальной задачей является исследование методики реализации обмена данными между двумя устройствами, использующими различные операционные системы, с помощью функциональных возможностей фреймворка ROS2, что и является целью данной работы.

Ключевой особенностью фреймворка ROS2 является его распределенность, что выражается в автоматическом сканировании устройств в пределах локальной сети с целью установления связи с ядром ROS2, установленным на этих устройствах. В рамках такого взаимодействия осуществляется проверка принадлежности устройств определенному уровню взаимодействия ROS2, называемому доменом. При совпадении числового идентификатора домена на нескольких устройствах их ядра ROS2 устанавливают устойчивую связь, предоставляя доступ к существующим в них темам и сообщениям, как это показано на рисунке 1.

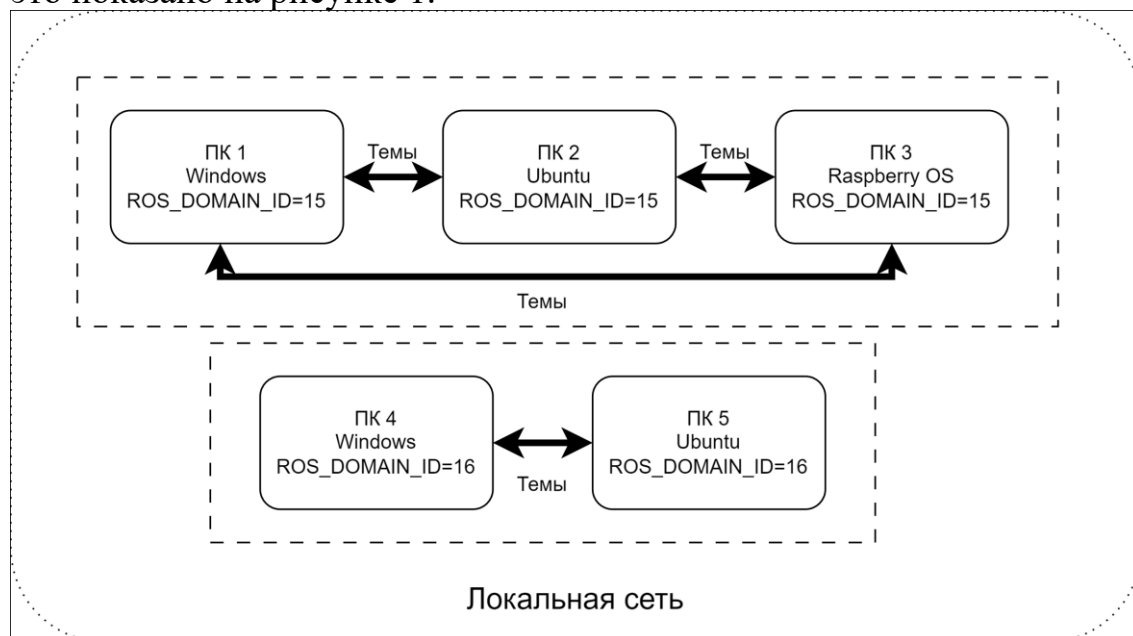


Рисунок 1 – Обмен данными между устройствами в ROS2

Соответственно, используя эту особенность можно перенести систему обработки и визуализации данных на устройство с ОС Windows и программным пакетом MATLAB, реализовав обмен

данными через локальную сеть с помощью функциональных возможностей ROS2 [1].

В качестве примера решения задачи рассмотрим простой обмен информацией между ROS2 и MATLAB в формате текстовых сообщений. Решить данную задачу можно двумя способами: при помощи скрипта и при помощи Simulink-модели. Второй способ является более предпочтительным с точки зрения визуализации результатов, поэтому остановимся на нем. В рассматриваемом примере синхронизация обмена данными происходит при обновлении информационного сообщения в теме `/ros2_to_matlab`, в результате чего активируется подсистема отправки обратного сообщения в Simulink-модели. Структура подобной системы коммуникации показана на рисунке 2.

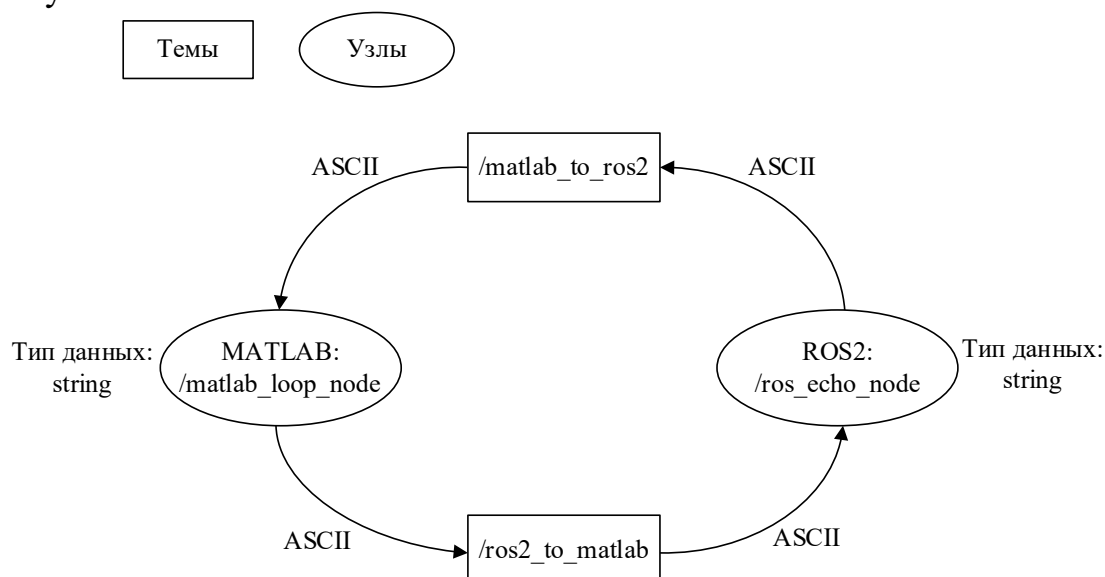


Рисунок 2 – Блок-схема передачи данных из MATLAB в ROS2 с обозначением типа данных на всех этапах

На рисунке 3 показан общий вид Simulink-модели, реализующей данный принцип. Она состоит из следующих функциональных модулей:

1. Блок «Подписчик», считывающий текстовое сообщение из темы `/ros2_to_matlab` и преобразующий его в шину данных, в данном случае текстовая строка находится в поле `data`. Для удобства отображения в модель добавлен блок преобразования текстовых данных из массива в кодировке ASCII в обычный текст.

2. Блок формирования ответного сообщения в формате «Ping N», где N – порядковый номер полученного информационного сообщения.

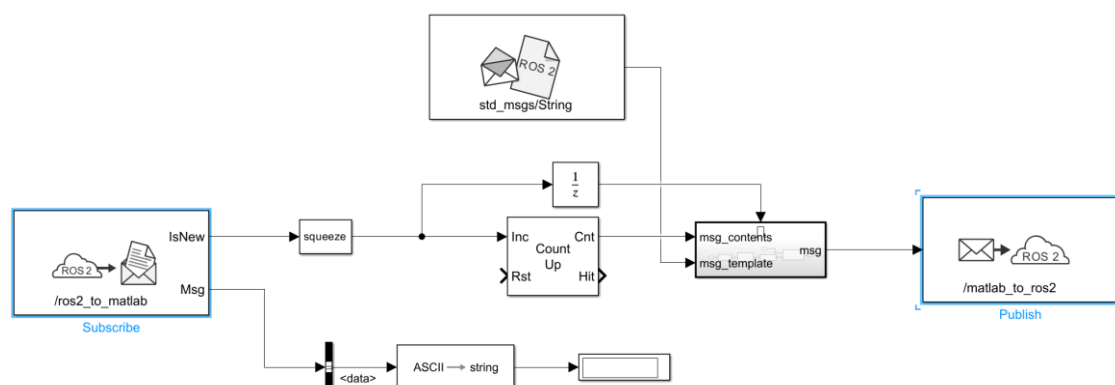


Рисунок 3 – Simulink-модель, используемая для получения и передачи данных в ROS2

3. Блок формирования ответного информационного сообщения, включающий в себя пустой шаблон сообщений типа String, в котором формируется шина данных с требуемой структурой. Также к этой части относится подсистема, записывающая текстовую строку в шаблон сообщения, внешний вид которой показан на рисунке 4.

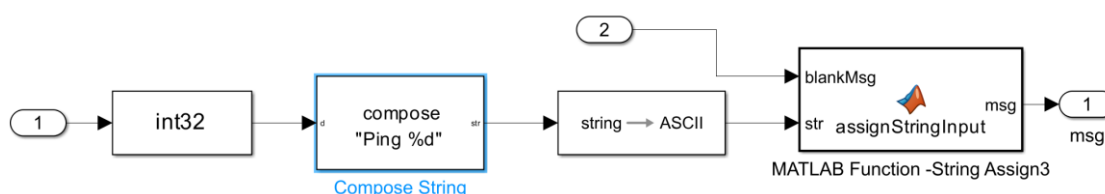


Рисунок 4 – Подсистема, используемая для форматирования вывода из MATLAB в ROS2

4. Блок «Издатель», обновляющий информационное сообщение в теме /matlab_to_ros2.

Особенностью работы данной системы является синхронизация обмена данными, которая выражается в выдаче разрешения на публикацию нового информационного сообщения только в том случае, если было зафиксировано обновление информации в теме /ros2_to_matlab. Эта синхронизация представляет собой наибольшую сложность, поскольку необходимо обеспечить однократное издание информационного сообщения, исключив буферизацию через ROS2 QoS.

Дополнительное внимание требуется уделить настройке модуля записи информации в пустой шаблон сообщений. Проще всего это сделать с помощью стандартной MATLAB-функции, в тексте кода которой записывается присваивание новых значений всех полей

информационного сообщения. Особенностью такого подхода является используемый данным блоком формат входных и выходных сигналов, который по умолчанию считается обычным массивом, а коммуникация с ROS2 требует использования специальных шин данных. Для обеспечения совпадения форматов данных в свойствах блока Matlab Function необходимо указать используемый формат для входных и выходных портов, используемых в формировании сообщения.

Таким образом, описанная в рамках данной работы методика позволяет расширить функциональные возможности ROS2 с точки зрения обработки и визуализации сигналов.

Перечень ссылок

1. Примеры работы с различными типами сообщений ROS2 [Электронный ресурс]: Work with ROS 2 Messages in Simulink URL: <https://www.mathworks.com/help/ros/ug/work-with-ros2-messages-in-simulink.html>.

УДК 681.5:620.9

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В АСУ ТП: СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ

М. В. Канчукова

ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР

Аннотация: Проанализированы энергосберегающие технологии, встраиваемые в современные АСУ ТП. Определены три главные тенденции развития АСУ ТП, как носителя энергосберегающих функций. Приведены примеры внедрения энергосберегающих технологий на производстве.

Annotation: The energy-saving technologies embedded in modern automated process control systems are analyzed. Three main trends in the development of automated process control systems as a carrier of energy-saving functions have been identified. Examples of the introduction of energy-saving technologies in production are given.

Ключевые слова: автоматизация, энергосбережение, частотно-регулируемый электропривод, SCADA-система, каскадное регулирование, прогнозирование энергопотребления, оптимизация технологических процессов.

Keywords: automation, energy saving, frequency-controlled electric drive, SCADA system, cascade control, forecasting of energy consumption, optimization of technological processes.

На протяжении последних двух десятилетий производственные компании работают в условиях жесткого давления, требующего сокращения ресурсозатрат в пересчете на единицу выпускаемой продукции. Традиционные подходы к экономии — например, замена осветительных приборов на LED-аналоги или повышение теплозащиты зданий — уже практически исчерпали свой потенциал. Сегодня основной резерв скрывается в другом: в тонкой настройке самих технологических циклов, а это напрямую связано с их автоматизацией.

АСУ ТП, которые раньше лишь поддерживали технологические параметры в заданных границах, теперь берут на себя активную роль в управлении энергоресурсами. Современный программируемый контроллер — это уже не просто устройство, включающее или отключающее электродвигатель. Он сам решает, когда именно запуск будет наименее затратным, адаптирует скорость вращения под

фактическую механическую нагрузку и даже способен предсказывать моменты резких скачков потребления.

Обзор текущих решений: что реально применяется в цехах

Анализ работы промышленных объектов, где уже проведена модернизация, позволяет выделить три типа технологий энергосбережения, наиболее проработанных в составе современных АСУ ТП.

1. Привод с регулированием частоты вращения и замкнутым контуром обратной связи. Насосное, вентиляторное и компрессорное оборудование, которое раньше регулировалось дросселями или заслонками, после перехода на преобразователи частоты (ПЧ) начинает потреблять на 30–50% меньше электроэнергии. Причем ПЧ подключается к верхней системе управления через цифровую шину (например, Profibus, Modbus TCP или EtherCAT) и получает от нее задания.

2. Автоматизированные системы, считающие ресурсы (АСУЭ). Они строятся на базе счетчиков с цифровыми выходными интерфейсами (Modbus или M-Bus) и локальных контроллеров, которые собирают данные. Задача такой системы — не просто фиксировать расходы, а привязывать их к конкретному технологическому режиму, выпускаемой номенклатуре или даже к смене, которую отработал оператор

3. Согласованное управление освещением и климатическими системами с основным оборудованием. Речь совсем не про обычные датчики движения из магазина бытовой электроники. Имеется в виду глубокая интеграция в общую АСУ ТП. Например, если конвейер останавливается, контроллер не просто выключает свет над этой линией, но и отправляет сигнал в систему вентиляции, которая снижает интенсивность воздухообмена на данном участке. Практика показывает, что такие решения дают экономию в пределах 10–20%, причем требуют в основном лишь перепрограммирования — дополнительных затрат на «железо» почти нет [1].

Рассмотрим реальный проект по обновлению системы управления.

Объект — насосная станция, подающая техническую воду на охлаждение реакторов. Исходно станция управлялась вручную. Переход на автоматизированное управление в данном случае оказался крайне эффективным способом сбережения ресурсов, позволив снизить электропотребление, поднять эффективность и увеличить срок службы агрегатов.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Раньше оператор включал два из трех насосов и время от времени подкручивал задвижку на выходном патрубке. В результате на перекачку одного кубометра воды уходило 0,52 киловатт-часа.

В ходе модернизации выполнили:

- оснастили все три насоса (каждый мощностью 45 кВт) преобразователями частоты;
- установили измерители давления на общем коллекторе и расходомеры на каждой технологической ветке.

На базе контроллера Siemens S7-1200 реализовали каскадный алгоритм: по сигналу давления задается частота ведущего насоса, и если она достигает 50 Гц, в работу подключается следующий агрегат.

На SCADA (в WinCC) добавили прогнозирующий блок. Он анализирует заранее известный график работы реакторов (когда какой аппарат выходит на заданный тепловой режим) и за полчаса до этого начинает плавно повышать давление, не допуская провалов. Сравнение показателей до и после модернизации приведено в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнительная эффективность работы насосной станции

Параметр	До автоматизации	После (АСУ ТП + ПЧ)
Энергопотребление на 1000 м ³	520 кВт·ч	310 кВт·ч
Отказы по давлению	2 раза в месяц	0 раз за 6 месяцев
Износ насосов (по наработке)	100% (база)	снижение на 37%

Как результат выполненной модернизации, годовая экономия превысила 480 тысяч киловатт-часов. [2].

Другой показательный случай — внедрение интеллектуального управления на агрегате термообработки. Речь идет о печи для нагрева металлических заготовок, принадлежащей заводу «Красный октябрь» (компания «МеталлСервис»). В печи имеются три независимые зоны нагрева, каждая оснащена термопарами и тиристорными регуляторами.

Исходная ситуация: каждая зона управлялась своим собственным ПИД-регулятором, который следил только за локальной температурой. Из-за этого постоянно случались местные перегревы (до +30°C относительно уставки). Операторам приходилось вручную повышать общую подачу газа на 18%, чтобы скомпенсировать эти эффекты.

Решение: спроектировали систему каскадного управления с коррекцией по тепловому потоку. Верхний уровень — алгоритм, работающий внутри SCADA. Он вычисляет, какой тепловой баланс

нужен всей печи, основываясь на производительности (сколько заготовок проходит в час). Затем алгоритм распределяет задания между зонами так, чтобы разность температур между соседними зонами не превышала 10°C. Нижние уровни — локальные ПИД-контроллеры (на базе ПЛК Delta), которые уже отрабатывают скорректированные уставки.

Энергия здесь сберегается благодаря блоку, ограничивающему скорость изменения задания. Раньше все три зоны могли одновременно выйти на максимум, вызывая кратковременные скачки расхода газа на 40% выше среднего. Теперь этого нет.

Результаты модернизации: средний расход газа на тонну заготовок упал с 72 до 58 кубометров; пиковая тепловая мощность снизилась с 2,3 до 1,9 МВт; разброс температуры по длине заготовки сократился с $\pm 15^\circ\text{C}$ до $\pm 4^\circ\text{C}$, что попутно снизило брак с 5% до 1,2% [3].

Анализ текущих тенденций позволяет спрогнозировать три направления, которые кардинально изменят роль АСУ ТП в вопросах энергосбережения.

1. Массовое распространение беспроводных сенсорных сетей (WSN). Сейчас сбор детальных данных о расходе энергии на уровне отдельных станков или узлов внутри агрегата затруднен из-за отсутствия кабельных трасс. Беспроводные датчики тока и вибрации, работающие по протоколам Wireless HART или ISA100.11a, скоро позволят мониторить буквально каждую единицу оборудования. Ожидается, что стоимость одной точки измерения упадет в 3–4 раза, а количество замеров на один агрегат возрастет с 1–3 до 10–15. Для АСУ ТП это означает переход от управления по усредненным показателям к точной локальной оптимизации.

2. Использование алгоритмов машинного обучения в задачах прогнозного управления энергопотреблением. Классические ПИД-регуляторы и даже каскадные схемы «не умеют» заглядывать вперед. Будущие АСУ ТП будут содержать нейросетевые блоки, которые обучают на исторических данных потребления и на внешних факторах (температура воздуха за окном, курс валют — он влияет на загрузку производства). Такой блок выдает рекомендуемую траекторию изменения уставок на ближайшие часы (2–4 часа), а оператор или верхняя система управления утверждает ее. На объектах нефтехимии, где такие подходы уже опробованы, получают дополнительную экономию в 8–12% сверх того, что дает обычная автоматизация.

3. Отказ от жесткого графика планово-предупредительных ремонтов в пользу обслуживания по фактическому энергосостоянию. Система, основываясь на данных контроллера, сама определяет момент

для профилактики, ориентируясь на рост тока (признак увеличения трения) или снижение $\cos \varphi$. Вместо того, чтобы останавливать оборудование раз в месяц (что вызывает простои и перерасход энергии при пусках), ремонт проводится ровно тогда, когда он действительно нужен [4].

Выводы

Сегодня энергосбережение перестало быть самостоятельной, отдельно решаемой задачей. Оно становится естественным свойством грамотно спроектированной системы автоматизации. Если АСУ ТП выстроена правильно, ей не нужен специальный режим «энергосбережение» — она в принципе не позволяет процессу работать неэффективно.

Оба приведенных примера — и насосная станция с прогнозирующим блоком, и печь с каскадным регулированием — доказывают простую вещь: для реальной экономии не требуются прорывные научно-технические чудеса. Достаточно разумно связать уже имеющиеся средства автоматизации единой логикой, которая учитывает не только текущий режим, но и его последствия для энергобаланса. Ближайшая перспектива — это переход от реактивной оптимизации (отвечающей на уже возникшее отклонение) к предиктивной (меняющей режим работы еще до того, как отклонение произошло). Именно эта задача и становится ключевой для систем автоматизации следующего поколения.

Перечень ссылок

1. Афонин, А. М. Энергосберегающие технологии в промышленности: учебное пособие / А. М. Афонин, Ю. Н. Царегородцев, А. М. Петрова, С. А. Петрова. — 2-е изд. — Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2025. — 271 с. — ISBN 978-5-00091-805-0.
2. Майнич, В.П., Самодельников, Б.Т. Модернизация системы надежного водоснабжения Кольской АЭС в целях продления срока эксплуатации [Текст] / В.П. Майнич, Б.Т. Самодельников // «Атомная энергетика, 2006. — Вып. 3, том 100. — С. 173-178. — URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t100-3_2006/p173/.
3. На «Красном октябре» готовят к запуску новое оборудование [Электронный текст] / Электронный сайт компании МеталлСервис. — URL: https://mc.ru/news/nw/news_id/16163.
4. Волков, Д. В. Энергосбережение средствами электропривода и автоматики: учебное пособие / Д. В. Волков. — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2025. — Режим доступа: по подписке. — URL: <https://www.iprbookshop.ru> / (дата обращения: 04.05.2026).

УДК 004.896

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СЛЕДОВАНИЯ ЗА ОБЪЕКТОМ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

В.В. Касиянчук, Д.В. Бажутин

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: В работе рассмотрена разработка алгоритма управления мобильным роботом, обеспечивающего следование за движущимся объектом. Описаны особенности программной реализации разработанного алгоритма, приведены основные математические зависимости, обеспечивающие центрирование камеры робота на определенном объекте, а также движение робота с целью поддержания постоянного расстояния до этого объекта.

Ключевые слова: компьютерное зрение, мобильный робот, распознавание объектов, следящее управление

Annotation: The article presents a mobile robot control algorithm design that ensured tracking of a moving object. The main features of algorithm's software implementation are discussed, the important mathematical expression required to center the camera on detected object and follow it at a specified distance are given.

Keywords: computer vision, mobile robot, object detection, tracking motion control

Современные технологии компьютерного зрения и искусственного интеллекта активно применяются в робототехнических системах для автоматизации процессов навигации, сопровождения объектов и анализа окружающей среды. Одним из перспективных направлений является создание мобильных роботов, способных распознавать человека и сопровождать его в режиме реального времени.

Целью данной работы является разработка системы автоматического сопровождения человека на базе роботизированной платформы Robomaster EP с использованием алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения.

В рамках данной работы рассматривается алгоритм управления мобильным роботом, в котором решаются задачи получения изображения с камеры, обнаружения человека, определения его положение в кадре и автоматического управления движением шасси для сопровождения пользователя.

Разработанная система представляет собой мобильного робота, оснащённого камерой и системой интеллектуального управления с возможностью подключения и получения информации по протоколу беспроводной связи.

Основная задача, реализуемая в рамках данной работы, заключается в автоматическом сопровождении человека. Робот должен:

- обнаруживать человека в кадре;
- определять целевого пользователя;
- отслеживать положение объекта;
- поддерживать дистанцию;
- автоматически корректировать направление движения.

Программная часть проекта реализована на языке Python с использованием технологий компьютерного зрения и библиотек машинного обучения.

В качестве аппаратной платформы используется RoboMaster EP [1]. Данное устройство оснащено камерой, изображение с которой передается на устройство обработки изображения по беспроводному протоколу. Управление движением устройства осуществляется за счет колесного шасси всенаправленного движения с меканум-колесами, а также регулируемой двухосевой системой позиционирования камеры, движение которой может осуществляться как отдельно, так и с жесткой привязкой к движению шасси. Реализация алгоритма управления осуществляется с помощью библиотеки Robomaster SDK.

Захват и обработки изображения с камеры осуществляется средствами библиотеки OpenCV по следующему алгоритму:

- получение изображения с камеры;
- обработка кадров и передача их в модуль распознавания;
- получение результатов распознавания и их отображение в кадре;
- построение ограничивающих рамок объектов.

Обнаружение объектов реализуется с помощью сверточной нейронной сети YOLOv8 [2], в частности выполняется поиск человека в кадре. Данная нейронная сеть анализирует изображение и определяет границ области в кадре, в которой с наибольшей уверенностью находится человек. Эти данные являются основой для построения ограничивающего прямоугольника вокруг человека.

Особенностью разрабатываемого алгоритма является возможность выделения определенного человека в кадре с целью реализации следования за ним, что реализуется с помощью алгоритма DeepSort [3]. Данный алгоритм присваивает каждому человеку уникальный идентификатор (ID), благодаря чему робот способен сопровождать конкретного пользователя даже при наличии нескольких

людей в кадре.

Для уточнения результатов распознавания используется модуль Torchreid [4], который анализирует признаки одежды пользователя и сравнивает их с заранее сохранёнными фотографиями. Это позволяет роботу точнее определить нужного человека и сопровождать именно его.

Сопровождение осуществляется путем центрирования изображения на определенном человеке за счет поворота и перемещения шасси при неподвижном механизме позиционирования камеры. После обнаружения человека вычисляется центр объекта в кадре:

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2}$$

где:

x_1 — левая граница объекта;

x_2 — правая граница объекта.

Ошибка центрирования определяется как разница между центром объекта и центром кадра:

$$e = x_c - x_{frame}$$

где:

e — ошибка положения;

x_c — центр человека;

x_{frame} — центр изображения.

Скорость поворота шасси вычисляется пропорционально ошибке:

$$z = K_p \cdot e$$

где:

K_p — коэффициент поворота;

e — ошибка положения;

z — скорость вращения шасси.

Размер человека в кадре используется для оценки расстояния до пользователя. Следует отметить, что корректность определения расстояния визуальным методом в значительной степени зависит от оптических свойств камеры, а также от угла наклона ее оси к плоскости движения. Для повышения точности требуется провести предварительную калибровку системы при выбранном положении камеры. Ошибка дистанции вычисляется следующим образом:

$$e_d = H_t - H$$

где:

H_t — требуемая высота объекта;

H — текущая высота объекта.

Скорость движения вперёд определяется формулой:

$$v = K_f \cdot e_d$$

где:

K_f — коэффициент движения;

v — скорость движения робота.

Для сравнения признаков изображения используется косинусное сходство:

$$S = \frac{A \cdot B}{\|A\| \cdot \|B\|}$$

где:

- A и B — векторы признаков изображения.

Если значение сходства превышает установленный порог, система определяет пользователя как целевого объекта сопровождения.

Работа системы осуществляется в режиме реального времени. Камера робота непрерывно передаёт изображение в алгоритм компьютерного зрения. Модель YOLOv8 выполняет обнаружение человека в кадре. После этого алгоритм DeepSort присваивает объекту уникальный идентификатор и выполняет отслеживание движения пользователя. Далее библиотека Torchreid анализирует признаки одежды человека и выполняет идентификацию пользователя.

При смещении человека относительно центра изображения вычисляется ошибка положения. На основе этой ошибки система формирует команды управления шасси робота через Robomaster SDK. Если пользователь удаляется от робота, система увеличивает скорость движения вперёд. При приближении пользователя робот замедляется или отъезжает назад. В случае потери объекта система автоматически останавливает движение и выполняет сброс идентификатора цели. Пример работы описанного алгоритма показан на рисунке 1.

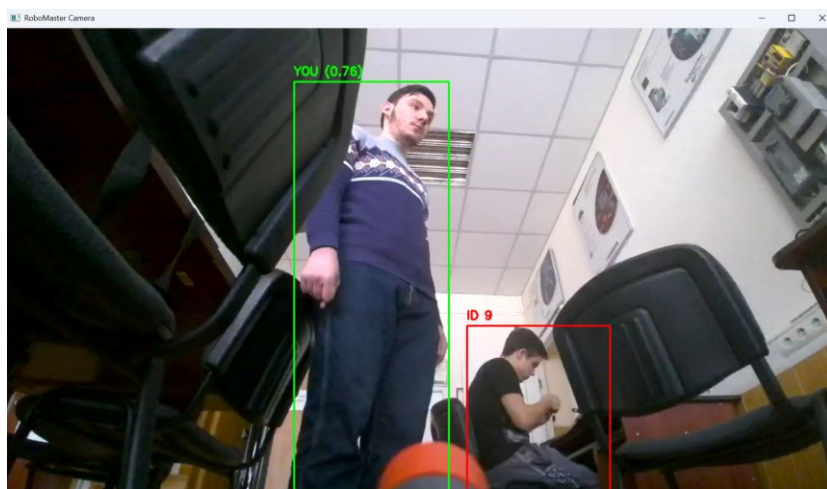


Рисунок 1 – Результат работы следования за целью с помощью
технического зрения

Выводы

В ходе выполнения проекта была разработана система автоматического сопровождения человека на базе роботизированной платформы RoboMaster EP. В процессе работы были изучены технологии компьютерного зрения, методы обнаружения и отслеживания объектов, а также алгоритмы управления мобильными роботизированными системами.

Использование библиотек OpenCV, YOLOv8, DeepSort и Torchreid позволило реализовать устойчивую систему сопровождения человека в режиме реального времени.

Разработанное решение может использоваться для дальнейших исследований в области робототехники, автономной навигации и интеллектуальных систем управления.

Перечень ссылок

1. Robomaster EP [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dji-rus.ru/robomaster-ep/robomaster-ep/>
2. YOLO8 Docs [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://yolov8.com/?ref=keymakr.com>
3. DeepSORT algorithm [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://codezup.com/real-time-object-tracking-deepsort-opencv/>
4. Torchreid description [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/KaiyangZhou/deep-person-reid>

УДК 620.97

**ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
САМОНЕСУЩЕГО ПРОВОДА МИПг-5 3х2,5-10 кВ В
СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ.**

Н.А. Корнев, Я.А. Воронин, И.А. Баннов, М.В. Бурмейстер,
Р.В. Булатов

ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ» г. Донецк, Россия

Аннотация: В работе рассмотрена проблема низкой пожаробезопасности и надежности в сельских распределительных сетях 6-10 кВ. Рассмотрена совместная работа провода МИПг-5 с предохранителем-разъединителем выхлопного типа ПРВТ-10. Выполнен анализ состояния сельских воздушных линий, исследованы причины аварийности, проведен расчет габаритного пролета в различных климатических районах.

Ключевые слова: пожаробезопасность, МИПг-5, сельские сети, габаритный пролет, ПРВТ-10.

Annotation: The paper addresses the problem of low fire safety and reliability in rural 6–10 kV. The coordinated operation of the self-supporting insulated cable MIPg-5 with an expulsion-type fuse disconnecting switch PRVT-10 is considered, and the permissible power ranges of branch lines are determined. An analysis of the current condition of rural overhead lines is carried out, the main causes of failures are investigated, and the span length is calculated for various climatic regions.

Keywords: fire safety, MIPg 5, rural power grid, span length, PRVT 10.

Распределительные электрические сети напряжением 6-10 кВ, используемые для электроснабжения сельских районов, характеризуются значительной протяженностью линий, большим количеством ответвлений и часто эксплуатируются в условиях повышенного воздействия окружающей среды. Значительная часть сетей построена с использованием неизолированных проводов типа А и АС, что повышает вероятность аварийных ситуаций, связанных с короткими замыканиями, обрывами проводов и воздействием растительности. [3]

В связи с данной проблемой актуальной задачей является внедрение инновационных кабельных систем, таких как МИПг-5. Однако использование требует дополнительного анализа с точки зрения электрических режимов сети, величины токов КЗ, допустимых габаритных пролетов и экономической эффективности.

В настоящее время основным способом повышения надежности

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

воздушных линий 6-10 кВ является переход на защищенные провода типа СИП. Однако СИП имеет ограничения по механической прочности и не всегда позволяет значительно увеличить габаритные пролеты.

МИПг-5, разработанный ООО «КЗ «Эксперт-Кабель» совместно с НИУ «МЭИ», обладает усиленной медно-стальной жилой 4 класса гибкости, трехслойной ЭПР изоляцией и негорючей оболочкой из ТЭП. Механическая прочность на разрыв составляет более 2,5 тонн, что позволяет существенно увеличить пролет по сравнению с АС-35, АС-70.

Установка ПРВТ-10 в конце каждого ответвления обеспечивает видимый разрыв и селективное отключение поврежденного участка без отключения всего фидера, что является преимуществом перед автоматическим выключателем, требующих значительных капитальных затрат.

Объектом исследования является реальная распределительная сеть 10 кВ. Схема представляет собой радиально-разветвленную линий с одним выключателем Q на вводе трансформатора ТР 35/10. Магистраль выполнена проводом АС-35, ответвления – также АС 35 различной длины. Общая длина фидера составляет 12,5 км, с количеством опор – 204 шт. Количество трансформаторных подстанций 7 с общей установленной мощностью – 566 кВА.

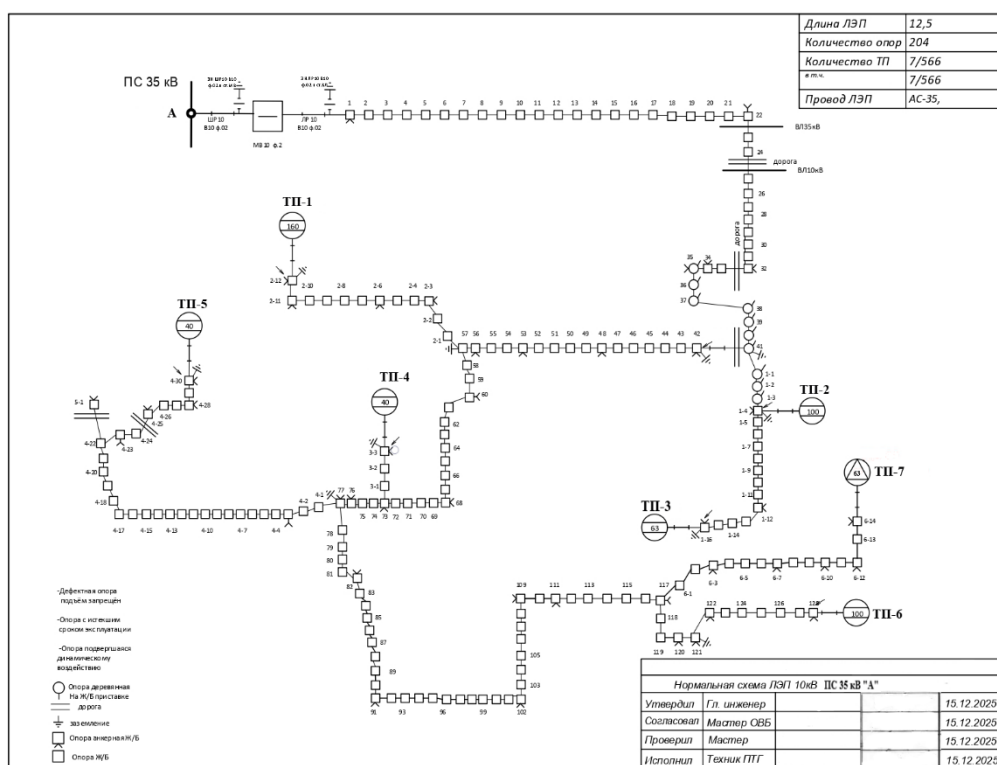


Рисунок 1 - нормальная схема исследуемого фидера

Перспективы развития электротехнических, электрохимических и энергосберегающих систем

Исследование проводится для I-III районов по гололеду и I-V районов по ветру согласно ПУЭ 7-го издания [1], в котором расчет климатических нагрузок выполняется на основе нормативных значений, определяемых с повторяемостью 1 раза в 25 лет.

С полным расчетом габаритного пролета можно ознакомиться [2]
Таблица 1 - Значения габаритного пролета провода МИПг 5 3×2,5-10кВ-3,4 на опорах высотой 8,5 м в ненаселенных местностях для среднегодовой температуры от минус -10 до +10 °С

$l_{\text{габ}}, \text{м}$					
Район по ветру Район по гололеду					
	I	II	III	IV	V
Среднегодовая температура $\theta_{\text{сг}} = -10^\circ\text{C}$					
I	114,68	114,68	114,68	100,89	99,84
II	98,8	98,2	97,63	96,89	96,14
III	78,9	78,6	78,3	77,85	77,37
Среднегодовая температура $\theta_{\text{сг}} = 0^\circ\text{C}$					
I	115,20	115,20	101,47	100,89	99,84
II	98,8	98,2	97,63	96,89	96,14
III	78,9	78,6	78,3	77,85	77,37
Среднегодовая температура $\theta_{\text{сг}} = +10^\circ\text{C}$					
I	102,21	101,93	101,47	100,89	99,84
II	98,8	98,2	97,63	96,89	96,14
III	78,9	78,6	78,3	77,85	77,37

Результаты расчетов показывают, что при использовании в сельских сетях напряжением 10 кВ, самонесущего провода МИПг 5 3х2,5, можно существенно увеличить габаритный пролет, в сравнение со стандартным АС-35, увеличение составляет от 66% до 91%.

Для ненаселенной местности для высоты опоры 8,5м длина габаритного пролета варьируются в пределах от 115,20 м в I гололедном и I ветровом при среднегодовой температуре 0 °С и до 77,37 м в III гололедном районе и V ветровом при любой среднегодовой температуре.

В труднодоступной местности длина габаритного пролета значительно возрастает и варьируется в пределах от 138,39 м в I гололедном и I ветровом при среднегодовой температуре 0 °С и до 92,42 м в III гололедном районе и V ветровом при любой среднегодовой температуре.

Таким образом, для сооружения воздушной линии длиной 1 км потребуется от 7 до 9 опор при высоте опоры 8,5 м в зависимости от климатических условий региона.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Так как МИПг-5 является изолированным самонесущим проводом с трехслойной ЭПР изоляцией толщиной 4,6 мм позволяет исключить наиболее распространенные виды повреждений характерных для ВЛ с неизолированными проводами.

Для остаточной аварийности в качестве защиты предусмотрена установка предохранителя ПРВТ-10 на ответвлениях, обеспечивающая селективное отключение поврежденного участка. Ниже приведены расчеты коэффициента чувствительности, тока двухфазного КЗ на ответвлении и с помощью ВТХ было выбрано время срабатывания ПРВТ-10.

Таблица 2 – результаты расчетов $k_{\text{ч}}$ и время срабатывания ПРВТ-10 для $S_{\text{КТП}} = 63$ кВА

Длина ответвлений, км	$I_{\text{кз}}^{(2)}, \text{A}$	$k_{\text{ч}}$	Время срабатывания, с
1	500	62,5	0,01
2	278	34,75	0,01
3	192	24	0,02
5	119	14,87	0,03
7	86	10,75	0,18
10	61	7,6	0,4

Как видно из таблицы 2 ПРВТ-10 отключит КЗ на ответвлении до 10 км менее чем за 0,5 секунд.

Таблица 3 – результаты расчетов $k_{\text{ч}}$ и время срабатывания ПРВТ-10 для $S_{\text{КТП}} = 100$ кВА

Длина ответвлений, км	$I_{\text{кз}}^{(2)}, \text{A}$	$k_{\text{ч}}$	Время срабатывания, с
1	500	31,25	0,01
2	278	17,37	0,05
3	192	12	0,1
5	119	7,43	0,5
7	86	5,3	1,2
10	61	3,81	5

Как видно из таблицы 3 ПРВТ-10 отключит КЗ на ответвлении до 7 км не менее чем за 1 секунд, для 10 км время слишком большое.

Таблица 4 – результаты расчетов $k_{\text{ч}}$ и время срабатывания ПРВТ-10 для $S_{\text{КТП}} = 160$ кВА

Длина ответвлений, км	$I_{\text{кз}}^{(2)}, \text{A}$	$k_{\text{ч}}$	Время срабатывания, с
1	500	15,87	0,05
2	278	8,82	0,25
3	192	6,0	0,7
5	119	3,7	4
7	86	2,7	12

Как видно из таблицы 4 ПРВТ-10 отключит КЗ на ответвлении до 3 км менее чем за 1 секунд, для 5-7 км время слишком большое.

Исходя из приведенных таблиц выше можно четко обозначить границы применения связки МИПг-5 и ПРВТ-10:

1) При мощности КТП 63 кВА (вставка 8 А) - максимальная длина ответвлений может доходить до 10 км

2) При мощности КТП 100 кВ (вставка 16 А) – максимальная длина ответвления 7 км. Определяющий фактор коэффициент чувствительности.

3) При мощности КТП 160 кВА (вставка 31,5) – максимальная длина ответвления составляет 4 км. Определяющие факторы – время срабатывания защиты и ее чувствительность. Так как расчет проведен без учета коэффициента спроса в действительности плавкая вставка предохранителя меньше, чем результаты, приведенные выше.

Наиболее оптимальные диапазон: мощность КТП от 25-100 кВА с длиной до 5 км – при данных условиях будет обеспечиваться быстрое отключение и высокая чувствительность защиты. При мощности КТП свыше 160 кВА сечение провода МИПг-5 3х2,5-10 кВ недостаточно как по условиям защиты, так и по допустимому току нагрева.

Для экономической целесообразности применения самонесущего провода МИПг-5 3х2,5 на ответвлениях в сельских распределительных сетях 10 кВ был выполнен укрупненный сравнительный расчет капитальных затрат для строительства типового ответвления в двух вариантах:

Вариант первый: ВЛ с неизолированным проводом АС-35 на железобетонных опорах с пролетом 60 м. Вариант второй: ВЛ с самонесущим изолированным проводом МИПг-5 3х2,5

При расчете были приняты следующие основные допущения и упрощения:

1) Стоимость материалов и оборудования принята по средним рыночным ценам на 2024-2025 годы на основе открытых данных производителей.

2) Стоимость монтажных работ была исключена из расчета, так как возникает сложность расчета цены.

3) В обоих условиях были приняты одинаковые типы опор, одинаковая категория сложности монтажа

4) Расчет выполнен для тупикового ответвления длиной 1 км, питающего одну КТП мощностью 100 кВА

Также стоит отметить, что для МИПг-5 ведутся разработки натяжных, поддерживающих зажимов, поэтому в расчете были приняты значения цен, относящихся к изолированным проводам.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Таблица 5- Сводная таблица данных

Затраты	АС – 35, руб.	МИПг-5, руб.
Провод	150 000	325 000
Опора с установкой	510 000	330 000
Линейная арматуры	83 300	26 800
ПРВТ-10	0	103 000
Устройство охранной зоны	80 000	40 000
ИТОГ	823 300	824 800

Разница капитальных затрат составила менее 0,2 %. Однако, данный расчет не учитывает потери на электроэнергию, недоотпуск электроэнергии за счет отключения всего фидера, снижение количества и времени выезда оперативной бригады.

Проведенное исследование подтверждает технико-экономическую целесообразность внедрения связки самонесущего кабеля МИПг-5 3х2,5 и ПРВТ-10. Реализация данного решения позволяет увеличить габаритный пролет до 98 м и обеспечить селективность защиты при авариях, повышая пожаробезопасность и надежность сети при сохранении уровня капитальных затрат.

Перечень ссылок

1. Правила устройства электроустановок. Разд. 2. Передача электроэнергии. Гл. 2.4., 2.5 : утв. Министерством энергетики Российской Федерации 20.05.03 : введены в действие с 01.10.03 / Министерство энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М. : ЭНАС, 2004. – 160 с.
2. Зарудский, Г.К. Механический расчет проводов, тросов и изоляторов воздушных линий электропередачи / Г. К. Зарудский, И. А. Платонова // М.: МЭИ. — 2013. — 205 с.
3. Глыбина Ю.Н., Беликов Р.П., Фомин И. Н. Анализ видов и количества повреждений в электрических сетях класса напряжения 6-10 кВ. // УДК 621.316.011.719:621.3.027.6¹⁰ кВ (470.319)- 2017. – 45 с.

УДК 621.311

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

А.А. Булгаков, Д. В. Костюк, Э. Г. Куренный
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

Аннотация: Рассмотрена вероятностная модель полной мощности в системах электроснабжения при несимметрии и несинусоидальности, которая помимо активной и реактивной составляющих, содержит мощность пульсации и мощность искажения. Для составляющих полной мощности приняты нормальные законы распределения и задана система корреляционных связей. По результатам статистического моделирования получен закон распределения полной мощности, и выполнена проверка согласия по критериям Колмогорова и Пирсона.

Ключевые слова: полная мощность, несимметрия, несинусоидальность, вероятностное моделирование.

Annotation: The paper considers a probabilistic model of full power in power supply systems with asymmetry and non-sinusoidal voltage, which, in addition to the active and reactive components, includes ripple power and distortion power. For the components of full power, a normal distribution is assumed, and a system of correlations is also set. Based on the results of statistical modeling, the law of full power distribution is obtained, and the Kolmogorov-Smirnov and Pearson tests are used to verify agreement.

Keywords: full power, unbalance, non-sinusoidal voltage, probabilistic modeling

Постановка задачи. Проблема определения неактивных составляющих полной мощности сохраняет актуальность для систем электроснабжения с несимметричными и несинусоидальными режимами. Нормативные документы не дают однозначных определений этим составляющим, поэтому для анализа целесообразно использовать вероятностный подход, позволяющий описывать разброс параметров и учитывать статистическую связанность между ними [1]. В работе используется модель действительной полной мощности по Р. Дрехслеру [2], в которой полная мощность определяется как

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + N_2^2}, \quad (1)$$

где P – активная мощность, Q – реактивная мощность, D – мощность искажения, N_2 – мощность пульсации, обусловленная несимметрией нагрузки.

Вероятностная модель. На характер изменения нагрузки в системе электроснабжения может влиять большое количество случайных факторов, поэтому составляющие полной мощности в принятой модели рассматриваются как случайные величины с нормальным распределением [3]. В модели заданы следующие средние значения и среднеквадратичные отклонения: $P_c = 10$ МВт, $Q_c = 3$ Мвар, $D_c = 3$ Мвар, $N_{2c} = 3$ Мвар; $\sigma_P = 0,5$ МВт, $\sigma_Q = 0,3$ Мвар, $\sigma_D = 0,15$ Мвар, $\sigma_{N_2} = 0,15$ Мвар. Для описания взаимосвязей между составляющими задана корреляционная матрица с корреляционными коэффициентами: $r_{PQ} = 0,95$, $r_{PD} = 0,92$, $r_{QD} = 0,85$, $r_{PN_2} = 0,90$, $r_{QN_2} = 0,80$, $r_{DN_2} = 0,70$.

Статистическое моделирование составляющих полной мощности. Поскольку составляющие полной мощности являются случайными, рассматриваемая задача определения закона распределения полной мощности сводится к решению задачи нелинейного преобразования четырех случайных величин. Решение может быть получено методом статистических испытаний. Требуемая корреляция между имитационными массивами составляющих полной мощности может быть получена по методу линейного преобразования.

На этапе имитации исходных массивов высокие требования предъявляются к воспроизведению числовых характеристик случайных составляющих полной мощности. Средние значения и среднеквадратические отклонения воспроизводятся точно, однако отклонения между теоретическими r и статистическими $\tilde{r}$ коэффициентами корреляции не является нулевым. Была произведена оценка максимальной погрешности воспроизведения r_{PQ} , r_{PD} , r_{QD} , r_{PN_2} , r_{QN_2} , r_{DN_2} при статистическом моделировании коэффициентов корреляции $\delta_{r_{\max}}$ (рис.1).

С увеличением объема N имитационных массивов погрешность $\delta_{r_{\max}}$ уменьшается и при $N \geq 20$ тыс. значений не превышает 1%. Это подтверждает, что используемый имитационный подход обеспечивает устойчивое воспроизведение заданной корреляционной структуры.

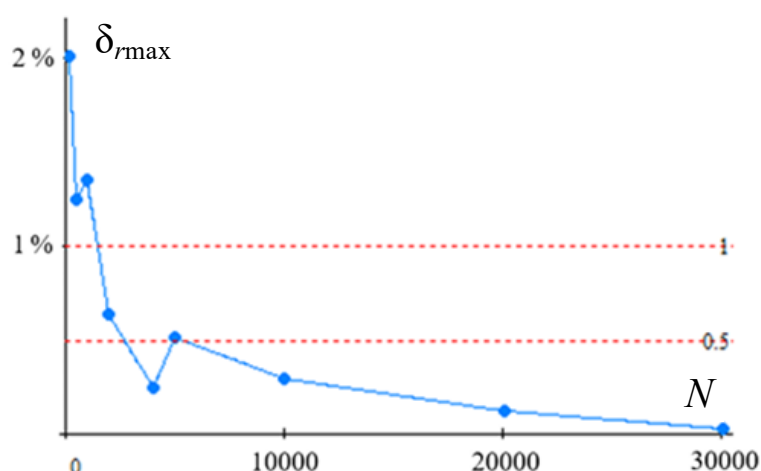


Рисунок 1 – Зависимость максимальной погрешности от количества опытов

Статистическое моделирование полной мощности. Исходными данными выступают имитационные массивы составляющих полной мощности $\tilde{P}$, $\tilde{Q}$, $\tilde{D}$, и $\tilde{N}_2$. Расчет выполняется по формуле (1) для каждого i -го ($i = 1..N$) значения в массивах. В результате моделирования получен имитационный массив значений полной мощности $\tilde{S}$. Для автоматизации расчетов удобно использовать программы *Smath Studio Solver* или *Mathcad*. На рис.2 и рис.3 соответственно показаны полученные статистические плотность и функция распределения полной мощности. Статистическая гистограмма построена для 14 разрядов. Тут же показан нормальный закон распределения.

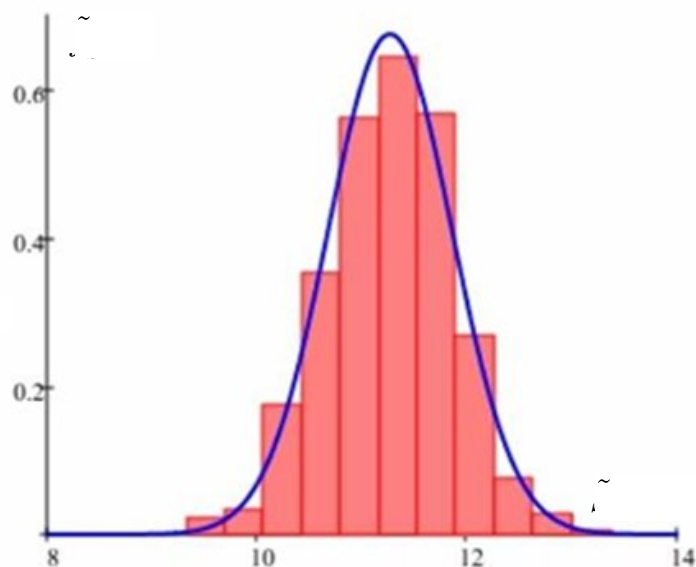


Рисунок 2 – Статистическая плотность распределения полной мощности

Для заданных исходных данных среднее значение полной мощности составило $\tilde{S}_c = 11,269$ МВА, среднееквадратичное отклонение $\sim = 0,56$ МВА, квантили для вероятности 0,05 и 0,95 оказались равными соответственно 10,348 МВА и 12,92 МВА. Среднее значение в точности совпадает с величиной, полученной по формуле (1) при использовании в расчете P_c , Q_c , D_c и N_{2c} .

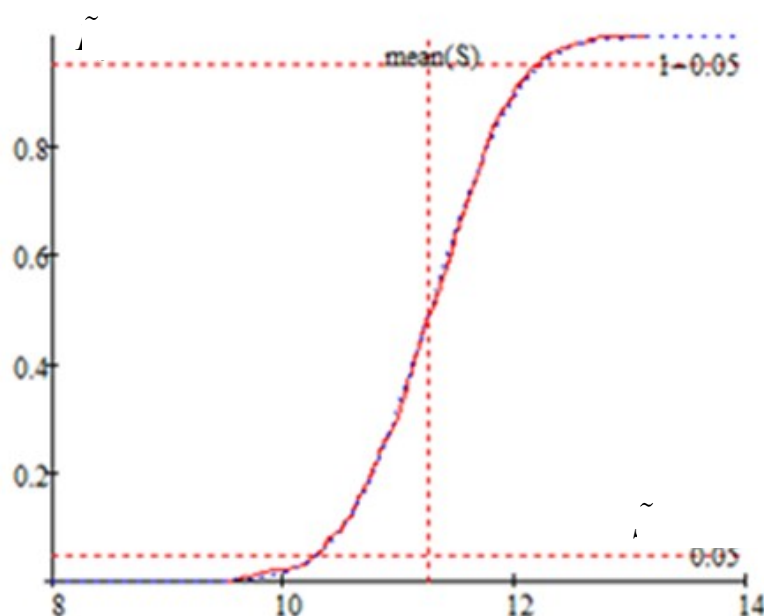


Рисунок 3 – Статистическая функция распределения полной мощности

Исследование вероятностной модели. Преобразование (1) является нелинейным, поэтому закон распределения для полной мощности в общем случае не является нормальным, однако как видно на рис.2 и рис.3 статистические плотность и функция распределения весьма близки к нормальному закону распределения.

Для проверки согласованности закона распределения для рассматриваемой модели полной мощности с нормальным законом были применены критерии Колмогорова и Пирсона. Максимальное расхождение теоретической и статистической интегральных функций распределения составило 0,022, что дает вероятность 0,998, и указывает на хорошую согласованность с теоретическим нормальным распределением по критерию Колмогорова. По критерию Пирсона получено значение $\chi^2 = 7,055$; гипотеза о нормальном распределении не отвергается. Устойчивые результаты получены при различном объеме имитационных массивов от 500 до 50 тыс. значений.

Изменение средних значений P_c , Q_c , D_c и N_{2c} составляющих приводит к смещению центра распределения $\tilde{S}$: увеличение смещает плотность распределения вправо, а уменьшения – влево. Поскольку в исходных данных наибольшим из средних значений является P_c , изменение активной мощности влияет сильнее, чем другие составляющие. Увеличение P_c на 20% влечет за собою увеличение $\tilde{S}_c$ на 13,8%, а увеличение D_c на 20% изменяет $\tilde{S}_c$ только на 1,5%.

Увеличение исходных среднеквадратичных отклонений σ_P , σ_Q , σ_D или σ_{N2} расширяет плотность распределения и увеличивает вероятность отклонения от среднего $\tilde{S}_c$. Наиболее сильное влияние на форму результирующего распределения оказывает σ_P , поскольку именно активная мощность P имеет наибольшее среднее значение в исходной модели.

Ослабление корреляционных связей составляющих полной мощности не влияет на величину $\tilde{S}_c$, но меняет значение $\tilde{\sigma}$. Так уменьшение коэффициентов корреляции r_{PQ} , r_{PD} , r_{QD} , r_{PN2} , r_{QN2} , r_{DN2} на 50% уменьшило $\tilde{\sigma}$ на 9,2 % до значения 0,51.

Выводы

1. Рассмотрена вероятностная модель полной мощности при несимметрии и несинусоидальности в системах электроснабжения.
2. Получены статистические характеристики закона распределения полной мощности при несимметрии и несинусоидальности. Проверка по критериям согласия Колмогорова и Пирсона показала, что в принятой вероятностной модели распределение полной мощности S с большой вероятностью согласуется с нормальным законом распределения.

Перечень ссылок

1. Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. Баланс энергий в электрических цепях. Киев: Наук. думка, 1992. – 312 с.
2. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 113 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 4-е изд. Москва: Наука, 1969. – 576 с.

УДК 621.311.22:662.63:621.311.25

ПРИМЕНЕНИЕ ТЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БИОТОПЛИВЕ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ЭКСПЛУАТАЦИИ В КОГЕНЕРАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Г.К. Котов

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация: В работе рассматривается обзор существующих потенциальных топливных ресурсов для малой энергетики, анализ возможных для применения видов возобновляемых биоресурсов для котла, работающего на биотопливе, исследование теоретических и практических аспектов использования низкокипящих рабочих тел в энергетических установках.

Ключевые слова: энергосбережение, децентрализованное энергоснабжение, низкокипящее рабочее тело, альтернативные источники энергии, биотопливо, органический цикл Ренкина.

Annotation: The paper studies a review of existing potential fuel resources for small-scale power generation, an analysis of renewable bioresources suitable for use in biomass-fired boilers, and a study of the theoretical and practical aspects of employing low-boiling working fluids in power generation systems.

Keywords: energy efficiency, decentralized energy supply, low-boiling working fluid, alternative energy sources, biofuels, Organic Rankine Cycle.

В современной мировой энергетике немалый интерес проявляется к энергогенерирующим установкам малой мощности, которые работают в когенерационном режиме. Причиной интереса является потенциал их использования для автономного энергоснабжения на основе утилизации возобновляемых и бросовых топливных ресурсов, что дает возможность снизить себестоимость производства основной продукции и повысить использование альтернативных источников тепла для энергосбережения ископаемых ресурсов.

Установки малой мощности дают возможность децентрализованного энергоснабжения (выработка тепловой и электрической энергии) удаленных объектов, имеющих в своем составе возобновляемые топливные ресурсы различного состава. Одним из решения является создание замкнутых паротурбинных циклов с низкокипящими рабочими телами (НРТ), в которые входит котельный агрегат на твердой биомассе.

Установки на базе сжигания биомассы и с использованием органического цикла Ренкина работают по следующему принципу: продукты сгорания в котле нагревают непосредственно НРТ, используемое в турбоустановке либо промежуточный теплоноситель. Применение НРТ в замкнутых термодинамических циклах малой мощности имеет ряд преимуществ по сравнению с водой:

- обеспечение непрерывной и автоматической работы турбогенератора и котла за счет отсутствия высокого давления и температуры рабочего тела;
- более простое управление и обслуживание оборудования;
- низкие эксплуатационные расходы и долгий срок службы;
- эффективность турбины достигает до 85%;
- отсутствие влаги в проточной части повышает надежность лопаточного аппарата путем исключения их эрозионного износа;
- большой ресурс оборудования.

Основные цели и задачи развития энергетики Российской Федерации на период до 2050 года базируются на повышении эффективности использования первичных энергетических ресурсов путем достижение качественно нового состояния топливно-энергетического комплекса, а также создать условия для:

- доступного и гарантированного обеспечения населения и экономики страны продукцией и услугами топливно-энергетического комплекса с наименьшими издержками;
- приоритетного и полного обеспечения потребности населения и экономики в доступных энергетических ресурсах;
- обеспечения экономической эффективности принимаемых решений и действий, обеспечение достаточного уровня технологической независимости страны;
- достижения технологического суверенитета [1].

Рассмотрим подробнее на примере фермы с выращиванием скота. Применение мини-ТЭЦ с котлом целесообразно тем, что в котле можно сжигать твердое и газообразное топлива. Остатки соломы, тюки из соломы могут использоваться в качестве топлива. Из натурального отхода от скота можно создавать биогаз, который также возможен применяться как топливо для котла [3]. Пример конструкции мини-ТЭЦ приведен на рисунке 1.

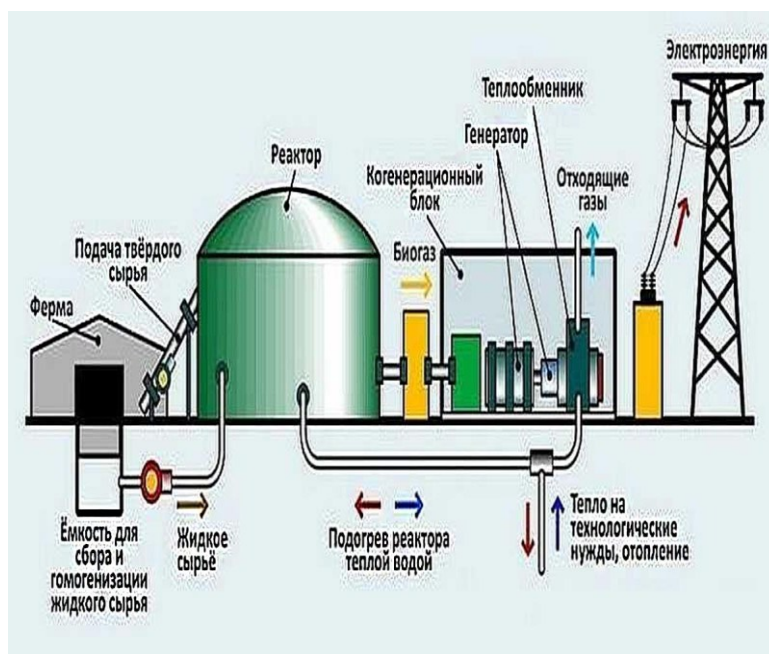


Рисунок 1 – Схема организации мини-ТЭЦ на предприятии

В местах, где источник биомассы находится непосредственно рядом с мини-ТЭЦ, снижается риск потери эффективности, энергетических и экономических затрат.

Производство электрической и тепловой энергии на мини-ТЭЦ в большинстве случаев происходит при работе на органическом цикле Ренкина (ОРЦ) с использованием энергии пара в турбине. Рабочие тела и их параметры выбираются под определенные условия работы энергетической установки. Органический цикл Ренкина отличается от обычного цикла Ренкина (см. Рисунок 2).

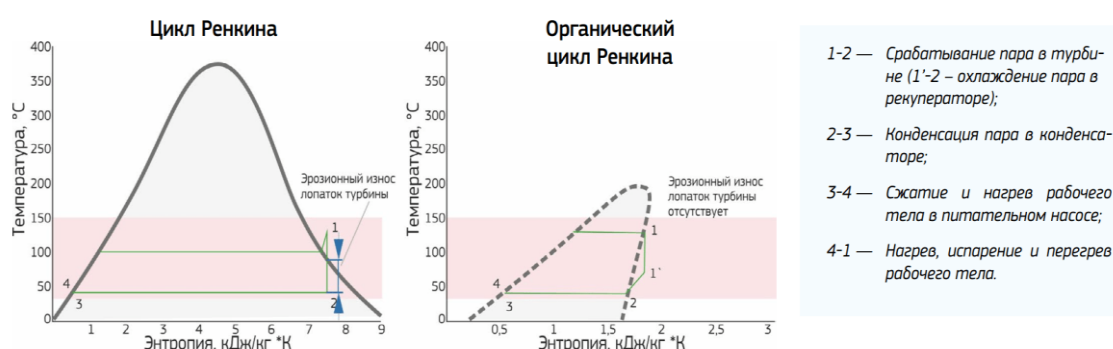


Рисунок 2 – Отличительные особенности цикла Ренкина на воде и НРТ

Возобновляемыми биоресурсами для получения тепловой и электрической энергии могут служить, помимо упомянутых сена и биогаза, древесина, древесная масса, возобновляемые источники

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

древесного происхождения (мискантус, камыш и т.п.), торф, торфяные пеллеты и др. Энергетическая ценность многих альтернативных источников топлива приведена в таблице 1.

Таблица 1. Теплотворная способность перечисленных видов биотоплива

Вид биотоплива	Теплотворная способность топлива, МДж/кг, (МДж/м ³)
Стволовая часть дерева	14-19
Крона дерева	12-16
Кора дерева	11-16
Древесная щепа и опилки	8-12
Древесные пеллеты и брикеты	16-20
Мискантус	12-15
Камыш	13-15
Пеллеты из камыша	17-18
Торф	8-15
Пеллеты из торфа	15-22
Биогаз	20-25

Как видно из данных таблицы, более теплотворны это столовая часть дерева, пеллеты и биогаз. За счет низкого содержания влажности, минеральных элементов и золы данные виды топлива не будут ухудшать процесс горения в котле путем выделения влаги и осаждения большого количества шлака на стенках котла. Однако другие виды топлива имеют преимущество за счет их доступности и низкой цены.

Паротурбинные установки с использованием НКТ могут работать в конденсационном, когенерационном и тригенерационном режимах.

В качестве рабочих тел в исследуемых установках могут использоваться:

- Вода;
- Пар;
- Масло MDM;
- органические соединения (фреон, толуол, эвтектическая смесь дифенила и дифенилоксида) и др.

На рисунке 3 изображена подходящая принципиальная тепловая схема с двумя контурами.

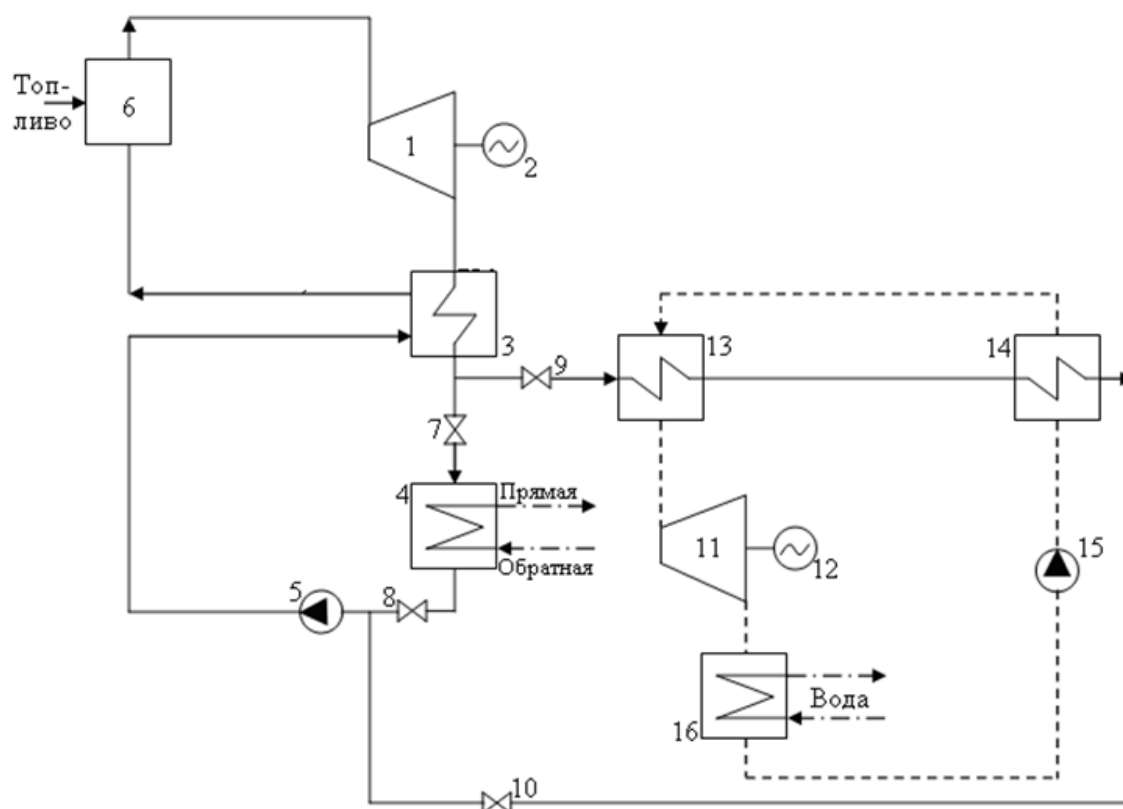


Рисунок 3 – Принципиальная тепловая схема энергетической установки с двумя каскадами: 1, 11 – паровая турбина; 2, 12 – электрогенератор; 3 – теплообменник (рекуператор), 4, 16 – теплообменник для подогрева сетевой воды; 5, 15 – конденсатный насос; 6 – котел; 7, 8, 9, 10 – задвижка; 13, 14 – подогреватели

При разработке паротурбинных схем новых турбоустановок, как правило, выполняются комплексные исследования, нацеленные на обоснованный выбор отдельных элементов и оптимизацию схемы в целом с учетом ключевых параметров. Рассматривается использование мини-ТЭЦ в качестве децентрализованного источника энергии для отдаленных населенных пунктов и энергосбережения ископаемых ресурсов. Поэтому условие данной установки будет нацелено на предоставление горячего водоснабжения и электроэнергии, причем второй каскад будет создавать дополнительную выработку электроэнергии. В зимнее время должно соблюдаться снабжение потребителей электрической энергией, горячим водоснабжением и теплом для отопления [4].

В летний период при отсутствии потребителей тепловой энергии перекрываются задвижки 7 и 8, а задвижки 9 и 10 открываются, направляя греющую среду в подогреватели 13 и 14.

Выводы

Проведен анализ и исследование возможности применения мини-ТЭЦ на базе сжигания биотоплива. Установлено, что существующие подходы энергосбережения и использования локальных топливных ресурсов для децентрализации энергоснабжения требуют разработки энергоустановок малой мощности, работающих на различных рабочих телах, и имеют значительный потенциал развития. Стоит отметить, что использование рассматриваемых установок будет крайне эффективно для предприятий в сфере сельского хозяйства, мусороперерабатывающих компаний, организаций, занимающихся древесной промышленностью, птицефабрик и других. Это позволит развивать местную (локальную) энергетику и производить собственную тепловую и электрическую энергию на предприятии, эффективно утилизировать биологические отходы с минимальным воздействием на окружающую среду.

Перечень ссылок

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. Распоряжение Правительства РФ от 12 апреля 2025 г. № 908-р.
2. Когенераційні технології в малій енергетиці: монографія / В.А. Малярченко, О.Л. Шубенко, С.Ю. Андреев, М.Ю. Бабак, О.В. Сенецкий // Харків. нац. ун-т міськ. гоп-ва ім. О.М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А.М. Підгорного. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 454 с.
3. Экономические аспекты использования древесного топлива в малой энергетике / А.Г. Крылова, В. А. Лавриченко – 6 с.
4. Матиюк Л.Н. Основная концепция: «Биоэнергетическая деревня» [Электронный ресурс] / Л.Н. Матиюк // Специальное агентство по возобновляемым ресурсам (FNR). Проект BIO-PROM – Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Германия. [2016]. Режим доступа: www.bioenergie-kommunen. Электрон. дан. (1 файл). – 2632 кбт.
5. Obernberger Ingwald Description and evaluation of the new 1,000 kW_{el} Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Liens, Austria / Ingwald Obernberger, Peter Thonhofer, Erwin Reisehofer // Euroheat & Power, volume, 10. – 2002. – P. 41–48.

УДК 373.31:004.9

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОБОТА CODEY ROCKY ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ РОБОТОТЕХНИКЕ В МЛАДШЕЙ ШКОЛЕ

Д.Н. Мирошник, Е.К. Казаков

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк,
ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Рассмотрена проблема внедрения элементов робототехники и программирования в образовательный процесс для младших школьников. Проведен анализ для сравнения существующих аппаратных платформ, обоснован выбор робота Codey Rocky как инструмента для начального этапа обучения. Описаны технические характеристики встроенной сенсорной системы и архитектура среды mBlock.

Ключевые слова: образовательная робототехника, Codey Rocky, платформа Makeblock, среда программирования mBlock.

Annotation: The problem of introducing elements of robotics and programming into the educational process for younger schoolchildren is considered. An analysis was carried out to compare existing hardware platforms, and the choice of the Codey Rocky robot as a tool for the initial stage of training was justified. The technical characteristics of the integrated sensor system and the architecture of the mBlock environment are described.

Keywords: educational robotics, Codey Rocky, Makeblock platform, mBlock programming environment.

Постановка задачи. Современный этап развития системы образования характеризуется активным внедрением STEAM-технологий (Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics), направленных на формирование у учащихся комплексных инженерных способностей. Особое внимание уделяется начальной школе, так как именно в этот период закладываются основы логического и алгоритмического мышления и интерес к направлению. Однако традиционные подходы к обучению робототехнике, предполагающие сборку конструкций из отдельных деталей и монтаж электронных схем, часто бывают чрезмерно сложными для детей такого возраста. Это приводит к быстрой потере мотивации и отсутствию видимого результата.

В связи с этим актуальной научно-педагогической задачей является поиск таких аппаратно-программных комплексов, которые позволяют снизить барьер входа в профессию, сохранив при этом

высокую образовательную ценность. Комплексы должны обеспечивать возможность изучения основных принципов управления техническими системами без необходимости глубоких знаний на начальном этапе.

Цель работы: провести технико-педагогический анализ образовательной платформы Codey Rocky. Для этого необходимо выявить её ключевые преимущества перед аналогами, описать возможности встроенной сенсорной системы и предложить методику использования робота.

На современном рынке представлено множество решений для обучения робототехнике, которые можно классифицировать по уровню сложности и назначению. К наиболее распространенным относятся конструкторы на базе LEGO Education (WeDo 2.0, SPIKE Prime) и платформы на базе открытых микроконтроллеров (Arduino, Micro:bit).

Робот Codey Rocky, разработанный компанией Makeblock, занимает особенное место, благодаря его ключевым преимуществам:

- интегрированная конструкция (отсутствие необходимости сборки позволяет начать урок немедленно).
- богатая сенсорная база (более 10 встроенных датчиков покрывают потребности большинства учебных программ) [1].
- двуязычная поддержка (поддержка Scratch 3.0 и Python в одной среде).
- поддержка IoT и ИИ (возможность подключения к облачным сервисам и использования функций машинного обучения «из коробки»).

Особенно хочется отметить насыщенность датчиками, что позволяет изучать физические величины (свет, звук, ускорение) в прикладном аспекте, превращая робота в мобильную измерительную лабораторию.

Таким образом Codey Rocky представляет собой оптимальный баланс между простотой использования и функциональной глубиной, необходимой для долгосрочного образовательного процесса.

Codey Rocky (рис.1) состоит из двух основных модулей: головного блока Codey, выполняющего функцию контроллера, и движущейся базы Rocky, оснащенной дифференциальным приводом. Вычислительным ядром системы является микроконтроллер ESP32 (240 МГц). Наличие модулей Wi-Fi и Bluetooth 4.2 обеспечивает беспроводную передачу программ и данных.

Для данного робота разработана методика, предполагающая постепенное усложнение задач:

1. Знакомство: базовые движения, работа с кнопками и LED-матрицей.
2. Сенсорика: реакция на внешние раздражители (свет, звук, препятствия).

3. Алгоритмизация: создание автономных поведений (лабиринт, следование по линии).
4. Продвинутый уровень: работа с Python, создание проектов с использованием интернета.



Рисунок 1 – Внешний вид робота

Для демонстрации возможностей платформы далее рассматриваются два типовых проекта.

Проект 1: «Умный ночник»

Задача: Робот включает подсветку LED-матрицы только в темноте.

Реализация: Цикл «повторять всегда», внутри которого находится условный оператор «если». Условие проверяет значение с датчика освещенности: если оно ниже порогового значения, включается светодиод; иначе — выключается.

Проект 2: «Графический дисплей»

Задача: Отображение пользовательского изображения на матрице 16x8.

Реализация: Учащийся программирует каждый пиксель матрицы, задавая его координаты (X, Y) и цвет (RGB). Проект развивает понимание системы координат и циклических структур при отрисовке сложных фигур.

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что робот Codey Rocky является эффективным инструментом для введения в робототехнику младших школьников, так как устраняет необходимость предварительного изучения электроники и схемотехники.

2. Интегрированная сенсорная система позволяет реализовывать широкий спектр учебных задач, от простой навигации до сложных алгоритмов с обратной связью.

3. Предложенная методика применения, основанная на постепенном усложнении задач и использовании проектного подхода, способствует формированию интереса к техническим дисциплинам и развитию логического и алгоритмического мышления у учащихся.

Перечень ссылок

1. Архипкина, В. В. Опыт разработки курса по робототехнике для обучающихся начальной школы с использованием робота Codey Rocky / В. В. Архипкина, П. В. Кузнецова, Д. И. Сафина // Информационные технологии как основа прогрессивных научных исследований : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Саратов, 25 июня 2024 года. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2024. – С. 163-169. – EDN FMPVLD.

УДК 621.316.9:622.862.7:622.3

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ ЕМКОСТИ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 3,3 КВ ПО УСЛОВИЯМ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Д.А. Лебедев¹, И.А. Бершадский¹, А.Ю. Гладков²,
Н.М. Халявинская¹

¹ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

²ГУ «Макеевский научно-исследовательский институт
по безопасности работ в горной промышленности»

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы повышения безопасности эксплуатации шахтных электрических сетей напряжением 3,3 кВ в условиях роста энергоёмкости и производительности горнодобывающего производства. Исследуется эффективность искусственного замыкания повреждённой фазы сети на землю в посткоммутационной импульсной системе. Теоретически проанализированы формулы для расчёта тока поражения человека и определены граничные параметры допустимой ёмкостной составляющей токов утечки.

Ключевые слова: шахтная сеть 3,3 кВ, ток утечки, заземление, электробезопасность, ёмкостный ток, защита, устройство автоматического отключения.

Annotation: The paper considers issues related to improving the safety of operation of mine electrical networks with a voltage of 3.3 kV under conditions of increasing energy intensity and productivity of mining production. The effectiveness of artificial grounding of the damaged phase of the network in a post-commutation pulse system is investigated. Formulas for calculating the current of human injury are theoretically analyzed, and boundary parameters of the permissible capacitive component of leakage currents are determined.

Keywords: mine network 3.3 kV, leakage current, grounding, electrical safety, capacitive current, protection, automatic disconnection device.

В связи с существенным повышением мощности добычи угольных шахт и нагрузки на очистной забой, усложнением горно-геологических условий разработки, а также переходом к новым схемам ведения очистных работ, повышается необходимость создания новых средств механизации очистных процессов, то есть высокомоощных, энерговооруженных очистных комплексов, транспортного и проходческого оборудования, и вспомогательных электротехнических

установок. Формирование мощных электроприводов для подобных комплексов возможно за счет повышения напряжения до 3,3 кВ. [1]

При прикосновении человека к одной из фаз сети с изолированной нейтралью ток течёт через тело человека и изоляцию остальных фаз (рис. 1) [8].

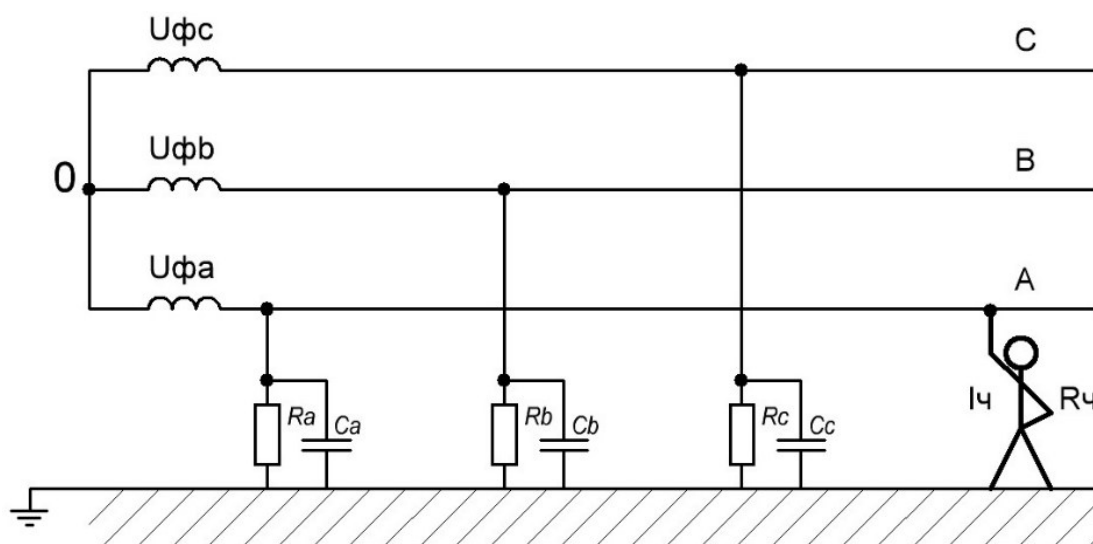


Рис. 1 – Эквивалентная схема изоляции по отношению к земле
трехфазной электроустановки с изолированной нейтралью, к фазе А
которой прикоснулся человек сопротивлением R_{ϕ}

Расчет величины поражающего тока сложен, поскольку зависит от сетевого напряжения, сопротивления изоляции, емкости фаз относительно земли, схемы «включения» человека в цепь и сопротивления его тела. При типичных напряжениях выше 1 кВ влияние емкостных токов становится преобладающим. С одной стороны, одним из способов повышения безопасности является компенсация индуктивными токами, который характеризуется завышенным значением переходного тока утечки через человека, а также перенапряжениями до 5 раз [5]. С другой стороны, снижение общего количества емкостных токов может быть достигнуто уменьшением емкости сети (разбиением сети). [6]

Однако для сетей 3,3 кВ были недостаточно разработаны аналитические зависимости, связывающие допустимую емкость фаз с параметрами изоляции и требованиями электробезопасности. [7]

Цель работы – определение параметров емкостной составляющей токов утечки на землю для обеспечения электробезопасности в шахтных участковых сетях напряжением 3.3 кВ при прикосновении человека к поврежденной фазе.

При прикосновении человека, стоящего на земле, к одной из фаз ток определяется не только его сопротивлением, но и сопротивлением изоляции самой электроустановки. Расчет проводится с учетом допущений: сопротивление человека $R_{\text{ч}}$ без реактивной составляющей (активное), нагрузка симметрична, сопротивление линии не учитывается [9].

Тогда, сила тока утечки:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{ф}}}{R_{\text{ч}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_{\text{и}} \cdot (R_{\text{и}} + 6 \cdot R_{\text{ч}})}{9 \cdot (1 + R_{\text{и}}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2) \cdot R_{\text{ч}}}}}, \quad (1)$$

где

$U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети, В;

$R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека, Ом;

$R_{\text{и}}$ – активное сопротивление изоляции сети относительно земли, Ом;

ω – угловая частота, 1/с;

C – емкость сети относительно земли, Ф.

Напряжение прикосновения:

$$U_{\text{ч}} = I_{\text{ч}} \cdot R_{\text{ч}} \quad (2)$$

Вследствие высокой изоляции в сетях >1000 В ($R_{\text{а}} = R_{\text{б}} = R_{\text{с}} = \infty$), и преобладания влияния емкости фаз относительно земли, учитываем лишь емкостные составляющие токов утечки. Тогда, в случае, если человек касается поврежденной фазы, сила тока определяется по следующему выражению [9]:

$$I_{\text{ч}} = \frac{3 \cdot U_{\text{ф}} \cdot \omega \cdot C}{\sqrt{1 + 9 \cdot R_{\text{ч}}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2}}. \quad (3)$$

Данную формулу следует применять для инженерных расчетов в сетях до 6 кВ, когда емкость фаз превышает 0,25 мкФ/фаза [10]. Погрешность, ожидаемая, при емкости до 1 мкФ на фазу не должна превышать 10%.

Используем графическое представление расчетов, проведенных для данного утверждения. Использовались ранее описанные формулы при сопротивлении человека $R_{\text{ч}} = 850$ Ом [3], $C = 0..1$ мкФ, $R_{\text{и}} = 80$ кОм, $R_{\text{и}} = 240$ кОм, $R_{\text{и}} = 1$ МОм. Результаты показаны на рисунке 2.

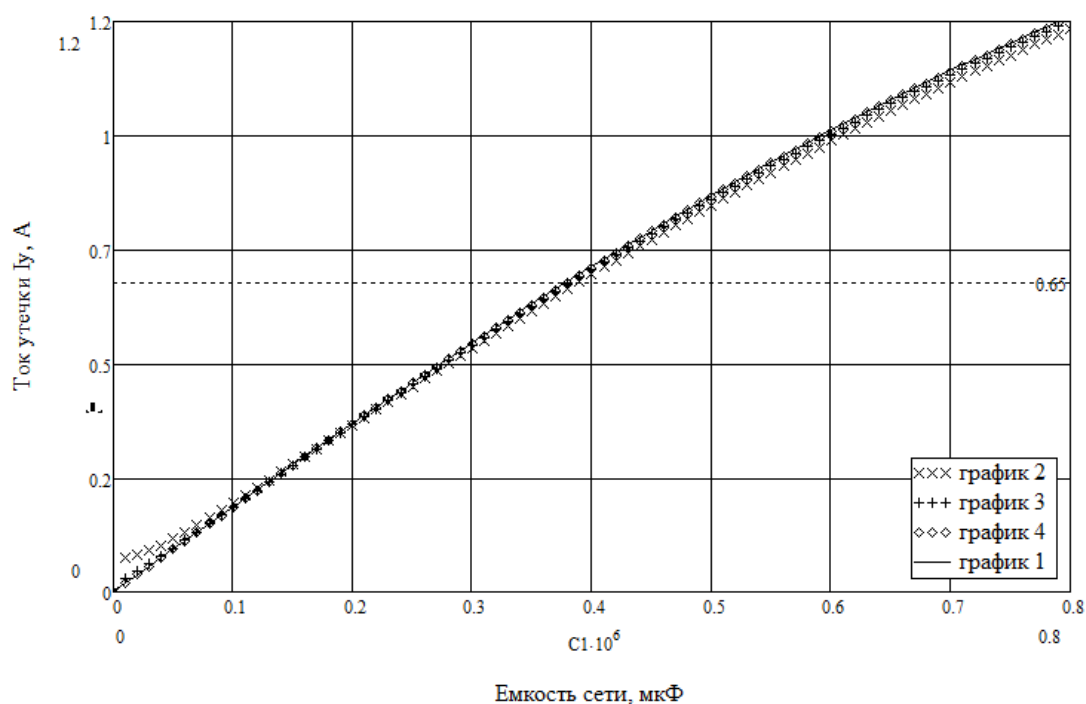


Рис. 2. Зависимость силы тока, протекающего через тело человека от емкости сети:

график 1 – по формуле (3); график 2 – по формуле (1) при $R_u = 80$ кОм;
график 3 – по формуле (1) при $R_u = 240$ кОм; график 4 – по формуле
(1) при $R_u = 1$ МОм; кривая 5 – предельно допустимый ток утечки
0,65А при продолжительности воздействия 10 мс..80мс.

Можно сделать вывод, что ток утечки не возрастает существенно при увеличении R_u (менее 5%). А допустимый ток утечки $I_{\text{ч}} = 0.65$ А и напряжение прикосновения 550 В (формула (2)) при продолжительности воздействия 10 мс..80 мс достигается участковой сетью с $C=0.35..0.38$ мкФ [3].

Проведем расчет относительной погрешности значений силы тока, который протекает через тело человека (формулы (1) и (3)).

При расчете силы тока утечки $I_{\text{ч}}$ в сети с напряжением 3.3 кВ (рис. 3) соблюдается погрешность не более 5% (при емкости фаз выше 0.1 мкФ/фаза до 1 мкФ).

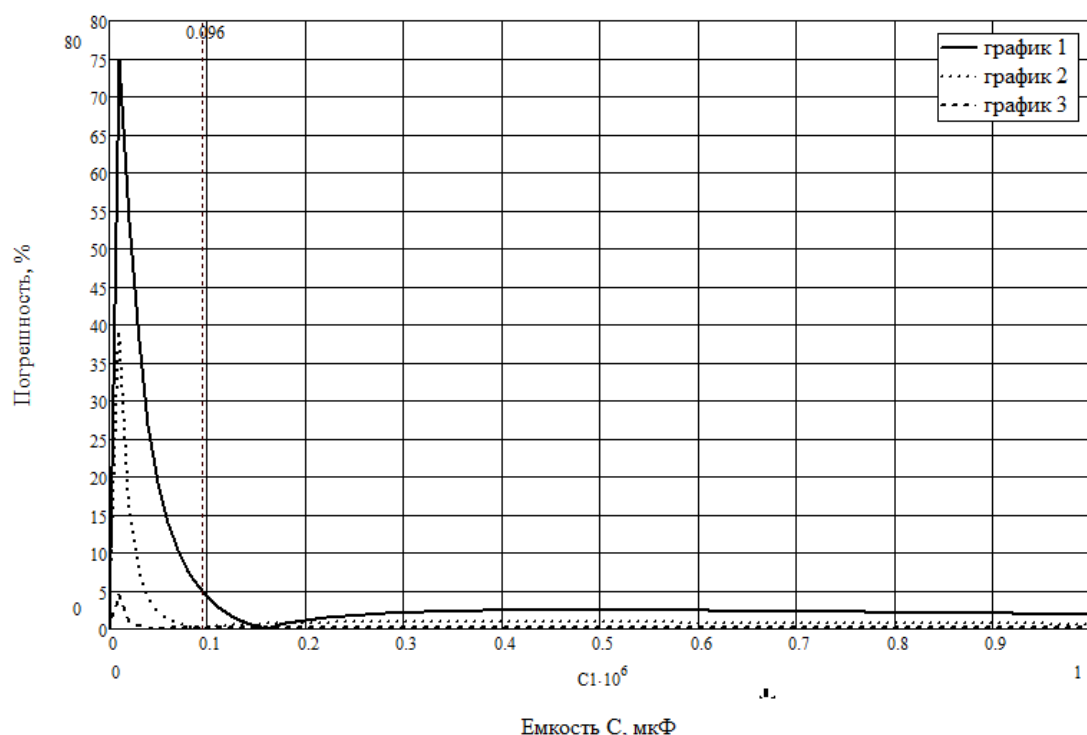


Рис. 3. Зависимости относительных погрешностей от емкости сети:
график 1 — при $R_{и}=80$ кОм; график 2 — при $R_{и}=240$ кОм;
график 3 — при $R_{и}=1$ МОм

Предельная емкость, определенная при использовании формулы (1) $C = 4.7$ нФ. При превышении этого значения условие протекания безопасно допустимого тока 25 мА при $R_{и} = 240$ кОм/фаза не может быть выполнено. Шахтные сети в России зачастую обладают существенно большей емкостью. Поэтому, если не применять специальные меры защиты (защитное отключение, шунтирование поврежденной фазы, компенсация и т.д.), невозможно гарантировать обеспечение электробезопасности.

Для защиты человека от поражения электрическим током рассчитаем зависимости емкости сети от сопротивления изоляции для предельно-допустимых значений $I_{ч}$, напряжения прикосновения $U_{ч}$ и количества электричества $Q = 50$ мА·с [11]. Для этого проведем необходимые преобразования формулы (1) относительно емкости фаз C .

$$C = \frac{\sqrt{3I_{ч}R_{ч} - 3U_{ф} + I_{ч}R_{и}} \cdot \sqrt{3U_{ф} + 3I_{ч}R_{ч} + I_{ч}R_{и}}}{6\pi R_{и}f \cdot \sqrt{U_{ф} + I_{ч}R_{и}} \cdot \sqrt{I_{ч}R_{и} - U_{ф}}}, \quad (4)$$

где f — частота сети, Гц.

На рис. 4 можно наблюдать зависимости расчетной емкости сети от сопротивления изоляции при предельно допустимых значениях тока утечки $I_{\text{ч}}$ и напряжения прикосновения (2) для разных интервалов T длительности воздействия тока.

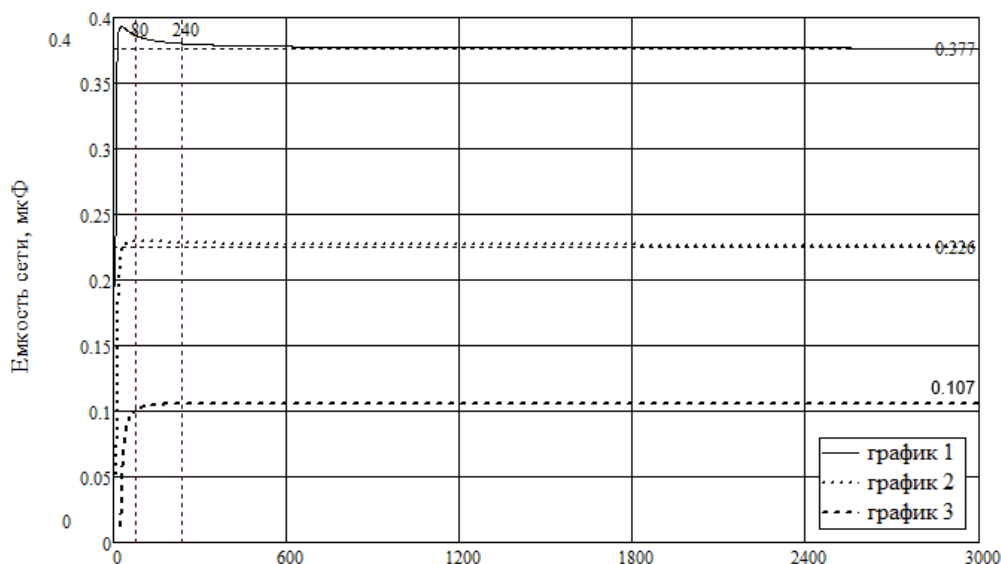


Рис. 4. Зависимости емкостей сети от сопротивления изоляции при достижении предельно-допустимых значений по [2]:

график 1 – при $I_{\text{ч}} = 0.647\text{A}$, $U_{\text{ч}} = 550\text{В}$, $T = 10..80\text{мс}$; график 2 – при $I_{\text{ч}} = 0.4\text{A}$, $U_{\text{ч}} = 340\text{В}$, $T = 100\text{мс}$; график 3 – при $I_{\text{ч}} = 0.188\text{A}$, $U_{\text{ч}} = 160\text{В}$, $T = 200\text{мс}$

Для действующих участков шахтных сетей с напряжением 3,3 кВ емкость сети, как правило, не превышает 0,377 мкФ. Следовательно, согласно рис. 4 (кривая 1), допустимая продолжительность воздействия тока на человека при прикосновении к токоведущей части составляет не более 80 мс. По завершении этого интервала необходимо применять специальные защитные меры, например, отключение защиты или шунтирование поврежденной фазы.

Перечень ссылок

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». – Москва: ТНЦ ПБ, 2017. – с.76, 187 с.
2. Методические указания по электроснабжению, выбору и проверке электрических аппаратов, кабелей и устройств релейной защиты в участковых сетях угольных шахт (рудников) напряжением 3300 В (Зарегистрирован в Минюсте РФ 6 декабря 2011 г. Регистрационный N 22512), с. 6,7.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

3. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, с. 3.
4. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях : научное издание / В.С. Дзюбан. – Москва: Недра, 1982. – с.11, 152 С.
5. Гришин М.В. Совершенствование требований к контролю изоляции подземных электроустановок / М.В. Гришин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности . – Кемерово. –2010. – №2. – С.195-201.
6. Сычев Л.И. Шахтные гибкие кабели и электробезопасность сетей / Сычев Л.И., Цапенко Е.Ф. – Москва: Недра, 1978. – с.121, 216 С.
7. Цапенко Е.Ф. Горная электротехника / Е.Ф. Цапенко, М.И., Мирский, О.В. Сухарев. – Москва: Недра, 1986. – с.93, 431 С.
8. Гладилин Л.В., Меньшов Б.Г, Щуцкий и др. Изоляция подземных электроустановок шахт и электробезопасность. М., Недра 1966 – с.15, 262 С.
9. Озерной М.И. Горная электротехника /. М.И. Озерной. – Москва: Госгортехиздат, 1962. – с.19, 18, 432 С.
10. Ягудаев Б.М Защита от электропоражения в горной промышленности / Б.М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. – Москва: Недра, 1982. – с.20, 152 С.
11. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк. – Москва: Недра, 1980. – с.105, 334 С.

УДК 621.383.51

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА МОБИЛЬНОГО НАЗЕМНОГО РОБОТА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Д.Н. Мирошник, В.Д. Левченко
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Разработан прототип мобильного наземного робота на воздушной подушке на базе аппаратуры радиоуправления и бесколлекторного электропривода постоянного тока. Предложенный прототип позволяет создать на его основе интеллектуальное устройство для использования в учебном процессе.

Ключевые слова: робот на воздушной подушке, аппаратура радиоуправления, производительность, аэродинамические винты, бесколлекторный электропривод постоянного тока.

Annotation: A prototype of a mobile ground robot on an air cushion has been developed using radio control equipment and a DC electric drive. The proposed prototype simplifies exploration missions in difficult terrain.

Key words: hovercraft, radio control equipment, aerodynamic propellers, brushless DC electric drive.

Постановка задачи. В настоящее время роботизация занимает большую долю современной деятельности человека. Роботизация представляет собой не только гуманоидных роботов, но также и различных вспомогательных и мобильных роботов. В последние годы сохраняются темпы развития мобильных роботов на различных платформах перемещения. Однако не все платформы нашли свое применение и появляется необходимость разработки прототипов на малоиспользуемых и перспективных платформах перемещения. К таким устройствам относится робот на воздушной подушке [1]. Это аппарат вездеходного типа, робот, у которого значительная часть массы поддерживается над опорной поверхностью силами избыточного давления воздуха, постоянно нагнетаемого под днище в полость — воздушную подушку. Уменьшение контакта с поверхностью снижает сопротивление её движению судна и повышает его скорость.

Цель работы: разработать прототип мобильного наземного робота на воздушной подушке, выбрать аппаратные компоненты, необходимых для реализации управления робота.

С целью обеспечения передвижения прототипа мобильного робота на воздушной подушке были выбраны аэродинамические винты с приводами, обеспечивающие необходимый объем и скорость подачи воздуха. Для решения этой задачи был выполнен расчет необходимой производительности нагнетательных органов.

В результате расчета получены следующие характеристики:

- масса устройства составляет 1400 г;
- воздушный зазор 3мм;
- периметр дна 1.043 м;
- площадь дна 0.048 м²;
- необходимая производительность 65.73×10^{-11} м³/с.

В результате испытаний было установлено, что две нагнетательные пары удовлетворяют требуемой производительности для обеспечения перемещения прототипа мобильного робота на воздушной подушке.

На рис.1 показана принципиальная схема соединений робота.

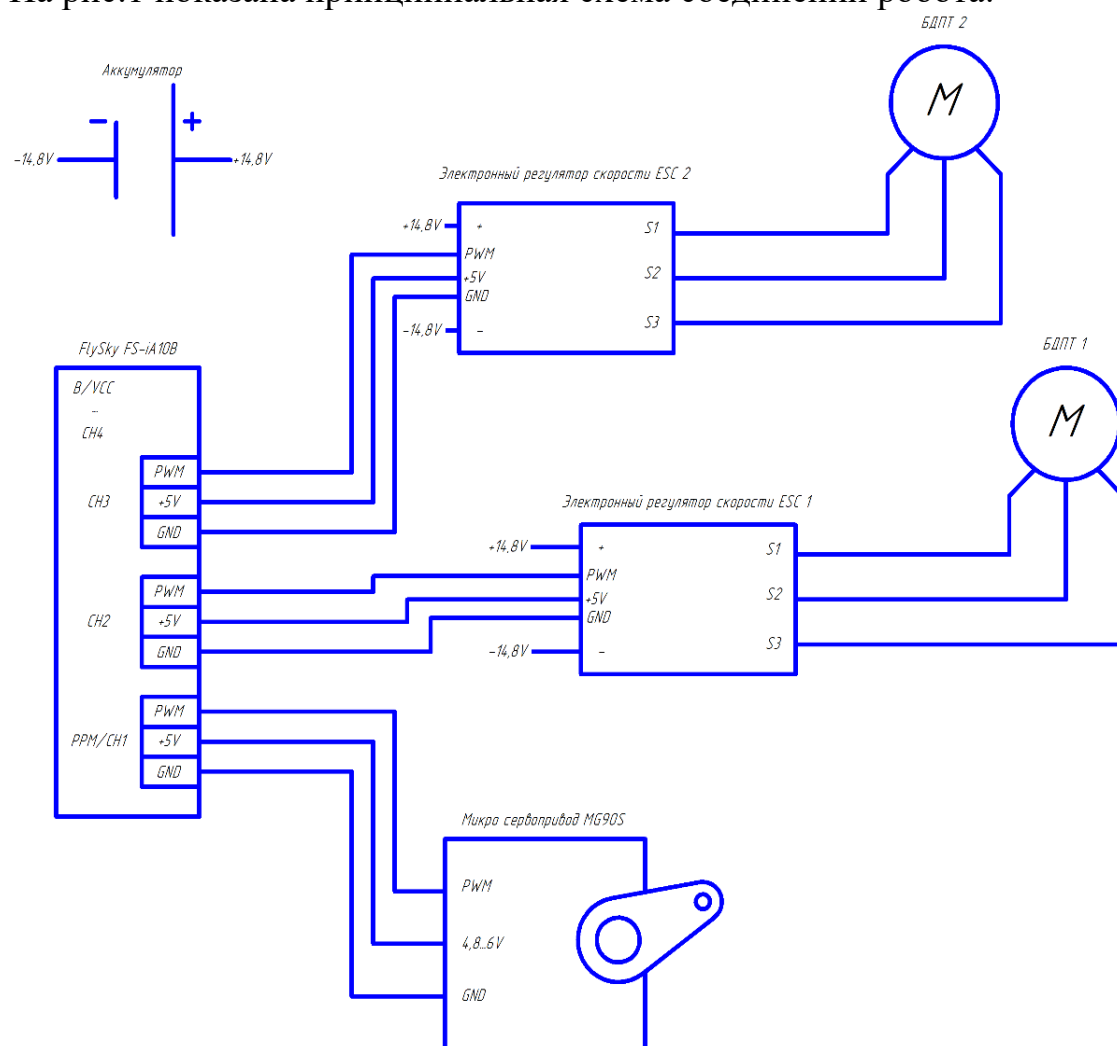


Рисунок 1 – Принципиальная схема робота

На ней два бесколлекторных двигателя с постоянными магнитами, питаются от двух контроллеров (ESC), обеспечивая нагнетание в подушке о передвижение. Третий исполнительный серводвигатель обеспечивает поворотное движение платформы.

В качестве органа управления для прототипа мобильного робота на воздушной подушке была выбрана аппаратура радиоуправления FlySky FS-I6S с радиоприемником FS-iA10B, характеризующаяся невысокой стоимостью и наличием сенсорного экрана для изменения настроек пульта. Радиоприемник FS-iA10B установлен непосредственно на самом прототипе мобильного робота на воздушной подушке (рис.2).



Рис.1 – Внешний вид робота

Выводы

1. Рассмотрена конструкция прототипа мобильного робота на воздушной подушке.
2. Приведен расчет необходимой производительности нагнетательных органов.
3. Выбрано оборудование, необходимое для аппаратной реализации управления роботом.

Перечень ссылок

1. Павельчук, К. Е. Задачи механики мобильного робота на воздушной подушке / К. Е. Павельчук, П. И. Яшенко, Р. В. Постнов // Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 77-79. – EDN VTLQLD.

УДК 007.52:004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА РОБОТА - МАНИПУЛЯТОРА AR-4

Т.А. Ляшенко, Д.Н. Мирошник, Е.М. Ляхов
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: В работе рассмотрен шестиосевой манипулятор AR4, для которого выполнен сравнительный анализ с аналогичными разработками, создан и испытан функциональный прототип, а также проанализированы методы и программные средства моделирования и составлена модель в среде ROS Rviz.

Ключевые слова: шестиосевой манипулятор, промышленный робот, обратная кинематика, моделирование.

Annotation: The AR4 six-axis manipulator was reviewed and compared with similar developments, its functional prototype was created and tested, as well as methods and software tools for modeling the operation of an industrial robot were considered, and a manipulator model was compiled in the ROS Rviz environment.

Keywords: six-axis manipulator, industrial robot, reverse kinematics, modeling.

Постановка задачи. В связи с наличием на многих производствах факторов, обуславливающих тяжёлые условия труда, распространённостью производств, имеющих сильное негативное влияние на окружающую среду, а также необходимостью в подобных условиях выполнять монотонные высокоточные операции, работать с дорогостоящим оборудованием, повышать производительность труда в современной промышленности всё большее распространение получают промышленные манипуляторы.

Манипулятор представляет собой механизм, который предназначен для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, и оснащён рабочим органом. Эти устройства заменяют человека в неблагоприятных условиях труда, увеличивают производительность линии, а также повышают качество изготавливаемой продукции.

В работе рассматривается шестиосевой робот AR4 [1], работающий в угловой системе координат для возможности отработки необходимого положения и наклона рабочего органа в пределах

рабочей зоны. **Целью работы** является создание прототипа и имитационной модели манипулятора AR4.

Механическая часть манипулятора включает в себя неподвижное основание, три звена и шесть осей, обеспечивающих перемещение рабочего органа. Возможно применение несколько вариантов рабочего органа, такие как захват-клешня с электроприводом или пневмоприводом. Все оси приводятся в движение шаговыми двигателями серии Nema-17. Приводные двигатели каждой оси размещены на звеньях, предшествующих этой оси, то есть двигатель первой оси размещён на основании, второй – на первом звене и так далее. Усилие от двигателей передаётся на оси посредством валов, зубчато-ременных передач, а также винтовой поступательной передачи. Первые три оси отвечают за движение звеньев и положение рабочего органа в пространстве, а оставшиеся – за наклон рабочего органа. Расположение звеньев и осей манипулятора представлено на рисунке 1.

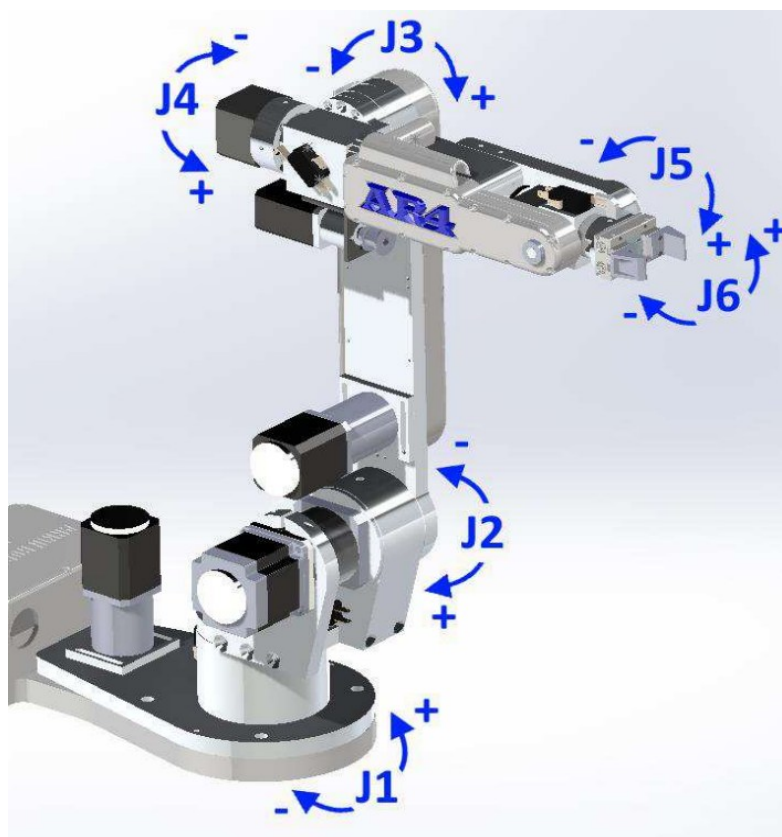


Рисунок 1 – Расположение осей и звеньев манипулятора

Система управления представлена микроконтроллером TEENSY 4.1, предназначенным для подачи управляющих сигналов на драйверы шаговых электродвигателей, связи манипулятора с ПК, обработки и передачи сигналов обратной связи. Другая важная часть системы

управления – это программное обеспечение для ПК. Приложение AR4 позволяет пользователю осуществлять управление манипулятором и получать информацию о статусе процессов и возможных ошибках. Софт предлагает широкий спектр возможностей: ручное управление всеми осями и рабочим органом в его собственных координатах с использованием принципов обратной кинематики; создание программы автоматической работы манипулятора с использованием псевдокода, позволяющей задать перемещение по прямым и криволинейным траекториям и использовать циклы и условные переходы; использование G-code; контроль и наблюдение за перемещениями манипулятора при помощи цифровой модели.

Обратная связь осуществляется посредством конечных выключателей. Кроме того, конфигурация контроллера позволяет использовать на каждой оси цифровой энкодер, а программное обеспечение совместимо с ROS [2], что позволяет внедрить в проект систему компьютерного зрения

Также совместимость с ROS позволяет использовать в качестве источника информации о работе устройства имитационную модель, которая была разработана для проекта в среде Rviz. Модель приведена на рисунке 2.

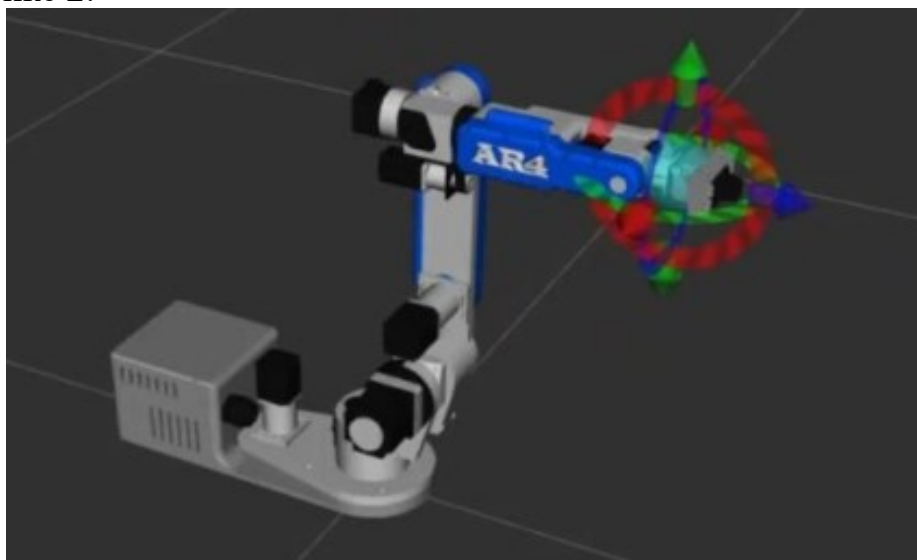


Рисунок 2 – Модель манипулятора в среде Rviz

Rviz – это инструмент для 3D-визуализации данных в рамках ROS. Он позволяет отображать различные типы данных робототехнических систем: данные сенсоров (камеры, лидары, температурные датчики), модели роботов, преобразования координат, навигационные данные и другие. Одна из ключевых особенностей Rviz – использование системы преобразования данных из локальных систем координат в глобальную

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

систему отсчёта, что важно для понимания взаимосвязей между частями робота и его окружением.

Rviz широко используется разработчиками и пользователями при отладке систем робототехники, он помогает понимать как робот воспринимает окружающую среду, а также визуализировать навигационные данные и другие типы информации.

В таблице 1 приведены ожидаемые характеристики манипулятора, а также эти характеристики у аналогов учебного и промышленного назначения.

Таблица 1 – Характеристики манипуляторов

Модель	Радиус действия, см	Полезный груз, кг	Повторяемость, мм	Масса, кг	Макс. Потребление мощности, Вт
AR4-Mk3	67	1.9	0.3	12.25	198 W
Uarm swift pro	32	0.5	0.2	2.2	60 W
FANUC LR Mate 200iB	70	5	0.04	45	1000 W

Из приведённых в таблице показателей можно увидеть, что проект обладает большими, но сопоставимыми массой и энергопотреблением как у учебной модели, а также радиусом действия и грузоподъёмностью меньшими, но сопоставимыми с промышленным образцом. Показатель эффективности работы, который является существенным недостатком по сравнению с промышленным роботом – повторяемость, отличающаяся на порядок. Таким образом данный прототип с необходимыми доработками, повышающими точность перемещений, представляет собой работоспособное решение, сочетающее в себе компактность учебной модели.

Выводы

Создан прототип робота-манипулятора, рассмотрены его возможности и характеристики, разработана имитационная модель отражающая реальную работу манипулятора, а также, посредством сравнительного анализа, обоснована возможность использования проекта в научной и учебной деятельности.

Перечень ссылок

1. Chris Annin, AR4-MK3 Robot Manual Free Design 6 axis robot, Build Manual Version 1.8, 13 ноября 2025 г.[Электронный ресурс]:URL: <https://github.com/Annin-Robotics/ar4-hmi>.
2. Калиниченко, Б. А. Разработка виртуальной модели роботаманипулятора в среде ros / Б. А. Калиниченко, Д. В. Бажутин // Инновационные перспективы Донбасса : Сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 27–29 мая 2025 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 48-52. – EDN MNRSUZ.

УДК 62-503.57

АДАПТИВНОЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ КАК МЕТОД АДАПТАЦИИ ШАССИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

А.В. Мишин, А.В. Молчанов

Автономная некоммерческая организация высшего образования
Московский университет "Синергия",
г. Москва.

Аннотация: Рассматривается применение метода модельно-прогнозирующего управления (МРС) для адаптации шасси мобильного робота к рельефу и внешним воздействиям. Предложен подход к созданию системы управления на базе МРС, повышающий устойчивость и проходимость, показана эффективность такого подхода. Решение актуально для задач геологоразведки и нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: модельно-прогнозирующее управление, мобильный робот, адаптивное шасси, интеллектуализация, управляемая подвеска, неструктурированная местность.

Annotation: The paper considers the application of model predictive control (MPC) for adapting a mobile robot's chassis to terrain variations and external disturbances. A control system based on MPC is proposed, enhancing stability and mobility, with the effectiveness of the approach demonstrated through analysis. The solution is relevant for geological exploration and oil and gas industry applications.

Keywords: model predictive control, mobile robot, adaptive chassis, intelligent control, active suspension, unstructured terrain.

Введение

Современные технологии активно внедряются в сферы, традиционно связанные с труднодоступными и опасными для человека условиями — геодезия, геологоразведка, разведка и добыча углеводородов. В этих областях всё большее значение приобретают автономные мобильные роботы, способные выполнять задачи разведки, мониторинга, картографирования и сбора данных в условиях сложного рельефа и изменяющейся внешней среды. Эффективность таких систем напрямую зависит от их способности адаптироваться к внешним воздействиям, что требует перехода от жёстких конструкций

и предопределённых алгоритмов к интеллектуальным, адаптивным системам управления.

Особую роль в этом процессе играют интеллектуальные методы компенсации неопределённостей, возникающих из-за непредсказуемости рельефа, динамических внешних возмущений и параметрической нестабильности технических систем. Современные подходы к управлению всё чаще опираются на алгоритмы, способные не только реагировать на изменения, но и прогнозировать их влияние, корректируя поведение системы в режиме реального времени [1].

Одним из ключевых элементов мобильного робота, определяющих устойчивость и проходимость, является его шасси. Современные конструкции включают управляемую подвеску и индивидуальные тяговые и рулевые приводы каждого колеса, что даёт широкие возможности для динамической адаптации. Однако реализация этих возможностей требует сложных алгоритмов управления, способных предсказывать поведение системы и корректировать управляющие воздействия с учётом ограничений, изменяющихся условий и перекрёстных связей между подсистемами шасси. В этом качестве перспективным представляется метод модельно-прогнозирующего управления (МРС), который активно используется в робототехнике и автономных транспортных системах благодаря возможности использовать расчётные динамические модели, учитывать физические ограничения и оптимизировать поведение на некотором горизонте времени [2].

Цель данной работы – предложить и обосновать подход к применению метода модельно-прогнозирующего управления для адаптации шасси мобильного робота к изменяющимся внешним условиям. Новизна заключается в применении метода модельно-прогнозирующего управления для комплексной адаптации шасси мобильного робота с учётом непрогнозируемых внешних воздействий и перекрёстных связей между управляемой подвеской и индивидуальными приводами колёс. Подход позволяет перейти от реактивного управления параметрами шасси к предиктивному, что расширяет возможности автономных роботов в сложных условиях.

Модельно-прогнозирующее управление

Модельно-прогнозирующее управление (МРС) — это метод, основанный на использовании математической модели динамики системы для предсказания её поведения на конечном горизонте времени. На каждом шаге алгоритм решает задачу оптимизации, выбирая управляющие воздействия, которые минимизируют отклонение от целевой траектории с учётом физических ограничений.

В системе управления мобильного робота алгоритм модельно-прогнозирующего управления может использовать данные о текущем состоянии адаптивного шасси для прогнозирования движения и определения наиболее эффективных управляющих сигналов. Теория применения МРС описана в работах по интеллектуальным системам управления [2]. Показано, что на каждом шаге управления МРС в общем виде выполняет следующие операции:

- получение данных о текущем состоянии и положении шасси;
- прогнозирование поведения шасси на заданном горизонте времени с помощью его математической модели;
- решение задачи оптимизации с учётом ограничений, определение последовательности управляющих воздействий для минимизации целевой функции;
- применение к системе рассчитанных управляющих воздействий;
- повторение на следующем шаге операций с учётом обновлённых данных о состоянии шасси.

В условиях неопределённости такой подход может обеспечить шасси непрерывную адаптацию к изменяющимся внешним воздействиям и повысить устойчивость. Эффективность МРС при решении задач управления мобильными роботами подтверждена в ряде научных работ [3].

Анализ литературы также показывает, что модельно-прогнозирующее управление обеспечивает гибкий и эффективный инструмент для адаптации шасси мобильного робота к изменяющимся внешним условиям. При использовании в системе управления такой подход позволяет не только стабилизировать положение шасси, но и целенаправленно управлять динамикой взаимодействия с опорной поверхностью, предотвращая потерю сцепления или устойчивости, а также повышая проходимость мобильного робота.

Адаптация шасси к внешним воздействиям

Обеспечение устойчивости, стабилизация положения корпуса, а также оптимизация взаимодействия колёс робота с грунтом являются одними из ключевых задач при движении в условиях неопределённости. Эти задачи решаются через модернизацию конструкции шасси и системы управления. Так, например, внедрение управляемой подвески позволяет динамически изменять клиренс, углы наклона корпуса, жёсткость и демпфирование, что значительно повышает проходимость и устойчивость шасси при движении по неровностям, крутым склонам и слабонесущим грунтам.

Система управления шасси при этом должна не только реагировать на изменяющиеся внешние воздействия, но и прогнозировать их, действуя на упреждение. Оптимизируя параметры шасси под прогнозируемые условия, система управления может минимизировать ударные воздействия, предотвратить возникновение резонансных явлений, а также сохранить сцепление колёс с грунтом и обеспечить устойчивость. При решении этой оптимизационной задачи МРС становится мощным инструментом, позволяющим одновременно использовать данные с датчиков и динамическую модель движения шасси.

Современные исследования наглядно демонстрируют эффективность использования МРС в системах управления колёсными мобильными роботами, адаптивные шасси которых способны анализировать состояние опорной поверхности и корректировать параметры подвески в реальном времени [4]. Представленные в научной литературе результаты показывают, что подобные системы обеспечивают повышенную проходимость и устойчивость при движении по пересечённой местности по сравнению с роботами, имеющими жёсткую подвеску.

Ожидаемые преимущества подхода

В данной работе определено направление дальнейшего исследования и разработки алгоритма системы управления адаптивным шасси мобильного робота с использованием модельно-прогнозирующего управления. На текущем этапе проводится разработка математической модели шасси, имитационные испытания ещё не проводились. Поэтому потенциальные преимущества предложенного подхода могут быть оценены на основе анализа опыта применения модельно-прогнозирующего управления в робототехнике.

Исследования [3, 4] показывают, что МРС эффективно снижает отклонение от заданной траектории и повышает устойчивость при движении по пересечённой местности. Использование прогнозирующего управления совместно с адаптивной подвеской, приводом и рулевым управлением всех колёс позволяет ожидать следующих преимуществ:

- повышения точности траекторного слежения и курсовой устойчивости;
- снижения риска опрокидывания на склонах, неровностях и при движении в повороте;
- уменьшения динамических нагрузок на механические узлы;
- увеличения срока службы шасси и приводов;

– расширения диапазона проходимости в условиях слабонесущих и деформируемых грунтов.

Таким образом, предложенный подход к построению систем управления представляет научный и практический интерес для создания автономных мобильных роботов, действующих в условиях повышенной неопределённости внешней среды. Подход может быть востребован, в частности, в нефтегазовой отрасли, где всё активнее внедряются роботизированные комплексы для мониторинга трубопроводов, инспекции скважин и обследования труднодоступных участков месторождений [5].

Заключение

В работе рассмотрен концептуальный подход к адаптации шасси мобильного робота к внешним воздействиям на основе модельно-прогнозирующего управления. Показано, что интеграция MPC с управляемой подвеской и индивидуальными приводами колёс позволяет учитывать динамические ограничения и изменяющиеся условия рельефа, обеспечивая потенциальное повышение устойчивости, проходимости и точности навигации. Предложенный подход может быть востребован в задачах геодезии, геологоразведки и нефтегазовой отрасли, где критичны автономность и надёжность роботизированных систем. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой имитационной модели и её верификацией на основе натурных данных.

Перечень ссылок

1. Игнатьев В.В. Компенсация разных типов неопределённостей при управлении техническим объектом с помощью интеллектуальных регуляторов // Программные продукты и системы. — 2023. — Т. 36, № 3. — С. 423–431.
2. Богуславский А.А., Боровин Г.К., Карташев В.А. и др. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления. — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. — 228 с. — ISBN 978-5-98354-050-7.
3. Тачков А.А., Козов А.В., Курочкин С.Ю. и др. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. — 2022. — Т. 10, № 1. — С. 43–54.
4. Мещеряков В.Н., Кондратьев С.Е. Система управления модели четырёхколёсного мобильного робота с амортизирующим шасси и анализ ее функционирования // Успехи кибернетики. — 2024. — Т. 5, № 4. — С. 59–66.
5. Корневская А.В., Пшиншев Х.А. Роботизация процессов в нефтегазовой отрасли российской федерации // Геополитика и экогеодинамика регионов. — 2020. — Т. 6, № 4. — С. 281–289.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДУГОВЫХ ПРОБОЕВ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

А.Д. Мых, И.А. Бершадский, А.В. Згарбул
ФГБОУВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, ДНР

Аннотация: В работе рассмотрена проблема повышения эффективности устройств защиты от дугового пробоя в электроустановках зданий. Предложен алгоритм обнаружения дуговых замыканий на основе дискретного вейвлет-преобразования сигнала тока, реализованный в устройстве УЗДП-В. Проведены экспериментальные исследования и сравнительный анализ работы традиционного УЗДП и разработанного устройства при различных типах нагрузок и характере искрения. Установлено, что применение вейвлет-анализа позволяет повысить надежность обнаружения дугового пробоя и сократить время срабатывания защиты.

Ключевые слова: дуговой пробой, УЗДП, вейвлет-преобразование.

Annotation: The paper considers the problem of increasing the efficiency of arc-break protection devices in building electrical installations. An algorithm for detecting arc-break faults based on discrete wavelet transform of the current signal is proposed, which is implemented in the UZDP-V device. Experimental studies and a comparative analysis of the traditional UZDP and the developed device are conducted under various types of loads and sparking patterns. It is established that the use of wavelet analysis improves the reliability of arc-break detection and reduces the time required for protection activation.

Keywords: arc breakdown, ultrasonic diagnostics, wavelet transformation.

Рост количества пожаров, вызванных аварийными режимами работы электроустановок, определяет актуальность совершенствования устройств защиты от дугового пробоя (УЗДП). По статистике МЧС России доля пожаров, связанных с аварийными режимами работы электросетей и оборудования, увеличилась с 22 % до 43 % за период 2009–2023 гг. Более 83 % подобных возгораний возникают в кабельных линиях, розетках и контактных соединениях [1]. Одной из основных причин является дуговой пробой, сопровождающийся локальным перегревом и искрением [2].

Традиционные устройства защиты от дугового пробоя обладают рядом недостатков: снижением чувствительности при увеличении длины линии, сложностью распознавания нестабильных дуговых процессов и высокой вероятностью ложных срабатываний при наличии помех от бытовых нагрузок. В связи с этим предложен алгоритм обнаружения дугового пробоя, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании сигнала тока [3-7].

Разработанное устройство УЗДП-В реализовано на базе микроконтроллера STM32F411CEU6. Алгоритм использует вейвлет-преобразование Daubechies db4 и анализ коэффициентов детализации сигнала тока. Обработка сигнала выполняется при частоте дискретизации 20 кГц, что обеспечивает достаточную точность обнаружения дуговых процессов при умеренной вычислительной нагрузке. Для повышения помехоустойчивости применены дополнительные критерии отстройки от фоновых помех, создаваемых диммерами, щеточными электродвигателями и импульсными источниками питания [6, 7].

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном испытательном стенде с использованием различных бытовых нагрузок: утюга, электрического камина, пылесоса и дрели. Испытывались режимы искрения типа «графит–медь», «медь–медь» и ослабленного контакта в розеточном соединении. Выполнено сравнение серийного УЗДП и разработанного УЗДП-В при длине линии 1 и 10 м.

Результаты показали, что применение вейвлет-анализа позволяет повысить эффективность обнаружения дугового пробоя. В ряде режимов время срабатывания УЗДП-В оказалось в 2–5 раз меньше по сравнению с традиционным устройством. При увеличении длины линии серийное УЗДП в отдельных случаях не обеспечивало отключение цепи, тогда как УЗДП-В сохраняло устойчивую работоспособность. Наиболее заметное преимущество разработанного устройства проявилось при обнаружении нестабильных дуговых процессов и искрения в контактных соединениях.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов вейвлет-анализа в системах защиты электроустановок зданий и позволяют рекомендовать дальнейшее развитие алгоритмов интеллектуального обнаружения дуговых пробоев для повышения пожарной безопасности жилых и общественных объектов.

Выводы

1. Подтверждена высокая актуальность совершенствования устройств защиты от дугового пробоя, обусловленная устойчивым ростом количества пожаров, вызванных аварийными режимами работы электроустановок жилых и общественных зданий.
2. Разработан алгоритм обнаружения дугового пробоя на основе дискретного вейвлет-преобразования сигнала тока, реализованный в устройстве УЗДП-В на базе микроконтроллера STM32F411CEU6. Алгоритм обеспечивает эффективное выделение признаков дугового пробоя и отстройку от фоновых помех бытовых нагрузок.

Перечень ссылок

1. Center for Fire Statistics/ World Fire Statistics. Report №30.
2. Пехотиков В.А. Перспективы и проблемы применения устройств защиты от дугового пробоя / В.А. Пехотиков, Г.И. Смелков, А.И. Рябиков, А.А. Назаров // Безопасность труда в промышленности. 2019. №11. С. 18-23.
3. P. Müller, S. Tenbohlen, R. Maier, M. Anheuser Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain // IEEE 56th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). 2010. DOI:10.1109/HOLM.2010.5619539.
4. Lezama J., Schweitzer P., Weber S., Tisserand E., Joyeux P. Arc fault detection based on temporal analysis // 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). 2014. DOI: 10.1109/HOLM.2014.7031017.
5. Q. Yu, Y. Hu, and Y. Yang, A review of low voltage AC series arc fault detection, Low Voltage Appar., 586 (2020), 24. <https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2020.01.004>.
6. Z. Wang, S. McConnell, R. S. Balog, J. Johnson, Arc fault signal detection-fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data, in 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), (2014), 3239–3244. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925625>.
7. S. Zhang, N. Qu, T. Zheng, C. Hu, Series arc fault detection based on wavelet compression reconstruction data enhancement and deep residual network, IEEE Trans. Instrum. Meas., 71(2022), 1–9. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3158990>.

УДК 333.333

РАЗРАБОТКА УЧЕБНОГО СТЕНДА ДЛЯ ТЕРМИНАЛА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ БМРЗ-152-КСЗ

Н.Н. Малышева, А.А. Житинская, Д.А. Соловьян, Д.В. Каримов
ФГБОУ ВО «НИЖНЕВАРТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ», г. Нижневартовск, ХМАО

Аннотация: В данной работе рассматривается разработка учебного стенда для терминала релейной защиты БМРЗ-152-КСЗ, предназначенного для практического изучения принципов работы микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в энергосистемах. Что позволит моделировать реальные процессы в электрических сетях напряжением 6–35 кВ, отрабатывать навыки настройки и диагностики защит.

Ключевые слова: терминал, релейная защита и автоматика, стенд, настройки.

Annotation: This paper discusses the development of a training bench for the BMRZ-152-KSZ relay protection terminal, designed for practical study of the principles of operation of microprocessor-based relay protection and automation devices (RPA) in power systems. This will allow you to simulate real processes in electrical networks with a voltage of 6-35 kV, to practice the skills of setting up and diagnosing protections.

Keywords: Terminal, relay protection and automation, stand, settings.

В соответствии с цифровой трансформацией России в области образования становится актуальным использование цифровых технологий для решения практических задач. Использование микропроцессорных терминалов (МТ) позволяет смоделировать стенд и разобраться в работе устройств релейной защиты. На базе данного терминала сконструирован экспериментальный стенд, который обеспечивает доступность работы с блоком, возможность эксплуатации блока в реальных условиях работы. Основу стенда занимает стальной каркас блока с лицевой панелью (рисунок 1), на которой располагаются элементы сигнализации (светодиоды), элементы управления (ключ управления), а также автоматический выключатель от которого осуществляется питание терминала. Все выходные контакты терминала релейной защиты выведены на клеммное устройство, обеспечивающее доступ ко всем цепям защит

для подключения проверочных устройств.

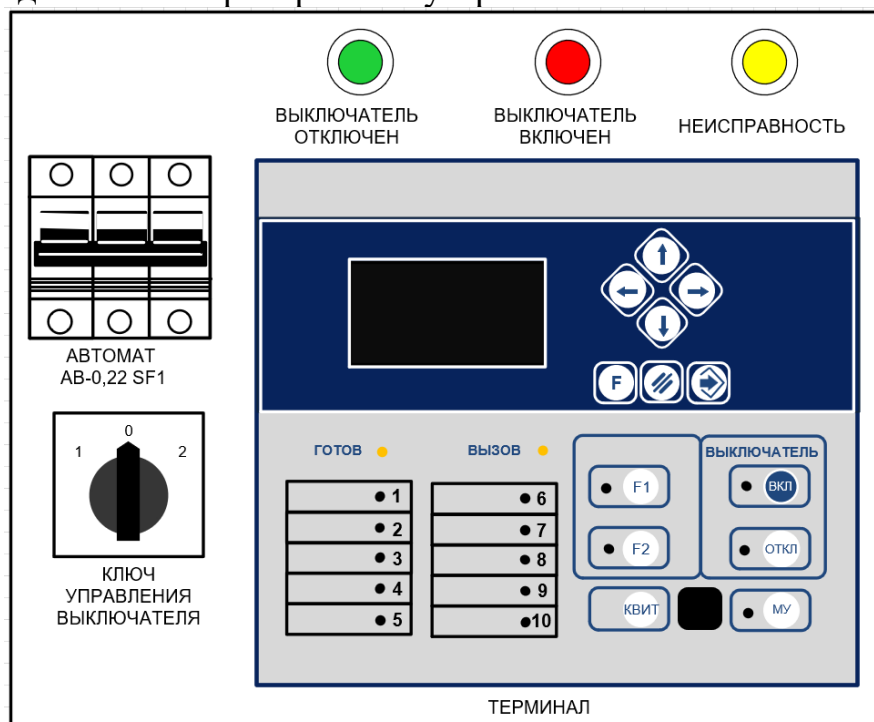


Рисунок 1 – Лабораторный стенд

МТ БМР3-152-КСЗ предназначен для защиты и ликвидации КЗ на отходящих линий 6-10кВ энергетических объектов. Устройство выполняет функции защиты и автоматики, сигнализации, а также самодиагностики. Правильность работы блока определяется контролем параметров сети (тока и напряжения), по которым устройство определяет наличие отклонений или повреждений в нормальной работе энергосистемы в защищаемой точке.

Схема подключения выполнена в соответствии с инструкцией по эксплуатации и требованиями к организации учебного стенда для изучения принципа работы микропроцессорного устройства.

При выполнении работ с терминалом необходимо подать питание на стенд включив АВ-0,22 SF1 «Автомат питания терминала». Блок обеспечивает контроль положения выключателя, а также исправности его цепей управления. Для имитации положения выключателя используется реле РП-11, которое подключается к выходным контактам терминала.

В блоке предусмотрено три режима управления. Управление выключателем возможно только в одном режиме управления в один момент времени:

- местное управление кнопками на пульте (МУ);
- дистанционное управление по дискретным сигналам ДУ;

– дистанционное управление по сигналам АСУ.

Изменение режима "Местное" - "Дистанционное" происходит при нажатии кнопки "МУ" на лицевой панели пульта. Сигнализация активного местного управления осуществляется светодиодом "МУ" на лицевой панели пульта. Местное управление выключателем осуществляется с кнопок "ВКЛ" и "ОТКЛ" на лицевой панели пульта. Команда на включение выключателя формируется при замыкании выходного реле К2 «включить» и на отключение при замыкании К1 (рисунок 2).

Контролировать положение выключателя можно за счет загорания светодиодов блока, а также на элементы сигнализации стенда.

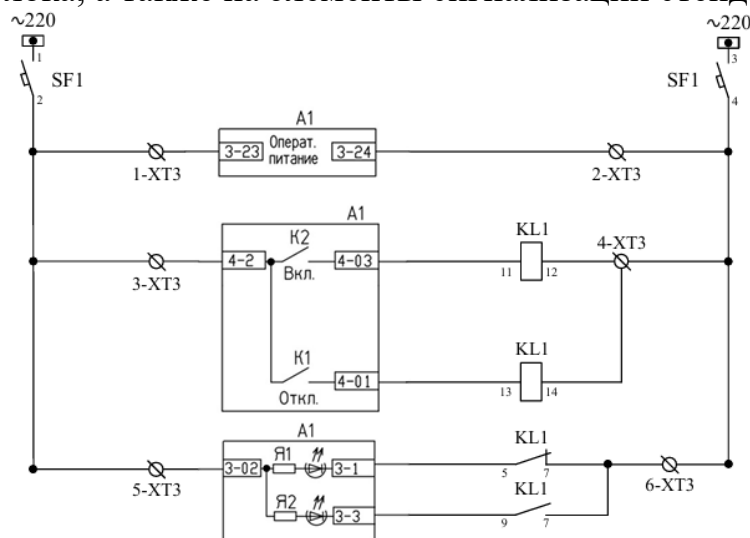


Рисунок 2 – Цепи управления

Для работы защит терминала, к нему подводят вторичные обмотки измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) в соответствии со схемами (рисунки 3;4). ТТ принимают сигналы от внешних устройств, обеспечивают гальваническую развязку цепей РЗА, снижают ток до измеряемых величин и передают сигнал в блок аналого-цифрового преобразователя. Сигналы из логической части устройства поступают в исполнительную, где расположены выходные реле, включенные в цепи внешних коммутационных устройств.



Рисунок 3 – Максимальная токовая защита и защита от замыканий на землю на стороне 6(10)кВ.

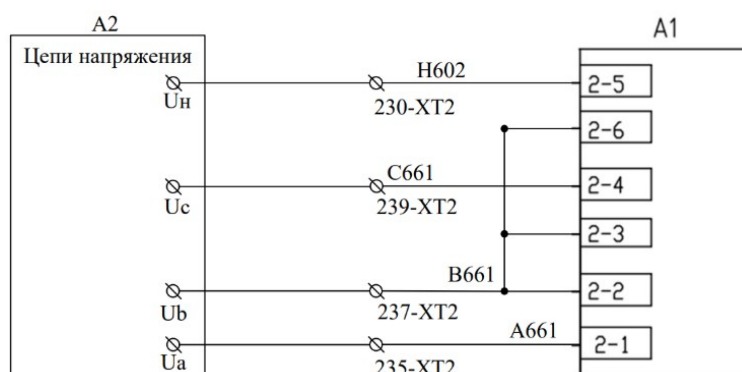


Рисунок 4 – Контроль $3U_0$, пуск по напряжению МТЗ

Помимо светодиодов на самом терминале контролировать положение выключателя осуществляется, подведенными к терминалу лампами (рисунок 5):

- красная (выключатель включен);
- зеленая (выключатель отключен);
- белая (неисправность терминала);

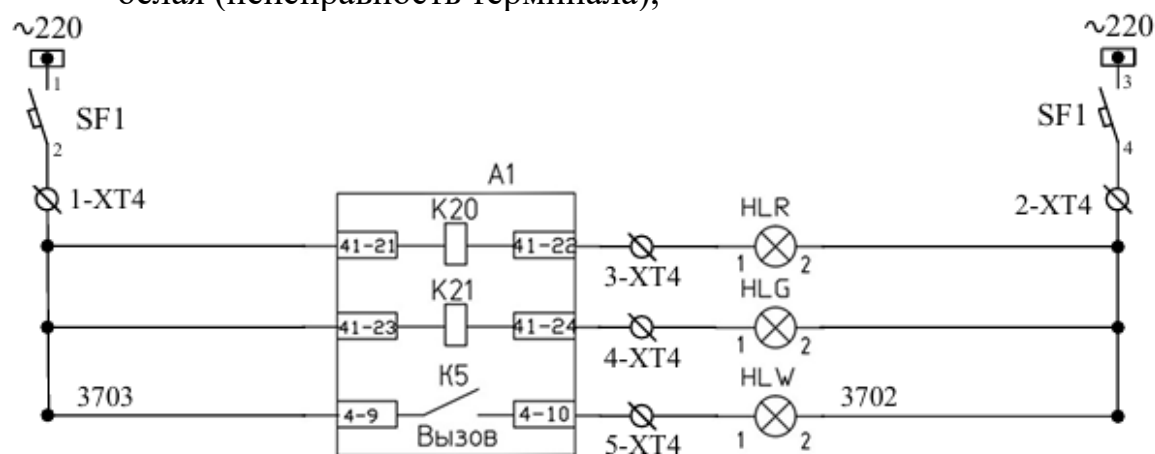


Рисунок 5 – Цепи сигнализации

На данном терминале будет рассмотрена работа следующих защит:

- Токовая отсечка (ТО);
- Максимальная токовая защита (МТЗ);
- Защита от замыканий на землю;
- Ускорение МТЗ.

Для этого в терминале задаются уставки защит и при помощи установки РЕТОМ-21 подается ток для проверки правильности работ защит. В таблице 1 приведены уставки по току и времени и

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

фактическое срабатывания защит, действующие на отключение выключателя.

Таблица 1

Тип защит	Уставка, А	Уставка, сек	Срабатывание, А	Срабатывание, сек
ТО	5	0,00	5,07	0,00
МТЗ 1ст	2,5	0,5	2,61	0,511
МТЗ 2ст	3,0	0,8	3,05	0,823
УМТЗ	2,5	0,15	2,52	0,1502
ОЗЗ	0,08	7	На сигнал	На сигнал

Данный стенд разработан для знакомства с микропроцессорным блоком, изучением схем работы защит отходящих линий 6-10 кВ, отработывании навыков задавания уставок срабатывания защит, проверки и тестирования терминала, исследования поведение защиты в разнообразных аварийных режимах работы сети, тестирования дискретных входов/выходов, анализа осциллограмм аварийных процессов, записанных блоком, чтения и анализа журналов событий и аварий.

Учебный стенд с терминалом БМРЗ-152-КСЗ предназначен для практического изучения принципов работы микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) в энергосистемах. Он позволяет моделировать реальные процессы в электрических сетях напряжением 6–35 кВ, отрабатывать навыки настройки и диагностики защит, также позволяет получить практические навыки по проверке защит с помощью испытательных устройств РЕТОМ.

Дает возможность приобрести практические компетенции, внедрение промышленных образцов микропроцессорной релейной защиты в образовательный процесс, и формирование представления о конструкции, функциональных возможностях устройств релейной защиты.

Перечень ссылок

1. Чернобровов Н. В. Релейная защита // Н. В. Чернобровов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: ЁЁ Медиа, 2026. — 131-163 с.
2. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-152-КСЗ-41. Руководство по эксплуатации // ООО «НТЦ Механотроника» — 2024. — 5-69 с.
3. Релейная защита распределительных сетей 6–10 кВ. Расчёт уставок: методические указания / СТО ДИВГ-059-2025 // ООО «НТЦ Механотроника» — 2025. 52-67 с.

УДК 681.532.8

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ ТРЕХКОЛЕСНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА БАЗЕ ESP - 32 CAM

Д.К. Москвин, Д.Н. Мирошник
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: В работе рассматривается разработка системы управления верхнего уровня для наземного трехколесного мобильного робота всенаправленного движения на базе модуля ESP-32 CAM. Рассмотрены особенности конструкции робота, принципы кинематики всенаправленного движения, структура системы управления и программная реализация алгоритмов управления приводами. В результате разработан и испытан экспериментальный образец робота, подтверждающий эффективность применения ESP-32 CAM в качестве системы верхнего уровня управления и передачи видеоданных.

Ключевые слова: мобильный робот, ESP-32 CAM, всенаправленное движение, омни-колеса, дистанционное управление.

Annotation: The paper discusses the development of a high-level control system for a ground-based three-wheel omnidirectional mobile robot based on the ESP-32CAM module. The design features of the robot, the principles of omnidirectional motion kinematics, the structure of the control system, and the software implementation of drive control algorithms are considered. As a result, an experimental prototype of the robot was developed and tested, confirming the effectiveness of using the ESP-32CAM as a high-level control and video data transmission system.

Keywords: mobile robot, ESP-32 CAM, omnidirectional motion, omni wheels, remote control.

Постановка задачи. Современные мобильные робототехнические системы находят широкое применение в промышленности, логистике, интеллектуальных транспортных системах, складской автоматизации и научных исследованиях. Особый интерес представляют роботы всенаправленного движения, способные перемещаться в произвольном направлении без изменения ориентации корпуса, что существенно повышает маневренность платформы и эффективность работы в ограниченном пространстве [1].

Одним из перспективных направлений развития мобильной робототехники является использование компактных и энергоэффективных микроконтроллерных систем, обеспечивающих дистанционное управление, обработку сигналов датчиков и передачу видеоданных. В данной работе в качестве системы верхнего уровня управления используется модуль ESP-32 CAM, совмещающий функции беспроводной связи и видеонаблюдения.

Целью работы является разработка и исследование системы управления верхнего уровня мобильным роботом на базе трехколесного мобильного робота всенаправленного движения, а также экспериментальная проверка работоспособности разработанной платформы для последующего применения в научно-исследовательских и образовательных проектах.

Объектом исследования является мобильная робототехническая платформа с тремя омни-колесами, расположенными под углом 120° друг к другу. Такая конфигурация обеспечивает возможность реализации всенаправленного движения, включая перемещение вперед, назад, боковое движение и вращение вокруг собственной оси.

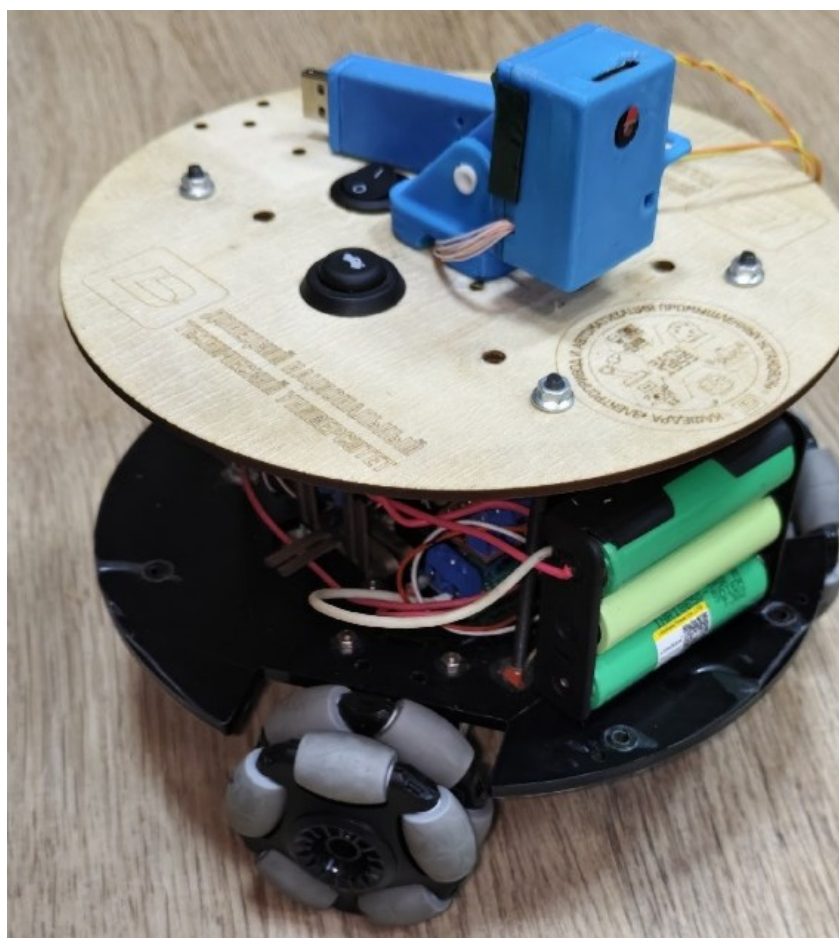


Рисунок 1 – Внешний вид омни-робота.

В качестве приводов используются двигатели постоянного тока JGB37-520 с энкодерами, обеспечивающими обратную связь по скорости вращения колес. Управление приводами осуществляется микроконтроллером STM32F401, выполняющим обработку сигналов энкодеров, формирование ШИМ-сигналов и реализацию алгоритмов регулирования скорости.

В данной работе добавлен модуль ESP-32CAM, использующийся в качестве системы управления верхнего уровня. Программирование модуля осуществлялось в интегрированной среде разработки Arduino IDE с использованием встроенных библиотек для организации Wi-Fi соединения, веб-сервера и передачи видеопотока. Пользовательский интерфейс реализован в виде web-страницы с кнопками управления движением робота и окном отображения изображения с камеры в режиме реального времени. Передача управляющих команд выполняется по беспроводной сети Wi-Fi, что обеспечивает возможность дистанционного управления платформой с персонального компьютера или мобильного устройства.

Для разработки алгоритмов управления и моделирования движения использовался пакет прикладных программ Matlab/Simulink с библиотекой Waijung [2]. Применение библиотеки Waijung обеспечило реализацию модельно-ориентированного подхода к проектированию встроенной системы управления. Это позволило выполнять предварительную проверку алгоритмов на этапе моделирования и автоматически генерировать программный код для микроконтроллера STM32.

Использование модельно-ориентированного подхода существенно сократило время разработки программного обеспечения, уменьшило вероятность ошибок ручного программирования и упростило настройку периферийных модулей микроконтроллера, включая таймеры, ШИМ-каналы и обработку сигналов энкодеров. Кроме того, применение Matlab/Simulink повысило наглядность разработки и обеспечило соответствие результатов моделирования поведению реального прототипа.

Выводы:

В ходе работы была разработана и внедрена система управления верхнего уровня трехколесным роботом на базе ESP-32 CAM. Экспериментальные испытания показали, что робот способен перемещаться вперед, назад, вбок и вокруг своей оси дистанционно. Также была подтверждена работоспособность алгоритмов управления скоростью колес, корректность расчета управляющих воздействий на основе кинематической модели и устойчивость движения платформы.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Также была подтверждена корректность работы системы дистанционного управления через Wi-Fi сеть и устойчивость передачи видеопотока с камеры ESP-32CAM. Разработанная система обеспечивает оператору возможность удаленного управления платформой и визуального контроля окружающего пространства в режиме реального времени.

Перспективы дальнейших исследований связаны с внедрением алгоритмов компьютерного зрения для создания замкнутых систем управления с учётом ориентации и препятствий. Это позволит более точно определять положение робота в пространстве и сделает возможным автоматическое движение робота при наличии определенных объектов в окружающем пространстве.

Перечень ссылок

1. Жук, О. Е. Решение задачи обратной кинематики для управления положением трехколесного робота всенаправленного движения / О. Е. Жук, Д. Н. Мирошник // Сборник научно-методических работ : Материалы Первой Всероссийской научно-методической конференции, Донецк, 28–29 мая 2025 года. Выпуск 14. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2025. – С. 68-74. – EDN FPIYKA.

2. Жук, О. Е. Разработка прототипа трехколесного робота всенаправленного движения / О. Е. Жук // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов Тридцать первой международной научно-технической студентов и аспирантов, Москва, 13–15 марта 2025 года. – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2025. – С. 1224. – EDN RSZGMF.

УДК 622.311

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЕЙБУЛЛА НА КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТОВ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД**

А.Н. Назарычев, Д.Д. Манукян
ФГБОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМПЕРАТРИЦЫ ЕКАТЕРИНЫ II» г. Санкт-Петербург

Аннотация: В статье исследовано влияние параметров распределения Вейбулла на комплексный показатель эксплуатации электроагрегатов электростанций собственных нужд. Предложена зависимость, объединяющая индекс технического состояния, сработанный технический ресурс и риск нарушения работы. Показан максимум комплексного показателя эксплуатации в зависимости от наработки.

Ключевые слова: электростанции собственных нужд, электроагрегаты, индекс технического состояния, сработанный технический ресурс, риск нарушения работы, распределение Вейбулла, комплексный показатель эксплуатации.

Annotation.

The article investigates the influence of Weibull distribution parameters on the integrated operational indicator of power units at captive power plants. A relationship is proposed that combines the technical condition index, consumed technical resource, and operational disruption risk. The maximum of the integrated operational indicator is shown as a function of operating time.

Keywords: captive power plants, power units, technical condition index, consumed technical resource, risk of operational disruption, Weibull distribution, integrated operational index.

В условиях эксплуатации электроагрегатов (ЭА) электростанций собственных нужд (ЭСН) нефтегазовых предприятий значительная часть оборудования функционирует при повышенной степени износа. Это приводит к росту вероятности отказов (ВО) и снижению надежности электроснабжения технологических процессов [1]. При этом традиционные методы оценки надежности, основанные на статистике отказов, не учитывают фактическое техническое состояние (ТС) ЭА.

В современных условиях наблюдается переход к риск-

ориентированному управлению активами, в рамках которого требуется учитывать не только ВО, но и последствия отказов (ПО) [2]. Одним из наиболее распространенных показателей, характеризующих состояние ЭА, является индекс технического состояния (ИТС).

Вместе с тем остается открытым вопрос о том, каким образом параметры распределения отказов влияют на комплексные показатели, учитывающие ИТС. В частности, недостаточно исследовано влияние параметров распределения Вейбулла на результирующие показатели при различных уровнях износа ЭА.

Целью настоящей работы является анализ зависимости комплексного показателя эксплуатации (КПЭ) от параметров распределения Вейбулла в зависимости от наработки.

ИТС принимает значения в диапазоне от 0 до 100 [3].

Связь между ИТС s и наработкой r описывается линейной зависимостью:

$$s(r) = kr + s_0, \quad (1)$$

где k — коэффициент изменения ИТС во времени, принимающий значения k_1 для фактических условий эксплуатации и k_0 для нормативных условий эксплуатации, $[k] = 1/\text{ч}$; s_0 — начальное значение ИТС.

Связь между сработанным техническим ресурсом (ТР) CTR и наработкой r описывается интегралом:

$$CTR(r) = \int_0^r \frac{100 - s_{\text{факт}}(r)}{100 - s_{\text{ном}}(r)} dr = \frac{k_1}{k_0} r, \quad (2)$$

где $s_{\text{факт}}(r)$ — функция изменения ИТС при фактических условиях эксплуатации; $s_{\text{ном}}(r)$ — функция изменения ИТС при нормативных условиях эксплуатации.

Для описания уровня риска (УР) используется двухпараметрическое распределение Вейбулла. Связь между УР RL и наработкой r :

$$RL(r) = (1 - \exp \left[- \left(\frac{r}{\eta} \right)^\beta \right]) \cdot M[Y], \quad (3)$$

где β — коэффициент формы; η — коэффициент масштаба, $[\eta] = \text{ч}$; $M[Y]$ — математическое ожидание последствий отказа; $M[Y] = \text{у.е.}$

Комплексный показатель эксплуатации (КПЭ) IOI , учитывающий ИТС, сработанный ТР и УР, может быть определен как произведение составляющих по формулам (1) – (3):

$$IOI(r) = s(r) \cdot CTR(r) \cdot RL(r), \quad (4)$$

$$IOI(r) = \frac{k_1^2 r^2 + k_1 r s_0}{k_0} \cdot \left(1 - \exp\left[-\left(\frac{r}{\eta}\right)^\beta\right]\right) \cdot M[Y]. \quad (5)$$

Исходные значения $k_1 = -23,27 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч}$, $k_0 = -4,57 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч}$, $\beta = 1,65$, $\eta = 12\,267 \text{ ч}$, $M[Y] = 4500 \text{ у.е.}$, а также границы варьирования параметров β и η приняты согласно [4].

Функциональная зависимость КПЭ от наработки представлена на рисунке 5. Влияние параметров β и η на $IOI(r)$ представлено на рисунках 6 и 7 соответственно.

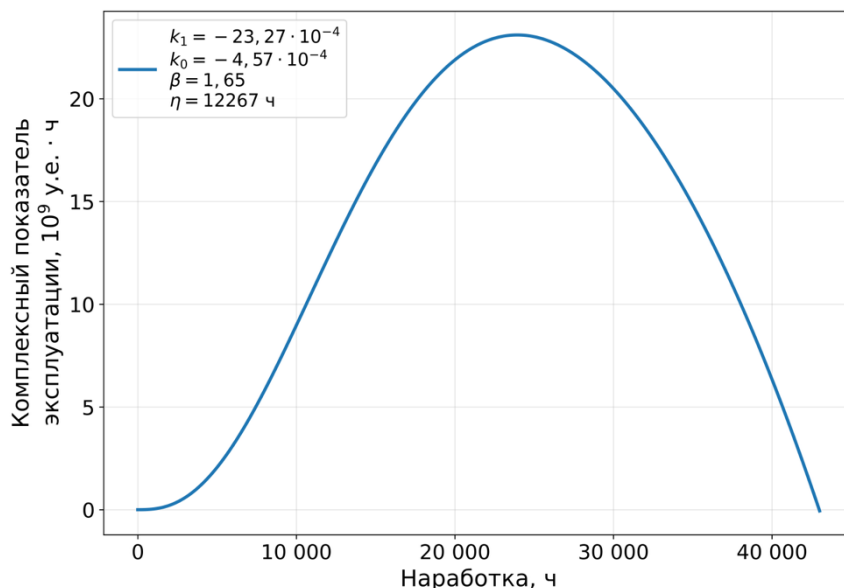


Рисунок 5 — Функциональная зависимость комплексного показателя эксплуатации от наработки

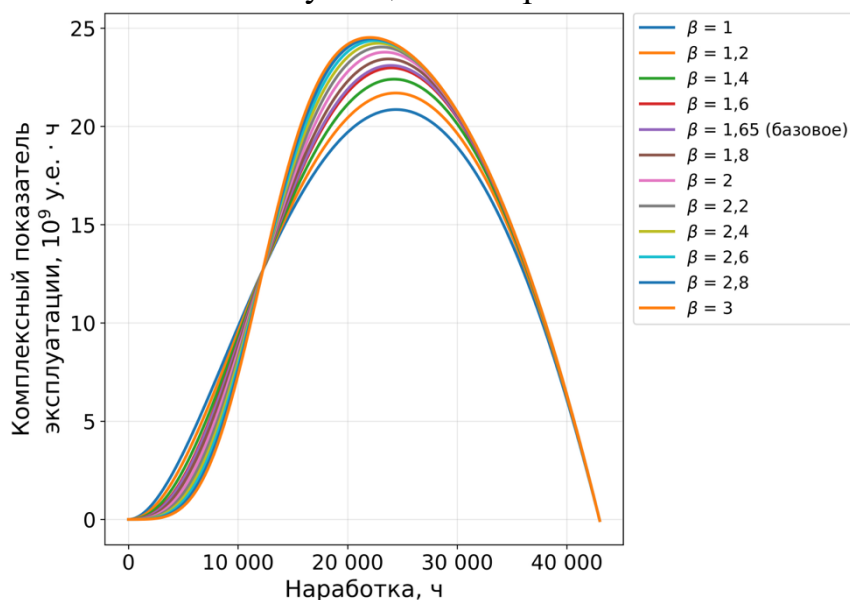


Рисунок 6 — Функциональная зависимость комплексного показателя эксплуатации от наработки при различных значениях коэффициента формы

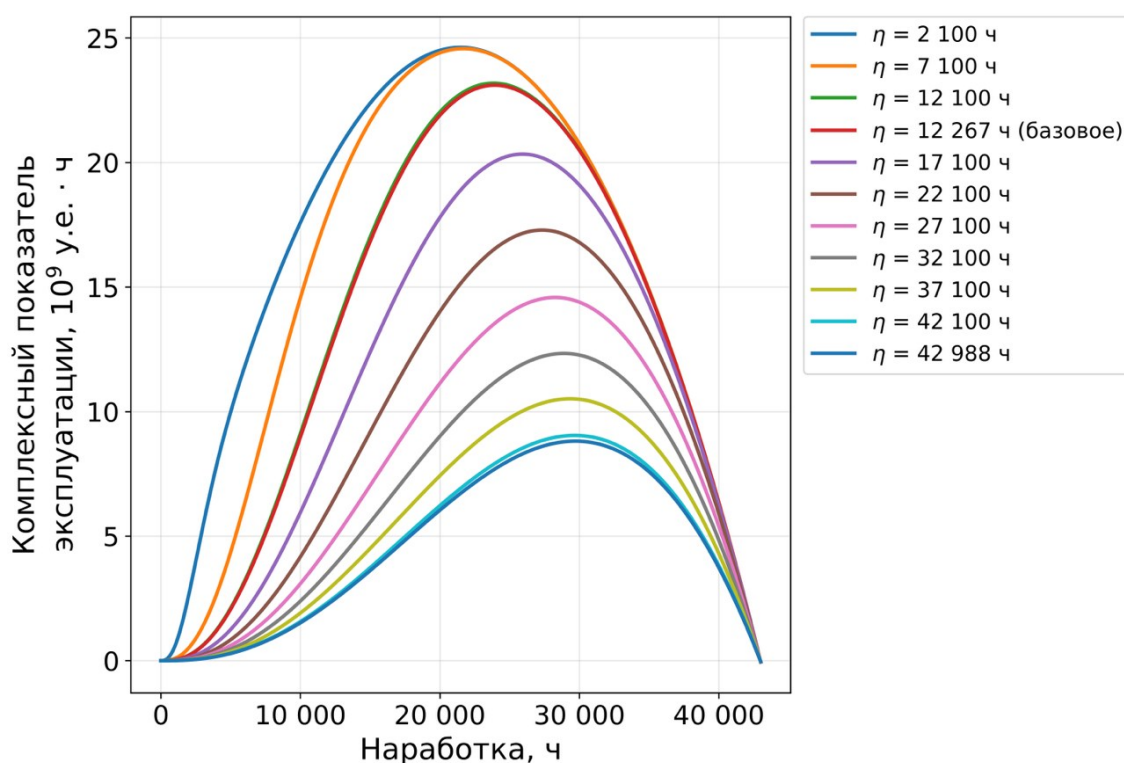


Рисунок 7 — Функциональная зависимость комплексного показателя эксплуатации от наработки при различных значениях коэффициента масштаба

Построенные зависимости показали, что $IOI(r)$ имеет выраженный максимум по наработке, что соответствует переходу от области накопления риска к области преобладающего влияния снижения ИТС.

Анализ влияния параметров распределения Вейбулла показал, что β оказывает ограниченное влияние на величину максимума IOI . При увеличении β наблюдается незначительный рост максимального значения IOI и изменение формы кривой, что связано с характером нарастания ВО. Более существенное влияние оказывает η : его увеличение приводит к снижению максимального значения IOI и смещению экстремума в область больших наработок. При малых значениях η риск реализуется быстрее, вследствие чего IOI принимает более высокие значения на ранних стадиях эксплуатации. Полученные зависимости подтверждают, что влияние η на IOI выше, чем влияние β , что наглядно показано на рисунках 2 и 3. Таким образом, параметр η является определяющим при анализе изменения IOI .

Выводы

Установлено, что КПЭ имеет выраженный максимум по наработке, который может рассматриваться как расчетный ориентир для планирования технических воздействий. Показано, что коэффициент формы оказывает умеренное влияние на величину показателя и в большей степени определяет форму зависимости, тогда как коэффициент масштаба существенно влияет как на уровень показателя, так и на положение его максимума, выступая доминирующим параметром. Учет параметров распределения Вейбулла позволяет повысить информативность оценки приоритета оборудования по сравнению с использованием только ИТС. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения КПЭ при реализации риск-ориентированного подхода к управлению надежностью ЭА.

Перечень ссылок

1. Токарев, И. С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности / И. С. Токарев // Записки Горного института. – 2025. – Т. 272. – С. 171-180. – EDN UIZSOQ.
2. Левин, В. М. Риск-ориентированный подход к выбору стратегии управления производственными активами энергетической компании / В. М. Левин, Н. П. Гужов, Д. А. Боярова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 29-42. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-29-42. – EDN DTMOPL.
3. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71779722/> (дата обращения 12.05.2026).
4. Модель оценки риска нарушения работы электроагрегатов электростанций собственных нужд на основе индекса технического состояния / А. Н. Назарычев, И. В. Леонтьев, О. С. Мельникова [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2026. – № 2(95). – С. 96-102. – DOI 10.65209/2218-3116-2026-2-95-96-102. – EDN JPSFJJ.

Назарычев А.Н. – профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», д-р. техн. наук;

Манукян Д.Д. – аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

УДК 620.97

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АВТОНОМНОМ ГИБРИДНОМ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЕ

М.Д. Нестеров, М.В. Бурмейстер, И.И. Бердышев,
Л.А. Веренцов, Ю.Д. Кавойков
ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ» г. Донецк, Россия

Аннотация: В статье исследовано влияние систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) на переходные процессы в автономных гибридных энергокомплексах (АГЭК). Для проведения исследования была разработана имитационная модель в *DIgSILENT PowerFactory*. Результаты проведенных опытов показали снижение отклонения частоты при использовании СНЭЭ.

Ключевые слова: регулирование частоты, СНЭЭ, АГЭК.

Annotation: The article examines the influence of electric power storage systems (BESS) on transients in autonomous hybrid energy complexes (AHEC). To conduct the research, a simulation model was developed at *DIgSILENT PowerFactory*. The results of the experiments showed a decrease in frequency deviation when using BESS.

Keywords: *frequency control, BESS, AHEC.*

Энергоснабжение изолированных территорий в настоящее время развивается, благодаря преобразованию традиционной генерации в АГЭК, объединяющие традиционные дизель-генераторные установки (ДГУ), газо-поршневые установки (ГПУ) и возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Так, с 2017 года реализуются проекты строительства АГЭК группой ПАО «РусГидро» («РАО Энергетические системы Востока», АО «Сахаэнерго» и другие) в децентрализованных энергоузлах, таких как Саха (Якутия) [1]. Особенности АГЭК являются:

- соизмеримость мощности отдельного генератора и всего АГЭК;
- чувствительность собственной генерации на основе ДГУ и ГПУ к набросам нагрузки;
- наличие крупной резкопеременной нагрузки.

В связи с этим возникает проблема сохранения работоспособности ДГУ и ГПУ, а также обеспечения динамической устойчивости АГЭК. Динамическая устойчивость АГЭК может быть нарушена из-за срабатывания собственных технологических защит ДГУ/ГПУ, предотвращающих влияние больших набросов или сбросов нагрузки на

генерирующие оборудование во время переходного процесса. Одним из способов решения данной проблемы является применение СНЭЭ в АГЭК, за счет демпфирования колебаний мощности и нивелирования провалов напряжения [2]. СНЭЭ уравнивает механические и электромагнитные моменты на валах ДГУ и ГПУ, что позволяет также реализовывать замещение вращающегося резерва при аварийных отключениях ДГУ и ГПУ [3].

Целью данной статьи является исследование влияния СНЭЭ на переходные процессы в АГЭК. Для достижения цели необходимо решить следующий ряд задач:

- 1) Изучить структуру существующих АГЭК. Определить технологические проблемы, возникающие в АГЭК.
- 2) Провести анализ источников и определить области применения СНЭЭ в АГЭК для решения технологических проблем.
- 3) Разработать имитационную модель СНЭЭ и тестового АГЭК.
- 4) Провести опыты по исследованию влияния СНЭЭ на переходные процессы в АГЭК.
- 5) Оценить влияние применения СНЭЭ на собственную генерацию АГЭК. Сделать заключение о технологическом эффекте от применения СНЭЭ в АГЭК.

Несмотря на преимущества внедрения ВИЭ в структуру изолированного энергоузла, эксплуатация АГЭК на промышленных предприятиях связана с рядом технологических проблем. Главным фактором является состав нагрузки промышленного предприятия, так как механизмы горнорудных и металлургических производств формирует резкопеременный характер энергопотребления. Из-за этого возникают следующие технологические проблемы:

- 1) Отключение ГПУ и ДГУ собственными технологическими защитами в переходных процессах, вызванных большими набросами и сбросами нагрузки (рисунок 1).
- 2) Влияние стохастичности ВИЭ. Резкое изменение погодных условий, например, набегающая на фотоэлектрические станции (ФЭС) облачность, приводит к секундным провалам генерации солнечных станций. Для АГЭК мгновенная потеря генерации ВИЭ физически эквивалентна мощному набросу нагрузки на ДГУ/ГПУ, что может нарушить динамическую устойчивость АГЭК.
- 3) Сверхнормативный износ оборудования и низкая экономическая эффективность.
- 4) Установлено, что наличие в промышленной сети тяжелых ударных нагрузок (экскаваторы, дробилки, дуговые печи) приводит к

глубоким просадкам частоты и напряжения и ускоренному износу дизель-генераторов, вынужденных работать в неэффективном режиме «горячего» резерва.

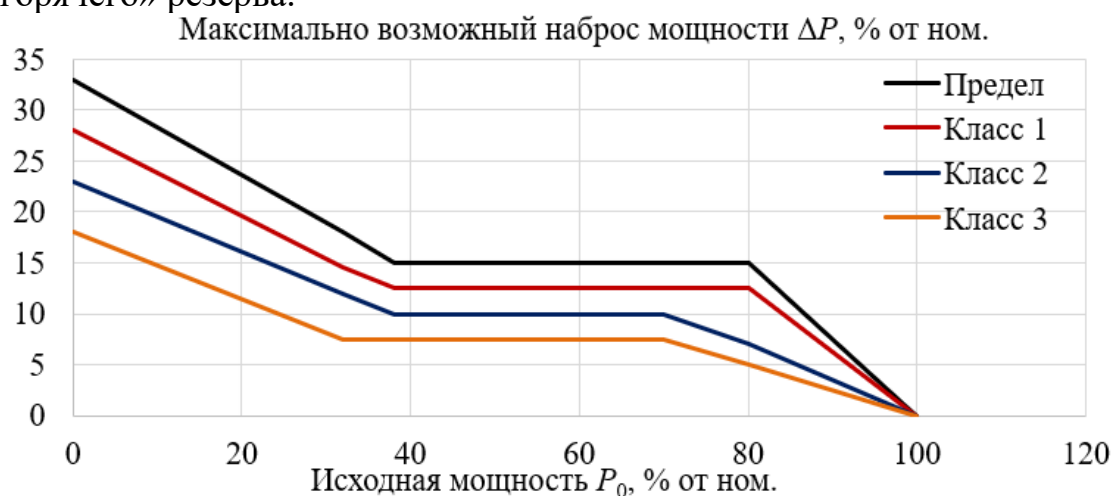


Рисунок 1 – Характеристика наброса мощности на ГПУ

Внедрение СНЭЭ переводит дизельные двигатели в стационарную зону максимального КПД и существенно снижает эксплуатационные затраты предприятия. Вместе с тем обоснованный выбор энергоёмкости накопителей и настройка алгоритмов управления преобразователей невозможны без предварительного исследования электромеханических переходных процессов, что обуславливает необходимость разработки компьютерной имитационной модели АГЭК в среде *DIgSILENT PowerFactory* (рисунок 2). Модель включает в себя восемь ДГУ номинальной мощностью 8 МВт (одна ДГУ в ремонте, одна в роли «горячего» резерва), СНЭЭ номинальной мощностью 1 МВт, ВЭУ IV типа номинальной мощностью 2 МВт. Нагрузка представляет собой два асинхронных двигателя, запускаемых прямым пуском, марки А4-450У-4МУЗ и набор нагрузок, представленных полными статическими характеристиками нагрузки (СХН).

Были проведены опыты по исследованию влияния СНЭЭ на переходные процессы в АГЭК, результаты которых представлены на рисунках 3 и 4. На основе результатов проведённых опытов дана оценка технологическому эффекту от применения СНЭЭ в АГЭК:

- Применение СНЭЭ позволяет снизить величину максимального отклонения частоты при прямом пуске крупного АД (включение дробилки).

- Применение СНЭЭ позволяет снизить величину максимального отклонения частоты при подключении крупной активной нагрузки (экскаваторного блока).

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

- При резком снижении ветрового давления на ВЭУ IV типа СНЭЭ позволяет снизить величину максимального отклонения частоты.
- СНЭЭ соразмерной мощности с ДГУ может использоваться в качестве обеспечения горячего резерва мощности.
- СНЭЭ позволяют снизить величину наброса мощности на ДГУ при прямом пуске крупного АД и при подключении крупной активной нагрузки.
- Применение СНЭЭ с данной САУ практически не влияет на напряжение на шинах ГРУ.

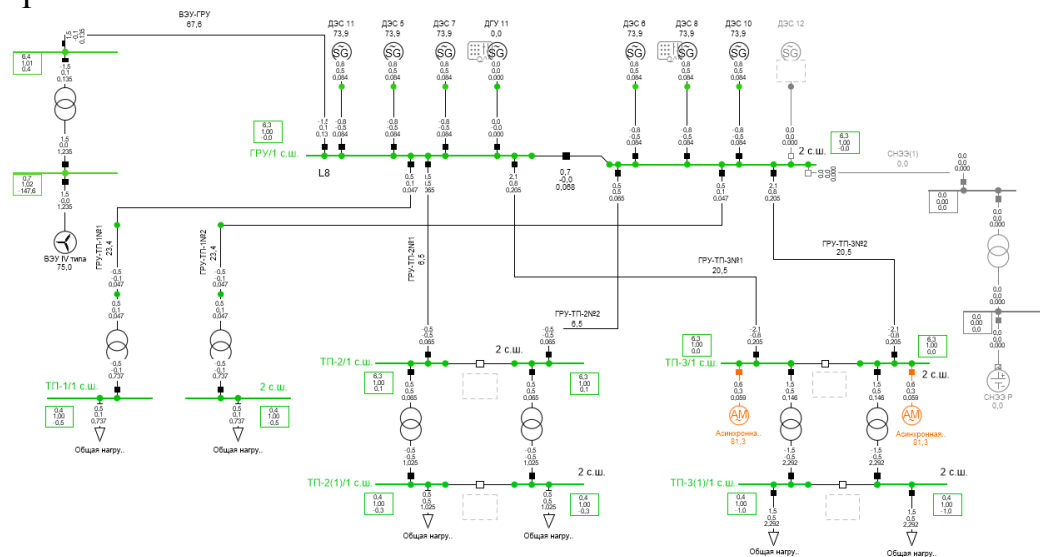


Рисунок 2 – Тестовая модель АГЭК в ПБК *DigSILENT PowerFactory*

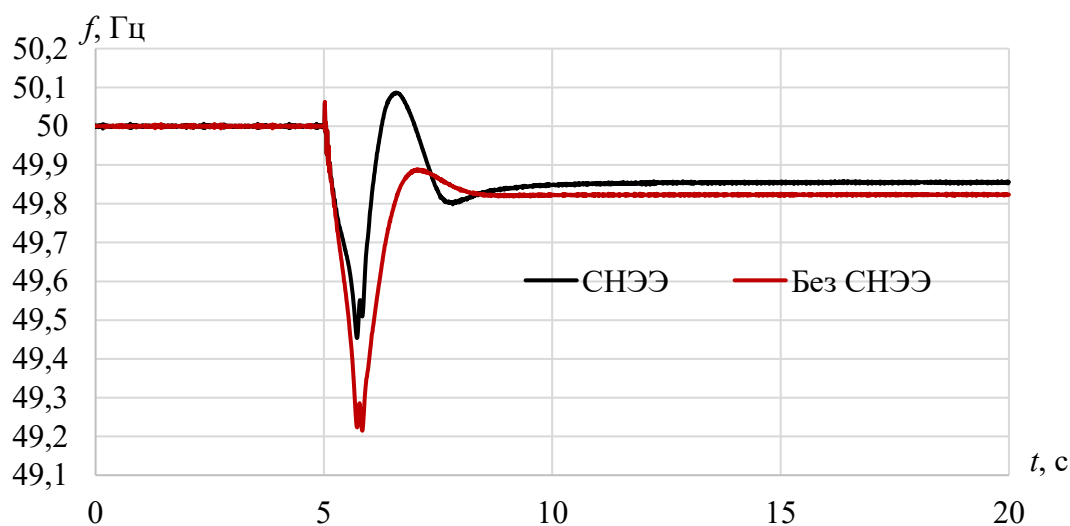


Рисунок 3 – График изменения значения мощности ДГУ в АГЭК

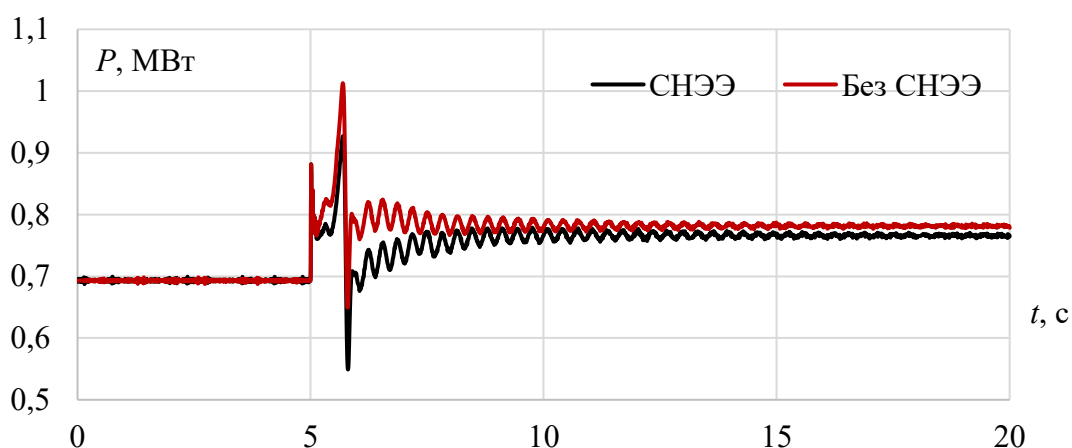


Рисунок 4 – График изменения значения частоты на шинах ГРУ в АГЭК

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка испытательного стенда для тестирования цифровых систем управления силовыми преобразователями с алгоритмами виртуальной инерции» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2024-2026 гг.

Перечень ссылок

1. Делаухова А.М., Яценко В.А. Влияние возобновляемых источников энергии на северный транспортный узел Республики Саха (Якутия): Постановка Задачи // Сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции, проведенной в рамках программы VI Северного Форума по устойчивому развитию. Якутск, 2025– С. 225-229.
2. ГОСТ Р 58092.3.2 – 2023. Системы накопления электрической энергии. Проектирование и оценка рабочих параметров. Применения с преимущественным использованием мощности и интеграция с возобновляемыми источниками энергии.
3. Илюшин П.В., Шавловский С.В. Алгоритмы управления гибридной системой накопления электроэнергии для обеспечения надежного функционирования изолированных энергорайонов с промышленной нагрузкой // Материалы 96-го заседания Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. Иркутск, 2024– С. 137-148.
4. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией // Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. – 364 с.

УДК 004.85:004.382.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ ДАТА-ЦЕНТРОВ

С.К. Никишина, Е.И. Шарибченко
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, ДНР

Аннотация: В статье рассматривается применение машинного обучения для управления энергопотреблением дата-центров. Проведено сравнение традиционной и интеллектуальной систем. Показано снижение энергозатрат при использовании ML-подхода. Подтверждена эффективность интеллектуального управления.

Ключевые слова: дата-центр, машинное обучение, энергопотребление, интеллектуальное управление, оптимизация ресурсов, прогнозирование нагрузки, энергоэффективность.

Annotation: The paper considers the application of machine learning methods for energy management in data centers. A comparison between traditional and intelligent control systems is presented. The results show a reduction in energy consumption using the ML-based approach. The effectiveness of intelligent energy management is confirmed.

Keywords: data center, machine learning, energy consumption, intelligent control, resource optimization, load forecasting, energy efficiency.

Дата-центр (ЦОД) — это инженерный комплекс для размещения вычислительного оборудования и обеспечения его работы за счёт систем электропитания, охлаждения и сетевой инфраструктуры [1]. Современные ЦОД отличаются высоким энергопотреблением, значительная часть которого приходится на серверы и охлаждение. В условиях роста объёмов данных актуальной становится задача повышения энергоэффективности, которую можно решать с помощью методов машинного обучения. Они позволяют прогнозировать нагрузку и оптимизировать использование ресурсов, снижая энергозатраты [2].

Цель работы — исследовать эффективность применения машинного обучения для управления энергопотреблением дата-центров и оценить его влияние на снижение энергозатрат.

Рост энергопотребления в мире связан с развитием промышленности, цифровизацией и увеличением числа вычислительных систем. Особенно сильно это проявляется в работе дата-центров. Дополнительной проблемой является неравномерное

распределение энергетических ресурсов между странами, что требует повышения эффективности их использования [3]. В современных системах управления применяются интеллектуальные технологии, включая машинное обучение и прогнозирование нагрузки. Это позволяет автоматически управлять серверами, оптимизируя распределение ресурсов и обеспечивая стабильную работу системы [4]. В исследовании рассматривается модель дата-центра с изменяющейся нагрузкой в течение суток. Ночью нагрузка минимальна, днём возрастает, а вечером остаётся на среднем уровне.

Для исследования были рассмотрены два подхода к управлению энергопотреблением дата-центра:

1. Традиционная система управления. В данной модели охлаждение и питание серверов работают практически с постоянной мощностью независимо от текущей нагрузки. Такой подход обеспечивает стабильность работы, однако приводит к избыточному потреблению электроэнергии в периоды низкой активности.

2. Интеллектуальная система управления с использованием технологий искусственного интеллекта. В этой модели система анализирует текущую нагрузку и прогнозирует её изменение в разные периоды времени. На основе полученных данных автоматически регулируются параметры охлаждения и распределения вычислительных ресурсов. Это позволяет уменьшить энергопотребление без снижения производительности дата-центра.

Для наглядного сравнения была построена модель изменения нагрузки в течение суток. В качестве основных параметров исследования рассматриваются:

- уровень загрузки серверов;
- потребляемая мощность;
- энергозатраты системы охлаждения;
- общее энергопотребление дата-центра.

Предполагается, что интеллектуальная система управления позволяет снизить потребление энергии в периоды низкой и средней нагрузки за счёт более эффективного распределения ресурсов и адаптивного охлаждения оборудования.

Для оценки эффективности интеллектуального управления дата-центром используются расчёты общего энергопотребления и величины экономии электроэнергии.

Общее энергопотребление оборудования определяется по формуле:

$$E = P \cdot t \quad (1)$$

где: E — потреблённая электроэнергия, P — мощность оборудования, t — время работы. Данная формула позволяет определить объём энергии, потребляемой дата-центром за определённый промежуток времени.

Для сравнения традиционной системы управления и интеллектуальной системы используется расчёт экономии энергии:

$$\Delta E_{AI} \quad (2)$$

где: E — энергопотребление традиционной системы, E_{AI} — энергопотребление системы с искусственным интеллектом, ΔE — величина сэкономленной энергии.

Процент снижения энергопотребления определяется по формуле:

$$\eta = \frac{E - E_{AI}}{E} \cdot 100\% \quad (3)$$

где: η — эффективность энергосбережения в процентах.

На основе приведённых формул выполняется сравнение энергопотребления систем управления дата-центром в различные периоды времени суток. Для анализа используются условные числовые значения, моделирующие работу дата-центра при различной нагрузке в течение суток (таблица 1). Приведённые данные позволяют наглядно оценить влияние интеллектуального управления на энергопотребление системы и сравнить эффективность традиционного и интеллектуального подходов.

Таблица 1 — Изменение нагрузки дата-центра в течение суток

Время суток	Нагрузка серверов	Характер нагрузки
00:00–06:00	25%	Низкая
06:00–12:00	55%	Средняя
12:00–18:00	90%	Высокая
18:00–24:00	65%	Средняя

Из представленных данных видно, что нагрузка дата-центра изменяется в зависимости от времени суток. Минимальная загрузка наблюдается в ночное время, когда количество пользовательских запросов невелико. В дневной период нагрузка достигает максимальных значений, что связано с активной работой пользователей и увеличением объёма вычислений.

На основе приведённых данных построен график изменения нагрузки дата-центра в течение суток. Он наглядно демонстрирует

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

неравномерный характер загрузки вычислительных ресурсов: минимальные значения наблюдаются в ночное время, а пик нагрузки приходится на дневной период (рисунок 1). Результаты сравнения энергопотребления традиционной и интеллектуальной систем управления представлены в (таблица 2).

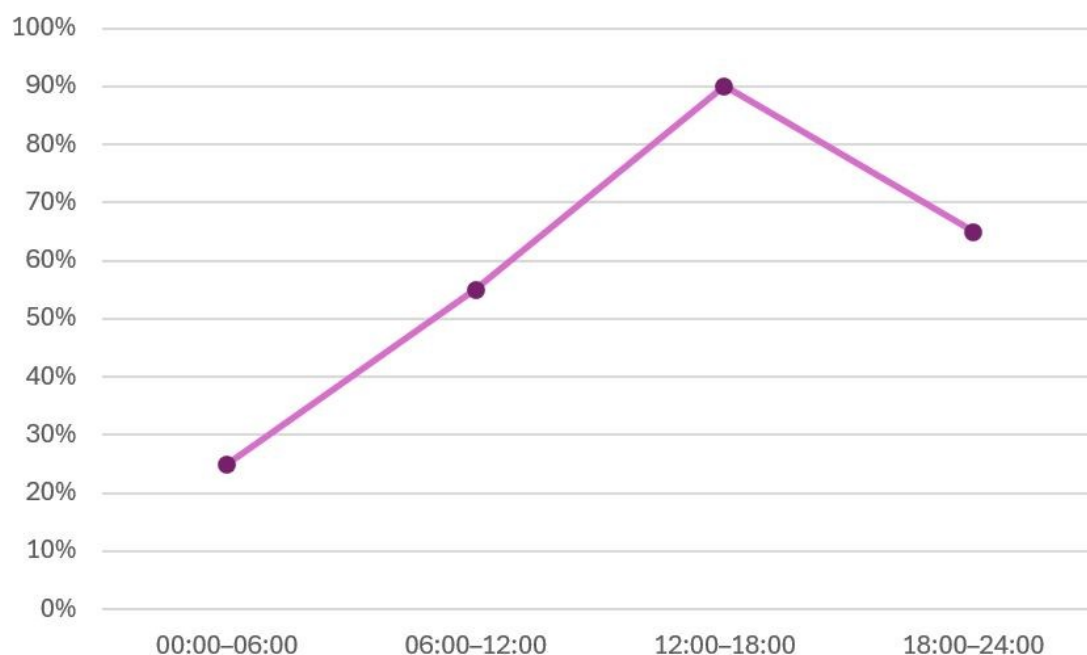


Рисунок 1 – График нагрузки дата-центра

Таблица 2 — Сравнение энергопотребления систем

Время суток	Традиционная система	система с ML	Экономия энергии	Экономия, %
00:00–06:00	520 кВт	390 кВт	130 кВт	25%
06:00–12:00	680 кВт	560 кВт	120 кВт	18%
12:00–18:00	920 кВт	860 кВт	60 кВт	7%
18:00–24:00	740 кВт	610 кВт	130 кВт	18%

График сравнения энергопотребления традиционной и интеллектуальной систем управления показывает, что использование методов машинного обучения позволяет снизить энергозатраты во все периоды суток (рисунок 2). Наибольшая разница наблюдается в периоды низкой и средней нагрузки, что подтверждает эффективность адаптивного управления ресурсами.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

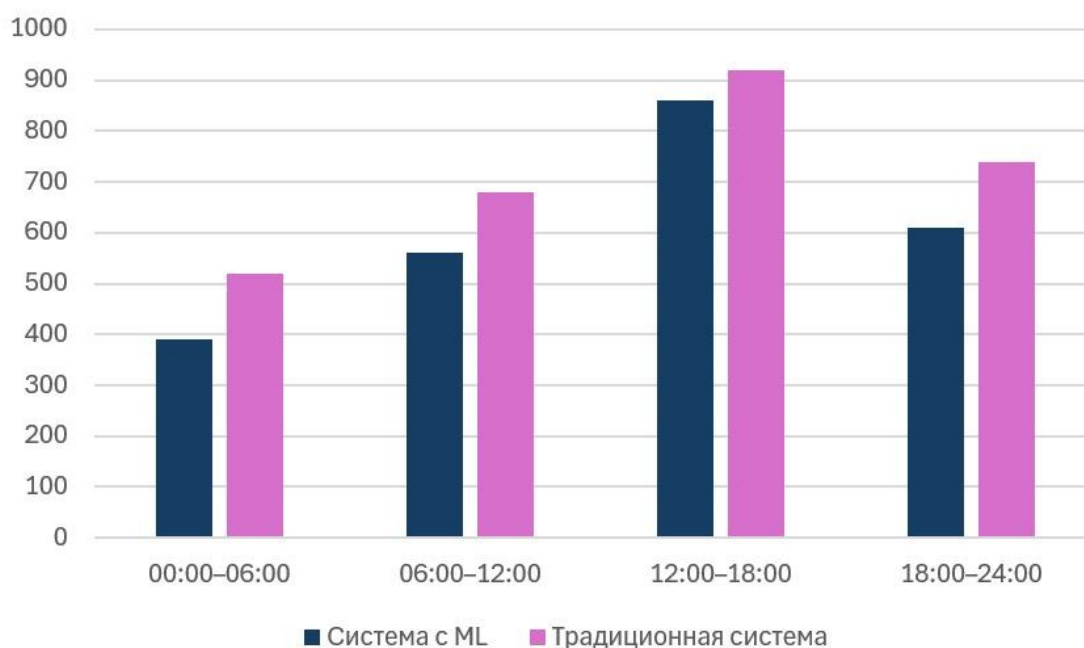


Рисунок 2 – График энергопотребления

Анализ результатов показывает, что применение интеллектуальной системы управления позволяет снизить энергопотребление дата-центра во все периоды работы. Наибольшая экономия достигается при низкой нагрузке системы, когда часть серверного оборудования может быть переведена в энергосберегающий режим. В периоды высокой нагрузки снижение энергопотребления менее значительно, однако использование методов машинного обучения всё равно позволяет оптимизировать работу системы охлаждения и более эффективно распределять вычислительные ресурсы. В ходе исследования была рассмотрена модель дата-центра с изменяющейся во времени нагрузкой и проведено сравнение традиционного подхода управления энергопотреблением с интеллектуальной системой, основанной на методах машинного обучения. Использование условной модели и расчётных данных показало, что наибольший эффект энергосбережения достигается в периоды низкой и средней нагрузки, когда система способна снижать избыточное энергопотребление без ухудшения производительности. Таким образом, методы машинного обучения являются перспективным инструментом для оптимизации энергопотребления дата-центров и повышения эффективности работы современной вычислительной инфраструктуры.

Перечень ссылок

1. Веселицкий О.И. Центры обработки данных - зеленый вектор развития цифровой экономики // Инновации и инвестиции. – 2018. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsentry-obrabotki-dannyh-zelenyy-vektor-razvitiya-tsifrovoy-ekonomiki> (дата обращения: 12.05.2026).
2. Ахметшина Э.Г., Видута А.А., Елисеева Д.В. Автоматизация маршрутизации и управление ресурсами с помощью искусственного интеллекта и машинного обучения в сетях // Экономика и парадигма нового времени. – 2024. – №8 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-marshrutizatsii-i-upravlenie-resursami-s-pomoschyu-iskusstvennogo-intellekta-i-mashinnogo-obucheniya-v-setyah> (дата обращения: 12.05.2026).
3. Ушаков В.Я. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Известия ТПУ. – 2011. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-problemy-energetiki-i-vozmozhnye-sposoby-ih-resheniya> (дата обращения: 12.05.2026).
4. Гвоздинский А.Н., Серик Е.Э. Исследование и разработка интеллектуальных методов управления современным предприятием // Радиоэлектроника и информатика. – 2017. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-i-razrabotka-intellektualnyh-metodov-upravleniya-sovremennym-predpriyatiem> (дата обращения: 12.05.2026).

УДК 65.011.56

ПРИБОР КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ГОРНОЙ МАССЫ НА КОНВЕЕРНЫХ ЛЕНТАХ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Д.А. Радецкий, И.И. Москвина
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, ДНР

Аннотация. *Выполнен анализ условий среды горных выработок, а также имеющиеся способы контроля горных масс при их транспортировке и принято решение о разработке прибора контроля уровня, обеспечивающий возможность массового оборудования шахт приборами контроля уровня.*

Ключевые слова: *ультразвуковой уровнемер; горные выработки; угольная промышленность.*

Annotation. *The article analyzes the conditions of mine workings, as well as the existing methods of controlling rock masses during their transportation, and makes a decision to develop a level control device that allows for the mass equipment of mines with level control devices.*

Keywords: *ultrasonic level gauge; mine workings; coal industry.*

Разработка специализированного ультразвукового уровнемера для шахтных выработок направлена на решение критически важных задач безопасности и эффективности подземной добычи. В горных выработках среда часто характеризуется высокой запылённостью, влажностью, наличием вредных веществ и механических частиц. Это часто представляет не только трудности для работы оборудования, но и создаёт опасность для жизни человека.

Традиционные методы контроля (расчётный метод, визуальный осмотр) малоэффективны, требуют присутствия человека в опасных зонах и не обеспечивают получения данных в реальном времени. Автоматизированный мониторинг с помощью бесконтактных датчиков становится не просто опцией, а технологической необходимостью для перехода к интеллектуальным и безопасным горнодобывающим предприятиям. Данный проект предлагает создание уровнемера, который обеспечит высокоточный, надежный и безопасный контроль горных масс в экстремальных условиях шахты.

Среда в подземных угольных шахтах является одной из наиболее агрессивных и сложных для работы электронного оборудования. Её ключевыми факторами являются:

1. Запылённость атмосферы – 150 мг/м^3 - в рудничном воздухе после обеспыливающей завесы в исходящих из подготовительных и очистных забоев вентиляционных струях; 250 мг/м^3 - в рудничном воздухе на рабочих местах в подготовительных и очистных забоях [1].

2. Подземные воды – шахтные воды имеют разные значения кислотно-щелочного потенциала. из-за растворения минералов (например, сульфидов), содержат масла, соли и механические взвеси. Это приводит к ускоренной коррозии материалов (по величине pH шахтные воды разделяют на 3 класса: кислотные — меньше 6,5; нейтральные — 6,5–8,5; щелочные — более 8,5.) [2].

3. Взрывоопасные газы – Присутствие рудничного метана и взвесей угольной пыли создает постоянный риск взрыва (максимально допустимое содержание взрывоопасных газов в шахтной выработке – 2,5% объёмной доли). Любое электрооборудование должно исключать возможность искрообразования (взрывоопасное содержание метана в шахтной выработке – от 4,4% до 17%)[3].

4. Влажность атмосферы (От 75% до 100%, в зависимости от температуры и климата) [4].

5. Диапазоны температуры, характерные для подземных выработок (-5°C – $+25^{\circ}\text{C}$) [4].

Имеющиеся на рынке уровнемеры, не только ультразвуковые, а также радарные, лазерные, индуктивные, имеют высокие показания в точности и стабильности работы, однако за это приходится платить немалые суммы. Для Донецкой области и ближайших территорий, земли которых богаты полезными ископаемыми, для автоматизации контроля добываемых ресурсов, потребуется немалое количество датчиков контроля уровня, что соответственно требует значительных вложений, а также в процессе эксплуатации необходима ревизия и ремонт оборудования. Также не стоит забывать и о том, что подобного рода приборы требуют точной настройки для стабильной и правильной работы, не только при их установке, но и зачастую при ревизиях и ремонте.

Итак, подведём итог, что мы хотим получить от нашего прибора контроля уровня:

1) Стабильную и точную работу датчика в экстремальных условиях горных выработок (защиту от влаги и пыли, а также обеспечение искробезопасности).

2) Цену, позволяющую провести массовое оборудование шахт, приборами контроля уровня.

3) Простоту и доступность замены компонентов прибора (для быстрого ремонта, в случае выхода прибора из строя и скорейшего его возвращения в работу)

4) Простую настройку и перенастройку при переносе или изменении положения прибора.

Наш прибор отвечает данным требованиям, за счёт того, что:

1) Корпус прибора IP54 имеет изолированное питание.

2) Низкая общая стоимость прибора и каждого компонента в отдельности.

3) Простая схема прибора, обеспечивающая, простой и быстрый ремонт.

4) Настройка и перенастройка прибора производится посредством изменения одного параметра.

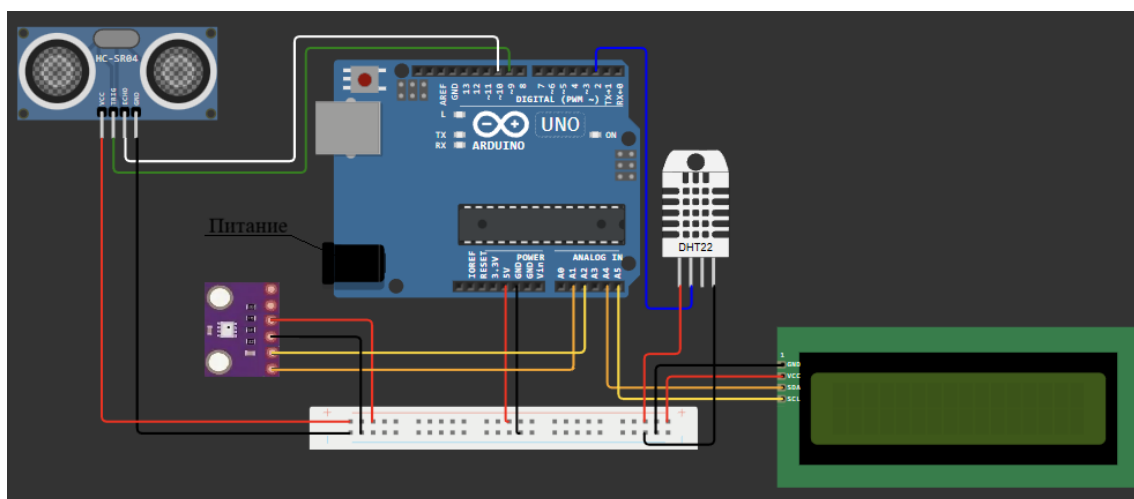


Рисунок 1 – Электрическая схема ультразвукового датчика уровня

Питание прибора может быть, как автономным, подключая аккумулятор на 9В, так и от общей сети, подключая питание к выходам платы Vin и GND, напряжение которого не должно превышать 20В (лучше не более 12В для увеличения срока службы микроконтроллера).
Таблица 1 – Характеристики прибора

Характеристика	Значение
Рабочее напряжение	6-20В (рекомендовано 7-12В)
Рабочий ток	20 мА
Диапазон измерения	2-400 см
Рабочая температура	-20...+70°C
Общая стоимость (эл. компоненты)	9500 руб

Поправки по температуре, влажности и давлению происходят автоматически, каждые 2 секунды (возможно изменить время регулировки).

Прибор крепится к металлическим опорам, клиновыми шайбами для избежание люфта и самораскрутки крепёжных болтов.

Расчётные формулы:

$$C = 331.3 + (0.6 * t) + (0.0124 * h) - (0.0000437 * p), \quad (1)$$

где C – скорость звука, м/с; t – температура воздуха, °C; h – влажность воздуха, г/м³; p – атмосферное давление, Па,

$$S = \frac{C * T * 0.000001}{2}, \quad (2)$$

где S – расстояние до объекта, м;

T – время затраченное на прохождение сигнала, мкс.

Настройка происходит в 2 этапа:

1. Установка прибора – изменение значения X в коде на 0 (первая строчка в графе «// Преобразование расстояния в уровень») – измерение.

2. Полученное значение при первом измерении внести вместо значения 0 – прибор готов к работе.

Выводы

Разработка специализированного ультразвукового уровнемера для шахтных выработок является технически обоснованным и экономически целесообразным проектом. На основе анализа экстремальных условий эксплуатации сформирован комплекс технических требований, который может быть реализован с применением современных ультразвуковых технологий, материалов и схемотехнических решений.

Главными конкурентными преимуществами предлагаемого решения являются его низкая стоимость, простота ремонта и настройки.

Внедрение данной разработки станет значительным шагом в направлении цифровизации и повышения безопасности угольной промышленности.

Перечень ссылок:

1. Запылённость – (ГОСТ Р 58196–2018 «Горное дело. Борьба с пылью на угледобывающих предприятиях. Термины и определения» – 19 с.)

2. Агрессивная химическая среда шахтных вод – (ГОСТ 8.135-2004 «СТАНДАРТ-ТИТРЫ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БУФЕРНЫХ РАСТВОРОВ — РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ pH 2-го и 3-го РАЗРЯДОВ» – 12 с.)

3. Содержание взрывоопасных газов – (ГОСТ Р 56141–2014 «Оборудование горно-шахтное. Многофункциональные системы безопасности угольных шахт. Системы взрывозащиты горных выработок. Общие технические требования» – 20 с.)

4. Влажность воздуха, температура – (ГОСТ 15150. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Введ. с 01.01.1971. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 57 с.)

УДК 620.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К СОСТАВУ И ПАРАМЕТРАМ МОДЕЛИ МИКРОГРИДА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ

А.А. Самойлов, М.В. Бурмейстер, А.А. Самойлова
ФГБОУ ВО «НИУ "МЭИ"» г. Донецк, Россия

Аннотация: В статье представлены базовые требования к составу модели микрогрида. Такая модель позволяет анализировать режимы работы, надежность электроснабжения и переходные процессы. Также она позволяет оценить возможность повышения экономической эффективности за счет оптимизации потребления и генерации электроэнергии.

Ключевые слова: ЭЭС, микрогрид, СНЭЭ, распределенная генерация, ВИЭ

Annotation: The paper presents the basic requirements for the composition of a microgrid model. Such a model makes it possible to analyze operating modes, power supply reliability, and transient processes. It also allows assessing the potential for improving economic efficiency through the optimization of electricity consumption and generation.

Keywords: EES, microgrid, ESS, distributed generation, RES

В настоящее время развитие современных электроэнергетических систем (ЭЭС) определяют следующие тренды:

- повышение автономности энергоснабжения;
- увеличение доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в структуре генерации;
- повышение энергетической эффективности;
- повышение экономической эффективности потребления электроэнергии из внешней сети (снижение потребления «дорогой» электроэнергии и мощности в пиковые часы);
- участие в программах управления спросом на электроэнергию.

Все обозначенные тренды реализуются в концепции «микрогрид» – энергосистеме, способной работать как в режимах, параллельных с сетью, так и в изолированных режимах. Развитие технологий

микрогрида повышает надежность электроснабжения и снижает зависимость от ЭЭС.

Наличие собственных источников энергии и систем накопления электроэнергии (СНЭЭ) предоставляет возможность снижения потребления электроэнергии в часы максимума энергосистемы, для снижения платы за мощность и платы за потребленную электроэнергию, имеющую в пиковые часы более высокий тариф. Экономически выгодно использовать возможности СНЭЭ и распределенной генерации по выработке электроэнергии в полупиковые и пиковые часы [1].

Техническая целесообразность заключается в обеспечении категории надежности (бесперебойности электроснабжения) ответственных потребителей, к которым относятся объекты критической инфраструктуры (центры связи, больницы и т.д.), собственные нужды объектов генерации – газопоршневых и дизель-генераторных установок (ГПУ и ДГУ). Высокий уровень бесперебойности обеспечивается быстроедействием СНЭЭ.

Для обеспечения экономической выработки необходимо учитывать экономические и технические параметры оборудования: время отклика СНЭЭ, обеспечивающего бесперебойность электроснабжения, и особенности электромеханических переходных процессов объектов распределенной генерации. Необходимо создать имитационную модель, показывающую возможность работы генераторного оборудования в режимах, параллельных с сетью, в изолированных режимах, а также в переходных режимах.

Предлагаемая расчетная модель микрогрида, созданная в программном комплексе *Simulink*, достаточна для соответствия современным трендам в энергоснабжении. Модель состоит из следующих составляющих:

- нагрузок потребителей;
- внешней энергосистемы;
- трансформаторного оборудования (соединения внешней энергосистемы и микрогрида);
- собственной тепловой генерации (ГПУ или ДГУ);
- ВИЭ (солнечные или ветровые электростанции);
- СНЭЭ;
- электрозарядных станций (ЭЗС).

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Параметры, являющиеся исходными данными для моделирования основных элементов расчетной модели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные моделируемых элементов

№	Моделируемый элемент	Исходные данные для модели
1	Нагрузка	почасовое потребление, активная и реактивная мощность
2	Внешняя энергосистема	мощность короткого замыкания, сопротивление внешней энергосистемы
3	Трансформатор	каталожные данные трансформаторов (напряжения обмоток, номинальная мощность, сопротивления обмоток и т.д.)
4	ГПУ/ДГУ	активное и реактивное сопротивление обмоток ротора и статора, момент инерции, параметры регуляторов, номинальная мощность, первичный двигатель и т.д.
5	СНЭЭ	параметры преобразователя, параметры подсистемы накопления (АКБ), системы автоматического управления и <i>BMS</i> -системы
6	ЭЗС	номинальная мощность, зарядная характеристика, тип (быстрая/медленная), технологические ограничения на скорость заряда, параметры преобразователя
7	ВИЭ	график выдачи мощности, параметры синхронного генератора ветряной электростанции, подсистема преобразования, алгоритм <i>MPPT</i>
8	ВЛ, КЛ	активное, реактивное сопротивление и зарядная мощность. Топология линий электропередачи

Приведенная на рисунке 1 расчетная модель микрогрида интегрирует указанные компоненты для имитационного моделирования режимов работы – как параллельного с внешней сетью, так и изолированного. Также данная схема позволяет выявлять граничные режимы, возникающие при эксплуатации микрогрида. Например, при профиците ВИЭ-генерации отслеживается, что недопотребленная электроэнергия запасается в СНЭЭ, потребление и выдачу которой впоследствии можно экономически оптимизировать (потреблять в наиболее «дешевые часы» – часы базовой нагрузки и выдавать в сеть в наиболее «дорогие часы» – в часы пиковой нагрузки).

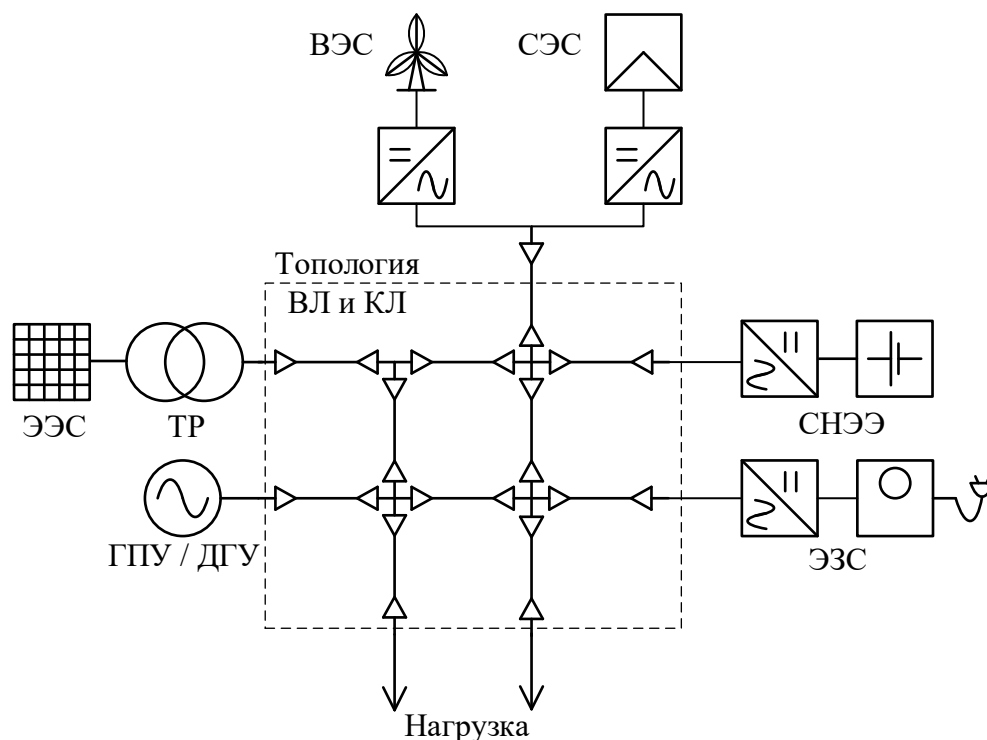


Рисунок 1 – Схематическое изображение расчётной модели микрогрида

Проводимые расчеты позволяют оценивать балансы мощности, надежность системы, возникающие электромеханические переходные процессы, а также экономическую эффективность микрогрида.

Вывод

Описаны основные технические свойства элементов микрогрида, необходимые для расчетов, доказывающих возможность технической реализации работы микрогрида.

Статья представляет собой базовые требования для создания модели микрогрида – достаточный минимум элементов сети для проведения расчетов, показывающих техническую возможность работы микрогрида в различных сценариях – повышения надежности, управления спросом и переключения на собственные источники энергии при наличии экономического эффекта.

Перечень ссылок

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 04.05.2012 № 442 О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии.

УДК 621.314.572

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫМ ИНВЕРТОРОМ ДЛЯ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Р.Н. Саратовский

ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
г. Алчевск, ЛНР, Российская Федерация

Аннотация: Рассматривается структура и принцип построения системы управления резонансным инвертором для питания установок индукционного нагрева и реализованный алгоритм ее работы.

Ключевые слова: источник питания, система управления, индукционный нагрев, инвертор.

Annotation: The structure and principle of constructing a resonant inverter control system for powering induction heating units and the implemented algorithm for its operation are considered.

Keywords: power supply, control system, induction heating, inverter.

Для разработки источников питания для индукционного нагрева металлов, для которых редко предполагают постоянную нагрузку, используют тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ) на базе резонансного инвертора с удвоением частоты с диодами встречного тока [1]. Для того чтобы обеспечить качественный технологический процесс и эффективную и надёжную работу источника питания, преобразователю требуется система управления с эффективным алгоритмом работы. Применение принципа самовозбуждения резонансного инвертора позволяет осуществлять «самонастройку» ТПЧ как при его запуске на индукционную нагрузку с неизвестными и изменяющимися во время работы её параметрами, так и во время всего времени нагрева [2]. В отличие от независимого возбуждения, выполняемого формированием импульсов управления тириستоров инвертора задающим генератором частоты, при самовозбуждении электромагнитные процессы, протекающие во времени в цепи «инвертор-нагрузка», автономно устанавливают период следования импульсов управления, длительность которого можно изменять внешним управляющим воздействием.

В работе рассматривается структура построения системы управления резонансным инвертором с удвоением частоты и диодами встречного тока с алгоритмом реализующий принцип самовозбуждения, а также практическая его реализация.

На рисунке 1 показана схема резонансного инвертора и временные диаграммы токов вентиля инвертора и сигналы для формирования импульсов управления, поясняющие принцип самовозбуждения.

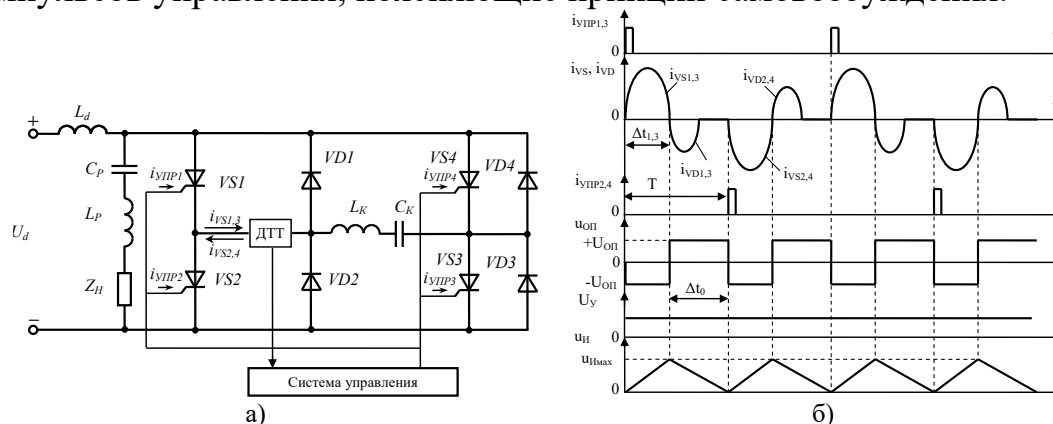


Рисунок 1 – Схема резонансного инвертора а); временные диаграммы б)

При наличии постоянного напряжения питания инвертора U_d в момент времени $t=0$ подается пусковой импульс управления $i_{уп1,3}$ и открываются тиристоры $VS1$ и $VS3$. В результате через эти тиристоры протекает полуволна тока $i_{VS1,3}$ длительностью $\Delta t_{1,3}$. Одновременно формируется отрицательное опорное напряжение $-U_{оп}$ стабилизированной амплитуды. Сформированное опорное напряжение подается на вход интегрирующего усилителя, в результате на его выходе формируется линейно изменяющееся во времени напряжение U_H длительностью $\Delta t_{1,3}$ независимое от величины сигнала управления U_y . По истечении времени $\Delta t_{1,3}$ тиристоры $VS1$ и $VS3$ закрываются и ток в контуре уже протекает через обратные диоды $VD1$ и $VD3$ $i_{VD1,3}$. При этом напряжение на выходе интегратора достигает максимального значения U_{Hmax} и в этот момент опорное напряжение становится положительным этой же амплитуды. Сформированное опорное напряжение $+U_{оп}$ вместе с напряжением сигнала управления U_y вновь подаются на вход интегрирующего усилителя, в результате чего в течение времени Δt_0 начинается процесс линейного снижения напряжения U_H на выходе интегратора, уже зависящего от величины U_y . Как только U_H станет равным нулю, сразу формируется импульс $i_{уп2,4}$ для отпирания очередных тиристоров $VS2$ и $VS4$. Таким образом, изменяя сигнал управления U_y можно устанавливать период T следования импульсов управления тиристорами в широком диапазоне, который будет определять частоту выходного напряжения инвертора.

На основании вышеописанного принципа формирования импульсов была разработана и реализована система управления, реализующая принцип самовозбуждения резонансного инвертора, ее структурная схема представлена на рисунке 2.

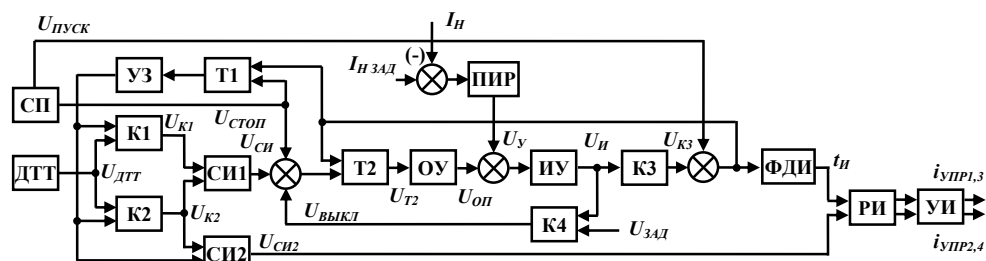


Рис. 2 - Структурная схема системы управления резонансным инвертором

Рассмотрим алгоритм работы реализованной системы управления с самовозбуждением по приведенным осциллограммам на рисунке 3.

В первоначальный момент времени $t=0$ ТПЧ выключен, коммутирующий ток инвертора $i_{VS1,3} = i_{VS2,4} = 0$ и сигнал с датчика тока тиристоров (ДТТ) $U_{ДТТ} = 0$. Этот сигнал поступает на компараторы К1 и К2. Для осуществления устойчивого пуска ТПЧ, с помощью RS-триггера Т1 и выходного сигнала с узла задержки (УЗ) на управляющие входы К1, К2 подаётся логический «0», а на выходах К1, К2 формируется логическая «1» (U_{K1} , U_{K2}). Это приводит к тому, что с выхода синхронизатора импульсов (СИ2) на распределитель импульсов (РИ) поступает устойчивый сигнал для формирования импульсов управления.

При запуске, в момент времени t_1 система пуска и выключения ТПЧ (СП) формирует пусковой импульс $U_{пуск}$. По фронту этого импульса появляется первый импульс управления $i_{упр1,3}$, длительность которого (t_H) устанавливается формирователем длительности импульсов управления (ФДИ). С помощью РИ и усилителя импульсов (УИ) этот пусковой импульс поступает на тиристоры $VS1$ и $VS3$, в результате чего осуществляется пуск ТПЧ и появляется полуволна коммутирующего тока инвертора, а значит и появляется на выходе ДТТ сигнал

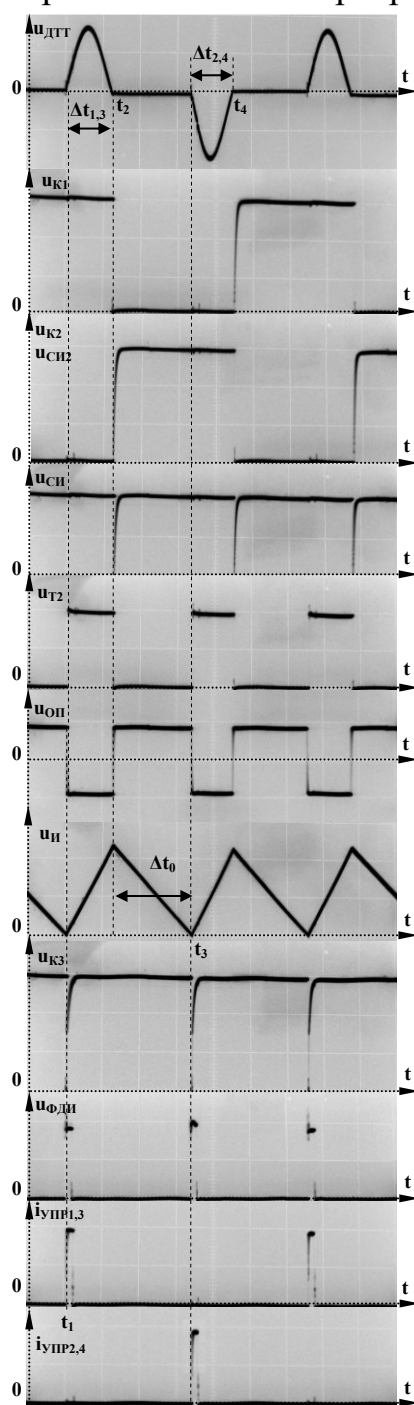


Рисунок 3 – Осциллограммы

обратной связи $U_{ДТТ}$ повторяющий полуволну тока тиристоров $VS1$ и $VS3$. Одновременно, по фронту пускового импульса $U_{ПУСК}$ на выходе Т2 формируется сигнал U_{T2} с уровнем логической «1», который поступает на операционный усилитель (ОУ), в результате чего на его выходе формируется отрицательное опорное напряжение стабилизированной амплитуды $-U_{ОП}$. Это опорное напряжение подаётся на вход интегрирующего усилителя (ИУ), что приводит к формированию на его выходе линейно нарастающего во времени напряжения $U_{И}$.

В момент времени t_2 ток тиристоров $VS1$ и $VS3$ спадает до нуля и в этот же момент на выходах К1 и К2 уровень сигнала меняется на противоположный. По спаду выходного импульса с К1 в СИ1 формируется импульс $U_{СИ}$, по спаду которого Т2 переходит из состояния логической «1» в «0». Таким образом, длительность импульса U_{T2} равна времени протекания тока через тиристоры $VS1$ и $VS3$ $\Delta t_{1,3}$. Как только на выходе Т2 устанавливается логический «0», на выходе ОУ формируется положительное опорное напряжение стабилизированной амплитуды $U_{ОП}$. Это опорное напряжение подаётся на вход ИУ, что приводит к формированию на его выходе линейно убывающего во времени напряжения $U_{И}$. По истечении времени $\Delta t_{1,3}$ напряжение на выходе ИУ достигает максимального значения $U_{И\max}$. Длительность времени снижения $U_{И}$ (Δt_0) зависит от сигнала управления $U_{У}$, поданного на суммирующий вход ИУ через пропорционально-интегральный регулятор (ПИР). Величина сигнала управления $U_{У}$ зависит от сигнала задания, например, по току $I_{Н\text{зад}}$ (или напряжения $U_{Н\text{зад}}$) и от величины значения сигнала обратной связи по току $I_{Н}$ (или напряжения $U_{Н}$).

В момент времени t_3 заканчивается процесс снижения $U_{И}$ до нуля и в этот момент на выходе К3 появляется импульс $U_{К3}$, по спаду которого на выходе ФДИ формируется импульс длительностью $t_{И}$. В соответствии с сигналом $U_{СИ2}$, с помощью РИ и УИ формируется следующий импульс управления $i_{УПР2,4}$, поступающий на тиристоры $VS2$ и $VS4$. В результате чего они открываются, и формируется другая полуволна коммутирующего тока инвертора и соответственно сигнал с ДТТ. Одновременно по фронту этого импульса управления на выходе Т2 вновь устанавливается логическая «1», которая поступает на ОУ, в результате чего на его выходе появляется отрицательное опорное напряжение $-U_{ОП}$, что приводит к формированию вновь на выходе ИУ линейно возрастающего во времени напряжения $U_{И}$.

В момент времени t_4 ток тиристоров $VS2$, $VS4$ спадает до нуля и на выходах К1 и К2 уровень сигнала меняется на противоположный. По

спаду выходного импульса с К2 в СИ1 формируется импульс, по спаду которого Т2 вновь переходит из состояния логической «1» в «0». В результате с этого момента (по истечении времени $\Delta t_{2,4}$) на выходе ИУ вновь начинается процесс снижения напряжения.

В момент времени t_5 сигнал $U_{И}$ достигает нуля и на выходе К3 появляется импульс, по фронту которого на выходе ФДИ формируется следующий импульс управления, а в соответствии с сигналом СИ2, с помощью РИ и УИ формируется импульс управления $i_{упр1,3}$ тиристорами $VS1$ и $VS3$. Таким образом, процесс формирования импульсов управления тиристорами инвертора повторяется.

Для выключения ТПЧ СП формирует импульс $U_{стоп}$, по спаду которого триггер Т2 принудительно переходит в «нулевое» состояние и процесс формирования импульсов управления блокируется. Одновременно с этим Т1 переводится в исходное положение.

Для контроля аварийных токовых режимов работы инвертора в системе предусмотрен узел контроля пробоя тиристоров выполненный на К4. Т.к. длительность тока тиристоров $\Delta t_{1,3}$ и $\Delta t_{2,4}$ пропорциональна максимальному значению $U_{Иmax}$, то, зная это значение, можно контролировать длительность протекания тока через тиристоры. Для этого на один из входов К4 подается напряжение задания $U_{зад}$ несколько выше, чем значение $U_{Иmax}$, а на второй вход К4 подается сигнал с ИУ. В случае пробоя одного из тиристоров, ток будет протекать больше положенного времени $\Delta t_{1,3}$ или $\Delta t_{2,4}$, и процесс интегрирования затянется во времени и соответственно на выходе ИУ напряжение $U_{И}$ превысит максимально возможное значение $U_{Иmax}$. В момент равенства $U_{зад}$ с $U_{И}$ на выходе К4 сформируется импульс $U_{выкл}$, по спаду которого триггер Т2 перейдет в «нулевое» состояние и процесс формирования импульсов управления мгновенно остановится.

Выводы

Основным достоинством предложенной системы управления является то, что режим самовозбуждения повышает быстродействие по сравнению с независимым возбуждением, характеризующимся инерционностью задающего генератора, и, кроме этого, появляется возможность прогнозировать развития аварийных токовых режимов работы инвертора. Реализованный принцип построения системы управления подтвердил эффективность предложенного алгоритма управления с самовозбуждением для резонансного инвертора.

Перечень ссылок

1. Беркович Е.И., Ивенский Г.В., Иоффе Ю.С., Моргун В.В. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1983. 208с.
2. Глебин А.Г. Принцип построения системы управления резонансным инвертором тока тиристорного преобразователя частоты для индукционного нагрева металлов // Электротехника та електроенергетика. – Запорізький нац. техн. ун-т. – 2007. – №2. – С. 15- 18.

УДК 669.02.09

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА
ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
ПОРТАТИВНЫХ ШАХТНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ С
АККУМУЛЯТОРНЫМ ПИТАНИЕМ**

М.В. Сечина, И.А. Бершадский
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» г. Донецк, ДНР

Аннотация: Исследована методика бескамерной оценки искробезопасности шахтных светильников. Сравнены три типа датчиков: резистивный, индуктивный и с насыщающимся трансформатором. При моделировании аварийных режимов (КЗ, обрыв) для блоков БИЗ-2 и БИЗ-4 учтена скорость коммутации. Энергия разрядов не превышает порог зажигания метано-воздушной смеси (0,28 мДж). Алгоритмы позволяют оптимизировать цепи при проектировании без испытаний во взрывных камерах.

Ключевые слова: искробезопасность, блок искрозащиты, скорость коммутации, компьютерное моделирование, переходные процессы, минимальная энергия зажигания, метано-воздушная смесь.

Annotation: A chamberless methodology for assessing the intrinsic safety of mining lamps was investigated. Three sensor types were compared: resistive, inductive, and saturable transformer-based. Commutation speed was accounted for during the simulation of emergency modes (short circuit and open circuit) for BIZ-2 and BIZ-4 units. The discharge energy does not exceed the ignition threshold of the methane-air mixture (0.28 mJ). The algorithms enable circuit optimization at the design stage without explosion chamber testing.

Keywords: intrinsic safety, intrinsic safety protection unit, commutation speed, computer simulation, transient processes, minimum ignition energy, methane-air mixture.

Введение. Безопасность подземных работ в угольной промышленности требует предотвращения взрывов метано-воздушной смеси от электрических искр. Шахтные головные светильники (ШГС) с автономным питанием имеют разнесённую конструкцию (фонарь на каске, батарея на поясе), соединённую гибким шнуром. Наиболее опасный режим — короткое замыкание в шнуре из-за повреждения изоляции, способное вызвать возгорание.

Ток КЗ может достигать 6–150 А, при этом токи заряда (7–10 А) провоцируют ложные срабатывания защиты. Локализация

повреждения должна занимать ≤ 7 мкс [1,2], тогда как плавкие вставки обеспечивают 18...90 мс — недостаточно для предотвращения взрыва.

Современные блоки искрозащиты (БИЗ) содержат электронные ключи и датчики, однако сравнительные данные об их эффективности отсутствуют. Существующие методы оценки требуют дорогостоящих испытаний во взрывных камерах.

В связи с вышеизложенным, целью данного исследования является разработка и верификация расчётного метода оценки искробезопасности электрических цепей портативных шахтных светильников, позволяющего оптимизировать параметры защитных устройств на этапе проектирования без проведения дорогостоящих экспериментов.

1. Сравнительный анализ способов обеспечения искробезопасности цепей шахтных светильников. Для обеспечения искробезопасности цепей шахтных аккумуляторных светильников применяются три основных способа построения воспринимающих узлов блоков защиты. В рамках данного исследования проведён сравнительный анализ их динамической чувствительности в условиях, максимально приближенных к реальным аварийным ситуациям.

Первый способ: резистивный датчик пропорционального типа. Данный метод базируется на использовании резистивного сопротивления, включённого последовательно в цепь нагрузки. Принцип действия основан на регистрации падения напряжения на измерительном резисторе при возникновении короткого замыкания (рис.1).

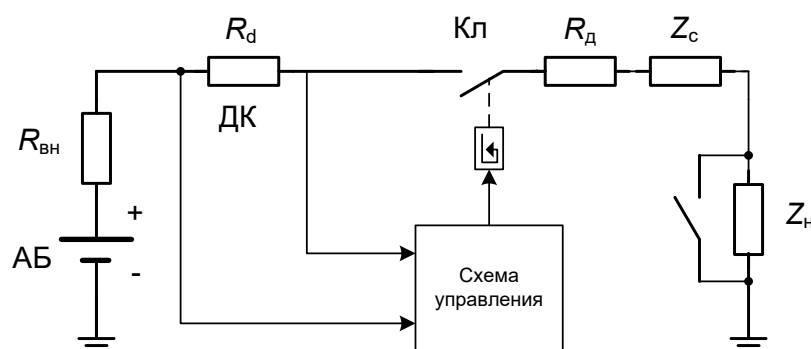


Рисунок 1 — Электрическая структурная схема шахтного головного аккумуляторного светильника с резистивным датчиком

Однако при коммутации нагрузки (обрыв цепи) производная тока существенно меньше, чем в режиме КЗ. При длительности разряда 7 мкс она составляет порядка 0,0012 А/мкс, что снижает требования к быстродействию схемы, но может быть недостаточно для мгновенной реакции на аварийный режим.

Второй способ: индуктивный датчик на основе трансформатора тока. Этот метод использует трансформатор тока в качестве датчика коммутации (рис.2). Изменение тока в первичной обмотке, включённой последовательно в цепь нагрузки, индуцирует пропорциональный ток во вторичной обмотке, к которой подключен преобразователь сигнала.

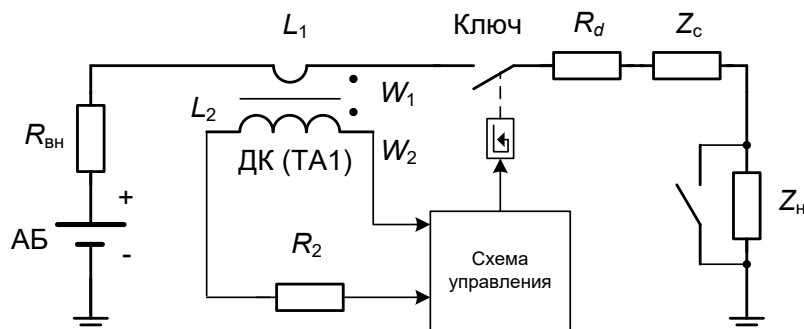


Рисунок 2 — Электрическая структурная схема шахтного главного аккумуляторного светильника с индуктивным датчиком (ДК – датчик коммутации)

В отличие от резистивного датчика, чувствительность индуктивного датчика не является постоянной — она экспоненциально убывает во времени и зависит от соотношения постоянной времени цепи и времени разряда. Результаты расчётов зависимости чувствительности от параметров цепи показывают наличие критического значения отношения постоянной времени к времени разряда, равного 1,446.

При значениях меньше критического датчик обеспечивает лучшую динамическую чувствительность по сравнению с пропорциональным датчиком первого способа.

Третий способ: датчик с насыщающимся трансформатором тока. Данный метод представляет собой развитие индуктивного способа и базируется на использовании нелинейных свойств магнитопровода. При возрастании тока в аварийном режиме сердечник трансформатора входит в режим магнитного насыщения, что приводит к уменьшению индуктивности вторичной обмотки.

Изменение индуктивности вторичной обмотки описывается нелинейной зависимостью. Коэффициенты подбираются так, чтобы изменение индуктивности начиналось при токах порядка 0,02 А. С учётом нелинейности индуктивности дифференциальное уравнение цепи принимает вид, требующий численного интегрирования (применяется метод Эйлера). При одинаковых условиях развития аварийного режима выходной сигнал датчика третьего способа

нарастает быстрее, обеспечивая более раннюю подачу сигнала на отключение электронного ключа.

2. Методика оценки искробезопасности блоков защиты при моделировании переходных процессов. Оценка аварийных режимов блоков искрозащиты шахтных головных светильников была получена с использованием моделей дугового разряда и метода «безкамерной тепловой оценки» [3]. Данный подход позволяет моделировать наиболее опасные условия коммутации для всех электрических цепей, что обуславливает более объективную оценку расчётного метода по сравнению с испытаниями во взрывной камере, где искрообразующий механизм не имеет возможности обеспечить весь диапазон токов и скоростей разведения контактов.

2.1. Режим коммутации — обрыв цепи (БИЗ-4)

При компьютерном моделировании искробезопасных характеристик электрических цепей важным параметром является скорость механического размыкания контактов. Данный параметр влияет на динамику развития дугового разряда и, следовательно, на энергию, выделяющуюся в искровом промежутке.

Расчётные исследования, выполненные для схемы, представленной на рис.3, показали, что наиболее опасным с точки зрения выделения энергии разряда является режим с максимальной скоростью коммутации 6,5 м/с. При этом установлено, что диапазон опасных скоростей размыкания определяется параметрами цепи (индуктивностью, ёмкостью, активным сопротивлением) и может варьироваться в широких пределах — от 0,046 м/с до 6,5 м/с.

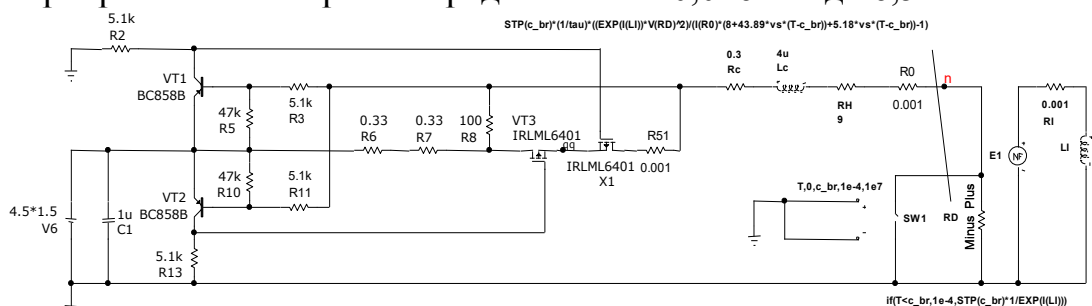


Рисунок 3 — Расчётная схема для определения опасности обрыва цепи в блоке искрозащиты БИЗ-4

Диаграммы работы блока искрозащиты в режиме обрыва цепи характеризуются следующими параметрами: ток нагрузки, напряжение в точке коммутации, мощность КЗ и энергия разряда.

2.2. Режим коммутации — короткое замыкание цепи (БИЗ-2)

Для анализа опасности разрядов размыкания использовалась расчётная схема (рис.4), моделирующая возникновение короткого замыкания.

2.3. Режим коммутации — обрыв цепи (БИЗ-2)

При моделировании обрыва цепи в схему вносились следующие изменения: сопротивление нагрузки, напряжение источника, алгоритм моделирования обрыва реализован через условную функцию изменения сопротивления, полярность индуктивности изменялась на противоположную для корректного учёта ЭДС самоиндукции.

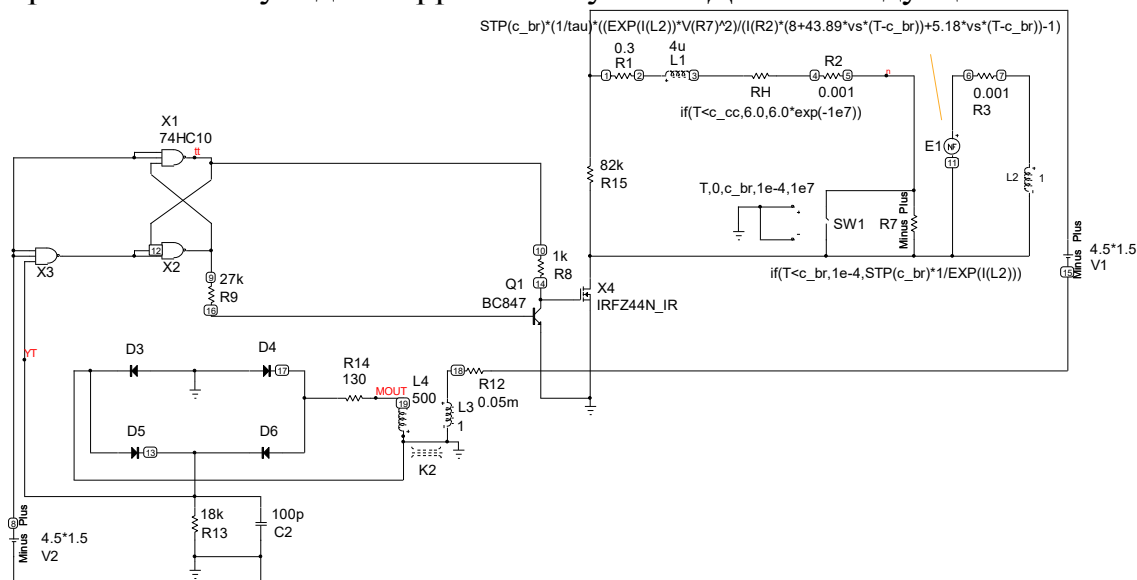


Рисунок 4 — Расчётная схема для определения опасности КЗ и разрядов размыкания в БИЗ-2 ($\tau_{cc}=3$ мс)

3. Результаты расчётов и анализ искробезопасности исследуемых устройств (табл.1).

Таблица 1 – Результаты оценки аварийных режимов блоков искрозащиты ШГС ($L_c = 4$ мкГн)

U_{AB} , В	$I_{ном}$, А	$I_{КЗ}$, А	T_p , мксек	SD , мкДж
БИЗ-2 (КЗ)				
4,5	0,75	1,59	12,209	8,534
4,5	1	1,86	19,119	12,502
4,5·1,5	0,75	1,714	12,999	13,104
4,5·1,5	1	2,221	30,183	28,985
БИЗ-2 (Обрыв)				
4,5·1,5	0,75	-	12,97	4,62
4,5·1,5	1,1	-	17,87	20
4,5·1,5	7	-	45,41	231
БИЗ-4 (Обрыв)				
4,5·1,5	0,673	-	28	7

Во всех исследованных режимах энергия разрядов для обоих типов блоков не превышает минимальной энергии зажигания метано-воздушной смеси, которая составляет 0,28 мДж [4]. Это подтверждает искробезопасность исследуемых устройств.

Наибольшие значения энергии разряда наблюдаются при токах, близких к предельным значениям срабатывания защиты. Однако даже в этих случаях запас искробезопасности остаётся значительным. Например, при максимальной энергии разряда 28,985 мкДж запас относительно порога зажигания составляет более 9 раз.

Особое внимание следует уделить режиму обрыва цепи при токе 7 А для БИЗ-2, где энергия разряда составила 231 мкДж. Это значение приближается к пороговому (280 мкДж), что указывает на необходимость тщательной настройки параметров защиты для таких режимов работы. Однако данный режим является аварийным и нештатным, так как номинальные токи светильников значительно ниже.

Выводы

1. Методика учёта скорости коммутации (0,046–6,5 м/с) позволяет корректно оценивать искроопасность. Максимальная энергия разряда достигается при максимальной скорости размыкания контактов.
2. Энергия разрядов блоков БИЗ-2 и БИЗ-4 (режимы КЗ и обрыва) ниже порога зажигания метано-воздушной смеси (0,28 мДж). Запас безопасности составляет 9,7–60 раз.
3. Датчик с насыщающимся трансформатором превосходит линейный индуктивный: динамическая чувствительность выше на 14%, что обеспечивает более раннее отключение и снижение энергии разряда.
4. Определена граница эффективной работы индуктивных датчиков: отношение постоянной времени к времени разряда не должно превышать 1,446.
5. Расчётные схемы позволяют оптимизировать цепи на этапе проектирования без испытаний во взрывных камерах. Точность оценки энергии разряда подтверждена (погрешность ± 5 –7%).
6. Блок БИЗ-2 с комбинированным отключением обеспечивает высокое быстродействие и минимальную энергию разряда, что предпочтительно для шахтных светильников.

Перечень ссылок

1. Ткачук С.П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / В.П. Колосюк, С.А. Ихно. – Киев: Основа, 2000. – 698 с.
2. Ковальчук А. Н. Особенности разработки головного взрывобезопасного шахтного светильника СВГ5 / А. Н. Ковальчук, В. И. Кохановский, Г. Л. Федоренко // Тезисы докладов научно-практической конференции [„Пути повышения безопасности горных работ в угольной отрасли“], (г. Макеевка, 8-9 декабря, г. Святогорск 10-11.12. декабря 2004 г.) - г. Макеевка, 2004. С. 387 – 390.
3. Бершадский И. А. Анализ электровзрывобезопасности на основе динамических моделей разряда при коммутации электрической цепи / И. А. Бершадский, А. Ю. Гладков, В. В. Иванилов // Электричество. — 2022. — № 2. — С. 19–28.
4. ГОСТ 31610.11–2014 (ИЕС 60079-11:2011). Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 11. Искробезопасная электрическая цепь «i». — Введ. 2015-12-01. — Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2016. — 120 с.

УДК 621.313

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

С.Н. Ткаченко, А.С. Хапченков

ФГБОУ ВО «Донецкий Национальный Технический Университет»

Аннотация: Работа посвящена анализу путей исследования режимов самозапуска асинхронных двигателей системы собственных нужд энергоблоков современных тепловых электрических станций. Выполнен критический анализ существующих в настоящее время в мире специализированных программных комплексов для ПЭВМ, рассчитанных для моделирования самозапуска двигательной нагрузки. Установлено, что наиболее подходящим для качественного исследования самозапуска асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций является учебная САПР электрической части станций и подстанций, разработанная в ФГБОУ ВО «ДонНТУ», но требующая дальнейшего совершенствования с позиции дополнения модулем определения температуры нагрева обмоток короткозамкнутых асинхронных машин в процессах прямого пуска и самозапуска.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, система собственных нужд, специализированный программный комплекс, модуль оценки температуры нагрева

Annotation: This paper analyzes the potential for investigating self-starting modes for induction motors used in auxiliaries power systems at modern thermal power plants. A critical analysis of currently available specialized PC software packages designed for simulating motor load self-starting is has been conducting. It is determined that the educational CAD system for electrical components of power plants and substations, developed at DonNTU, is most suitable for a high-quality study of self-starting of auxiliary power system induction motors. However, further improvement is required, including a module for determining the winding temperature of squirrel-cage induction machines during direct starting and self-starting.

Keywords: induction motor, auxiliaries, specialized software package, heating temperature assessment module.

Постановка задачи. Одним из ключевых аномальных режимов работы асинхронных электрических двигателей (АЭД), применяемых в качестве электроприводных машин установок и механизмов системы собственных нужд (СН) современных тепловых электростанций

(ТЭС), является самозапуск [1-3]. Согласно [2-3] для поддержания надёжной работы технологического цикла производства электрической и тепловой энергии на ТЭС необходимо обеспечивать самозапуск всех АЭД, приводящих во вращение ответственные агрегаты ССН, как например, питательные электронасосы (ПЭН), конденсатные насосы (КН), циркуляционные насосы (ЦН), резервный возбудитель (РВ), дымососы (Д), дутьевые вентиляторы (ДВ) и др. Несмотря на наличие большого количества научных работ, посвящённых исследованию группового и индивидуального самозапуска двигательной нагрузки актуальной является задача комплексного анализа путей исследования вышеуказанного режима работы с рассмотрением специализированного программного обеспечения (ПО).

Изложение основного материала. Согласно [1-5] под самозапуском понимают процесс восстановления нормальной работы электропривода без вмешательства эксплуатационного персонала после кратковременного перерыва питания или глубокого снижения напряжения питающей сети. Обеспечение самозапуска электродвигателей (ЭД) ССН является одним из важных технических средств повышения надёжности работы энергоблоков ТЭС.

В настоящее время в мире существует множество вычислительных комплексов (ПРК) или специализированного программного обеспечения (ПО) с помощью, которых возможно осуществлять расчёты нормальных, аномальных и аварийных режимов работы энергообъектов ССН современных тепловых электростанций, включая режимы пуска и самозапуска двигательной нагрузки [6]. К числу наиболее распространённых ПРК можно выделить наиболее распространённые программы:

- Siemens® PSS® Sincal;
- DIgSILENT® PowerFactory;
- Manitoba® PSCAD®;
- ETAP® от Operation Technology®;
- MathWorks® MATLAB®;
- SimInTech® (ООО «ЗВ Сервис»);
- ПРК «EnergyCS Электрика 2026» (CSoft Development);
- GUMOTORS (кафедра «Электрические станции» ФГБОУ ВО «Московский энергетический институт»);
- САПР электрической части и подстанций (учебная САПР или CAD_Electrical_Education), разработанная на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Программное обеспечение Siemens® PSS® Sincal представляет собой сложный вычислительный комплекс, разработанный

транснациональной корпорации Siemens®. К недостаткам данного ПО можно отнести сложности поиска или идентификации параметров элементов сети, сложности с получением бесплатной лицензии и отсутствия наличия подробной инструкции пользователя.

PowerFactory от компании DIgSILENT® – это программное приложение для анализа установившихся и переходных процессов в электрических схемах. Программа охватывает полный диапазон функциональности системы. К недостаткам данного ПРК можно отнести отсутствие бесплатной лицензии, а также трудности с качественной идентификацией параметров схемы замещения АЭД.

ПО ETAP® от Operation Technology® – это вычислительный комплекс полного спектра, специализирующийся на анализе, математическом моделировании, оптимизации и автоматизации электроэнергетических систем, в том числе узлов с двигательной нагрузкой. К недостаткам данного ПО можно отнести проблемы с наличием бесплатной версии ПРК, а также оптимизация расчётных графического интерфейса и математических моделей под американские стандарты ANSI.

Manitoba® PSCAD® – это вычислительный комплекс для моделирования различных установившихся и переходных режимов энергосистем. Данное ПО использует модуль математического моделирования переходных процессов EMTDC (Electromagnetic Transient Simulation). Помимо проблем с получением бесплатной версии данного ПРК существует недостаток, связанный с недоступностью определённых моделей энергообъектов в стандартной библиотеке элементов.

Мощным ПРК, предназначенным для решения широкого спектра инженерных, научных и математических задач в различных областях науки и техники в том числе в области электротехники и электрохимии является ПО MathWorks® MATLAB®. Расчёт различных режимов работы энергообъектов ССН удобно выполнять в Simulink – графической среде математического моделирования динамических систем, входящей в пакет MATLAB®. Однако в применяемых алгоритмах идентификации параметров эквивалентных схем замещения АЭД присутствуют погрешности, что не позволяет их корректно использовать для асинхронных машин со значительным проявлением скин-эффекта в короткозамкнутой обмотке ротора.

Помимо наличия высокой стоимости лицензии все вышеперечисленные ПРК в настоящее время не поставляются на рынок ПО России в рамках агрессивной политики санкционного давления, проводимой западными странами.

Отечественное ПО SimInTech[®] производства ООО «3В Сервис» представляет собой аналогичный MATLAB[®] программный комплекс или среду динамического моделирования технических систем [7]. Данный перспективный ПРК позволяет выполнять расчёты различных режимов работы включая самозапуск ЭД ССН ТЭС. Недостатком является использование упрощённых методов определения параметров эквивалентных схем замещения АЭД.

Отечественный ПРК «EnergyCS Электрика 2026» от компании CSoft Development предназначен для выполнения электротехнических расчётов при проектировании и эксплуатации распределительных сетей как переменного, так и постоянного тока. Все вычислительные операции в данном ПРК выполняются с помощью расчётной модели электрической сети, которая отражает конфигурацию схемы и основные свойства её энергообъектов. Режим самозапуска асинхронных двигателей как таковой в программе невозможно исследовать, за исключением расчёта возможного тока самозапуска и возможного остаточного напряжения в данном аномальном режиме. В ПРК «EnergyCS Электрика 2026» предусмотрено несколько вариантов оценки тока самозапуска АЭД с КЗР:

- путём расчёта суммарного номинального тока АЭД с применением повышающего коэффициента больше единицы (по умолчанию принимается, что ток самозапуска электродвигателей равен четырёхкратному номинальному току;

- путём расчёта суммарного тока полностью заторможенных АЭД с применением понижающего коэффициента меньше единицы.

- путём расчёта суммарного тока всех участвующих в процессе самозапуска заторможенных АЭД, но с определением снижающего коэффициента в зависимости от времени прерывания электроснабжения с использованием эмпирической зависимости, заведенной в ПРК.

На кафедре «Электрические станции» Московского энергетического института была разработана программа GUMOTORS, которая может быть использована при настройке противоаварийной автоматики и устройств релейной защиты, а также при проверке режимов работы электротехнического и технологического оборудования электростанций и промышленных предприятий при пусках и перерывах питания асинхронных электродвигателей напряжением 6 кВ [8]. Данная программа позволяет произвести расчет электромеханических переходных процессов в группе асинхронных двигателей. К недостаткам можно отнести отсутствие возможности

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

вносить изменения в характеристики ЭД, а также возможность подключения двигателей лишь к одной или двум секциям (сборкам).

На кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ» была разработана система автоматизированного проектирования (САПР) на базе САПР-системы Autodesk® AutoCAD®, с помощью которого был реализован дружественный графический интерфейс пользователя, создано программное и информационное обеспечение системы, а также документирование результатов выполнения проектных процедур [9]. С помощью электронных таблиц в xls-формате создано информационное обеспечение САПР, а именно справочная информация по силовым трансформаторам и автотрансформаторам, синхронным генераторам, выключателям, ЭД и др. Справочная информация включает в себя технические данные оборудования мировых лидеров в области энергетики. Копия экрана вышеуказанной программы представлена на рисунке 1.

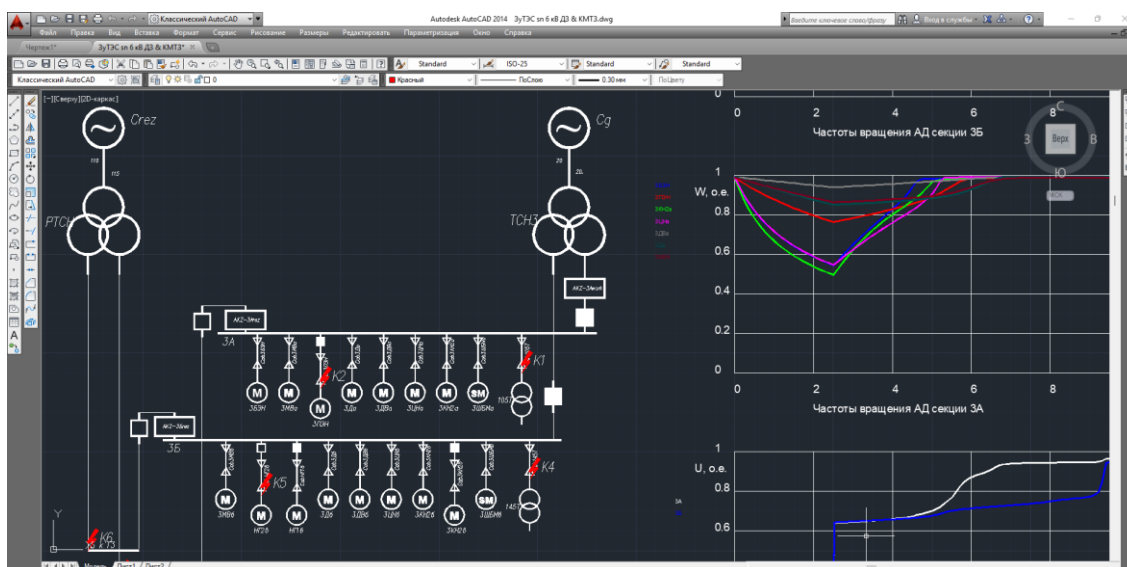


Рис. 1. Общая расчетная схема главных электрических соединений системы собственных нужд ЗуТЭС

Оригинальностью отличается использованная в расчётах пусков и самозапусков глубокопазных АД их математическая модель в виде одноконтурной эквивалентной схемы замещения с зависимыми от скольжения сопротивлениями цепи ротора, позволяющая с большой точностью аппроксимировать исходные пусковые характеристики ЭД.

Однако данное ПО требует доработки с позиции добавления модуля вычисления температуры нагрева обмоток статора и короткозамкнутого ротора асинхронных двигателей.

Выводы

1. Выполнен критический анализ существующих в настоящее время в мире специализированных программных комплексов для ПЭВМ, рассчитанных на моделирование самозапуска ЭД.

2. Установлено, что наиболее подходящим ПО для исследования самозапуска ЭД ССН ТЭС является учебная САПР электрической части станций и подстанций, разработанная на кафедре «Электрические станции» ФГБОУ ВО «ДонНТУ», но требующая дальнейшего совершенствования с позиции дополнения модулем определения температуры нагрева обмоток АЭД.

Перечень ссылок

1. Козлов, А.Н. Собственные нужды тепловых, атомных и гидравлических станций и подстанций: учебное пособие / А. Н. Козлов, В. А. Козлов, А. Г. Ротачёва [Изд. 2-е, испр. и доп.]. – Благовещенск, Изд-во АмГУ, 2013. – 315 с.

2. Сивокобыленко, В. Ф. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций [Уч. Пособие] / В. К. Лебедев – Донецк, ДонНТУ, 2002. – 136 с.

3. Булычёв, А. В. Анализ процессов самозапуска электродвигателей в современных электрических распределительных сетях с позиций релейной защиты / А. В. Булычёв, М. А. Грибков // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 1(50). – С. 30-38.

4. Галеева, Р.У. Алгоритм моделирования самозапуска группы асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором / Р.У. Галеева, С.В. Куксов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – т. 23, №. 3. – 2021. – С. 181-193

5. Ткаченко, С. Н. Анализ режимов работы асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и совершенствование методов их исследования / С. Н. Ткаченко // Вестник Ивано

вского государственного энергетического университета. – 2025. – № 2. – С. 34-42. – DOI 10.17588/2072-2672.2025.2.034-042.

6. Компания ООО «ЗВС» (SimInTech®). : офиц. сайт. – Москва, 2024. –URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 03.06.2026).

7. АО «СиСофт Девелопмент» (EnergyCS Электрика 2026) : офиц. сайт. – Москва, 2026. – URL: <https://www.csoft.ru/soft/energycs-electrica/energycs-elektrika-2026.html> (дата обращения: 03.06.2026).

8. Программные разработки кафедры «Электрические станции» НИУ «МЭИ» : офиц. сайт. – Москва, 2026. – URL: <https://es-mpei.ru/development/> (дата обращения: 03.06.2026).

9. Павлюков, В. А. Учебная САПР схем первичных электрических соединений станций и подстанций: учеб. Пособие / В. А. Павлюков, С. Н. Ткаченко – Донецк: Издательство ООО «НПП «Фолиант», 2021. – 264 с.

УДК 622.882:620.92

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТВАЛОВ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Б.С. Федоров, Е.И. Шарибченко
ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк, ДНР

Аннотация: В статье описываются основные перспективы использования отвалов горных пород Донбасса как площадок для размещения объектов возобновляемой энергетики в рамках рекультивации техногенных территорий. Проведен анализ существующих подходов к интеграции солнечных, ветровых и тепловых энергетических систем.

Ключевые слова: отвалы горных пород, терриконы Донбасса, рекультивация, возобновляемая энергетика, солнечная энергетика, ветроэнергетика, техногенные ландшафты, гибридные энергетические системы, устойчивое развитие.

Abstract: The article describes the main prospects for using Donbas rock piles as sites for renewable energy facilities as part of the reclamation of technogenic territories. The article analyzes existing approaches to integrating solar, wind, and thermal energy systems.

Keywords: rock piles, Donbas spoil heaps, reclamation, renewable energy, solar energy, wind energy, technogenic landscapes, hybrid energy systems, and sustainable development.

Историческое развитие горнодобывающей промышленности Донбасса сопровождалось формированием масштабных техногенных ландшафтов, основным элементом которых стали отвалы горных пород [1]. На территории региона сосредоточено несколько сотен терриконов различной высоты и степени стабилизации, которые десятилетиями рассматривались исключительно как объекты экологической угрозы и требовали затратных мероприятий по изоляции [1]. Современный подход к управлению постпромышленными территориями предполагает переход от пассивного консервирования к активному использованию пространственного и ресурсного потенциала этих объектов [2]. Интеграция возобновляемых энергетических решений в процессы рекультивации открывает новые возможности для локального энергоснабжения, создания инфраструктуры и повышения экономической привлекательности районов [2]. Для реализации

данного направления необходим системный анализ существующих технологий, оценка их совместимости с региональными условиями и формирование адаптивных инженерных стандартов.

Глобальный переход к низкоуглеродной экономике сопровождается ростом спроса на земельные ресурсы для размещения объектов возобновляемой энергетики. Традиционное использование сельскохозяйственных или природных территорий часто вызывает конфликты интересов и повышает стоимость проектов. Терриконы Донбасса обладают устойчивой топографией, минимальной альтернативной ценностью для землепользования и естественным преимуществом в виде повышенной инсоляции и аэродинамических характеристик [2]. Многие отвалы сохраняют внутреннюю тепловую активность за счет медленного окисления углеродсодержащих фракций, что создает потенциал для утилизации низкопотенциального тепла [3]. В условиях восстановления региона актуальным становится поиск решений, способных обеспечить энергетическую автономию населенных пунктов без зависимости от централизованных сетей. Комплексное использование отвалов позволяет одновременно решить задачи экологической безопасности, создания рабочих мест, генерации чистой энергии и формирования новой инфраструктуры [2].

Провести сравнительный анализ научно обоснованных и практически апробированных подходов к размещению возобновляемых энергетических систем на отвалах горных пород, выявить ключевые технические и регуляторные ограничения, а также разработать адаптивную модель внедрения для условий Донбасса.

Зарубежная практика демонстрирует устойчивую тенденцию к превращению бывших горных отвалов в многофункциональные энергетические площадки [2]. В странах Центральной Европы на стабилизированных терриконах успешно размещаются фотоэлектрические станции различной мощности. Исследования показывают, что оптимальная ориентация склонов и использование легких опорных конструкций позволяют достигать высокой энергетической эффективности при соблюдении норм устойчивости грунтов. При этом угол склона не должен превышать пятнадцать градусов, а фундаментная система должна учитывать риск дифференциальной осадки. Особое внимание уделяется системам мониторинга состояния поверхности [3].

В российских научных работах подробно рассматриваются технологии извлечения низкотемпературного тепла из внутренних зон отвалов [3]. Закрытые грунтовые теплообменники, размещенные на глубине от пяти до пятнадцати метров, циркулируют теплоноситель без

прямого контакта с породой. Это позволяет безопасно использовать тепловую энергию, генерируемую при окислении сланцев и угольных включений, для отопления жилых массивов и сельскохозяйственных комплексов [3].

Аэродинамические преимущества возвышенных отвалов активно исследуются в контексте размещения ветрогенераторов. Возвышенность терриконов изменяет профиль ветра, увеличивая среднюю скорость потока по сравнению с прилегающей местностью. При этом научные работы подчеркивают необходимость учета вибрационных нагрузок на неуплотненные слои и применения фундаментов с распределенным давлением [3].

В современных научных сборниках по экологической инженерии предлагается интегрировать несколько генерирующих контуров в единую гибридную систему. Комбинирование солнечных модулей, ветровых установок и геотермальных контуров компенсирует суточные и сезонные колебания выработки. Дополнительно рассматривается возможность подключения накопителей энергии и организации микросетей для автономного снабжения локальных потребителей.

Применение данных технологий в Донбассе требует учета региональной специфики. Многие терриконы находятся в разной стадии рекультивации, часть из них сохраняет признаки тления или повышенной влажности [1]. Инженерная подготовка должна включать дренажные работы, укрепление откосов, установку газовых датчиков и создание защитного почвенного слоя [3].

Отвалы горных пород Донбасса представляют собой перспективную инфраструктурную основу для развития возобновляемой энергетики при условии соблюдения комплексных инженерных и экологических стандартов [1; 3]. Ключевыми условиями успешной адаптации являются предварительная стабилизация грунтов, внедрение систем мониторинга и разработка региональных нормативных требований [3].

Список литературы

1. Борщевский С. В., Руссиян С. А., Ткаченко С. Н. Породные отвалы угольных шахт Донбасса: мониторинг, классификация и пути рационального использования // Горное дело и устойчивое развитие. 2024. № 3. С. 34–45.
2. Хоменко Я. В., Солдатова А. С. Оценка проблемы терриконов Донбасса // Экономический вестник Донбасса. – 2015. – № 1 (39). – С. 12–19.
3. Зубов А. Р., Зубова Л. Г., Смирный М. Ф. Экологическая безопасность терриконовых ландшафтов Донбасса. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2006. – 232 с.

УДК 004.312.46: 629.33

ПОСТРОЕНИЕ ПРОТОТИПА БОРТОВОЙ СЕТИ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ CAN- ШИНЫ И ARDUINO

М.О. Федоров, А.В. Захаров

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»

г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Разработана распределённая система мониторинга и управления на основе CAN-шины и микроконтроллеров Arduino, предназначенная для транспортных средств. Реализованы сбор температуры, диагностика связи и автоматическое управление охлаждением. Предложенная архитектура повышает надёжность и модульность бортовой сети.

Ключевые слова: CAN-шина, Arduino, распределённая система управления, мониторинг температуры, система охлаждения, диагностика узлов сети.

Annotation: A distributed monitoring and control system based on the CAN bus and Arduino microcontrollers is developed for vehicle applications. Temperature acquisition, communication diagnostics, and automatic cooling control are implemented. The proposed architecture improves reliability and modularity of the onboard network.

Keywords: CAN bus, Arduino, distributed control system, temperature monitoring, cooling system, network node diagnostics.

Разрабатываемое устройство представляет собой распределённую систему мониторинга и управления, построенную на основе CAN-шины (Controller Area Network) и микроконтроллеров Arduino [1, 3]. Выбор CAN-шины обусловлен её высокой помехоустойчивостью, детерминированным временем доступа и широким распространением в автомобильной электронике, что позволяет объединять до 127 узлов в единую сеть с приоритезацией сообщений и автоматической диагностикой коллизий.

В рамках системы решаются следующие задачи: измерение температуры, передача данных между узлами по CAN-шине со скоростью 250 кбит/с, автоматическое управление исполнительным устройством (вентилятором охлаждения), отображение состояния системы на OLED-дисплее, а также контроль исправности узлов сети с помощью heartbeat-сообщений.

Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем

Система состоит из трёх независимых узлов, каждый из которых построен на базе микроконтроллера Arduino Nano/Uno (рис.1). Все узлы подключены к общей двухпроводной линии CAN с установленными терминаторами 120 Ом на концах шины для устранения отражений сигнала.

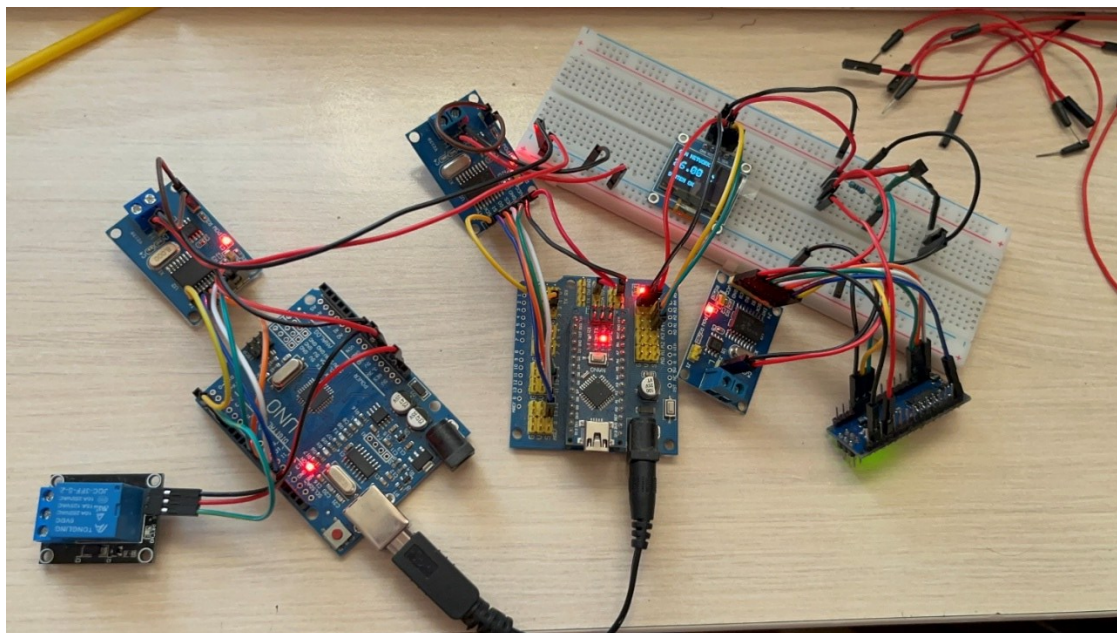


Рисунок 1 – Фото стенда электрической бортовой сети на CAN

Главный управляющий узел включает Arduino, CAN-модуль MCP2515 и OLED-дисплей SSD1306; он принимает данные от измерительного и исполнительного узлов, отображает текущую температуру и статус связи, анализирует температуру, формирует управляющие команды для вентилятора и осуществляет диагностику связи. При отсутствии сообщений от какого-либо узла более двух секунд на дисплей выводится соответствующая ошибка.

Измерительный узел, состоящий из Arduino, датчика DS18B20 и CAN-модуля, опрашивает датчик каждые 500 мс, передаёт значение температуры по CAN-шине с идентификатором 0x100.

Исполнительный узел (Arduino, релейный модуль, CAN-модуль) принимает команды управления с CAN ID = 0x200 (0x01 – включить вентилятор, 0x00 – выключить), управляет реле, коммутирующим питание вентилятора, и периодически отправляет своё состояние (CAN ID = 0x201) с сообщением «1».

Принципиальная схема электрических соединений приведена на рис.2.

Каждое сообщение в сети имеет уникальный идентификатор, причём меньший ID соответствует более высокому приоритету. В

The diagram illustrates the hardware setup for a 3-axis digital compass system. It features an Arduino Uno R3 connected to an HMC5883L digital compass module. The Uno R3 is also connected to three Arduino Nano2 boards via I2C. Each Nano2 board is connected to its own HMC5883L module and a DS18B20 temperature sensor. The system is powered by a 5V regulator and a 3.3V regulator, with ground connections throughout. The diagram includes pin headers for the modules and the boards, with labels for VCC, GND, and signal lines.

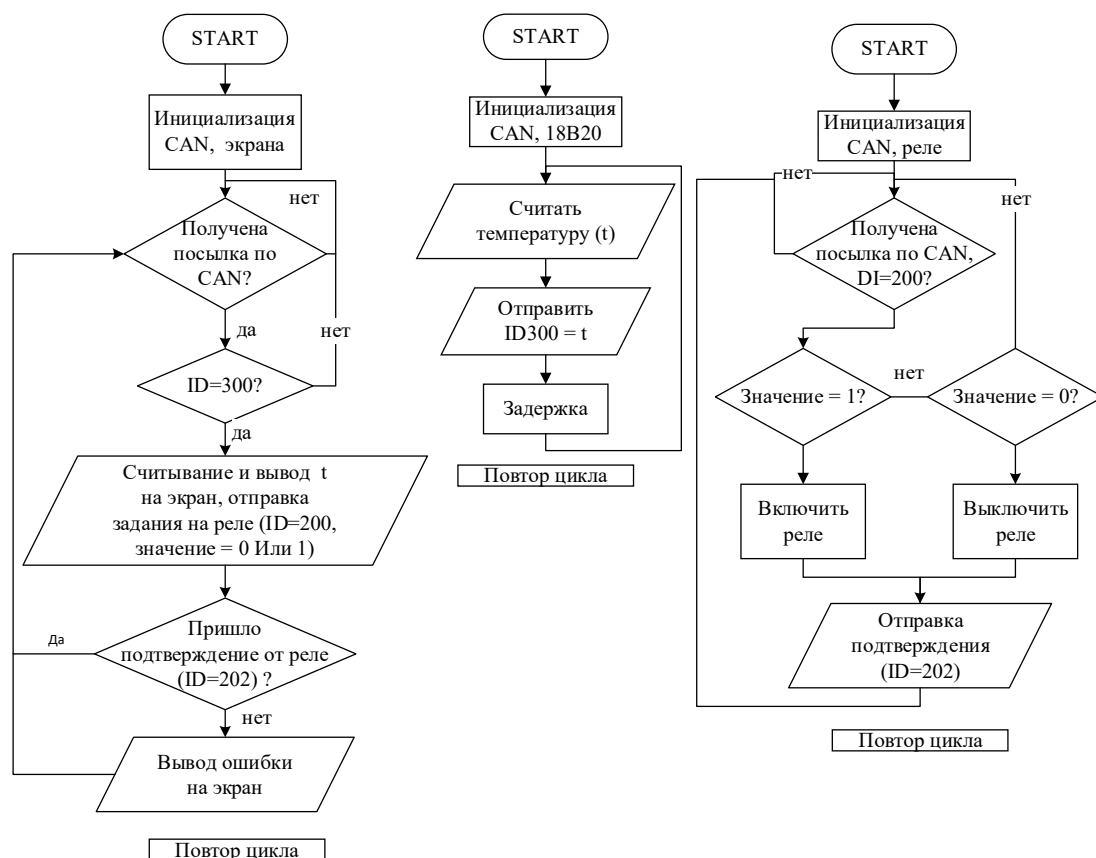


Рисунок 3 – Упрощённая блок-схема работы бортовой сети

Heartbeat-механизм реализован следующим образом: каждый узел, кроме главного, отправляет короткое сообщение каждую секунду, а главный узел запускает таймер. Если от какого-либо узла heartbeat отсутствует более двух секунд, на дисплей выводится сообщение об ошибке («Нет связи с датчиком» или «Нет связи с реле»); при восстановлении связи ошибка автоматически сбрасывается.

При температуре, достигающей 31 °С или превышающей этот порог, вентилятор включается; при снижении температуры до 28 °С или ниже вентилятор выключается. В диапазоне от 28 до 31 °С вентилятор сохраняет предыдущее состояние. Данное решение устраняет дребезг реле, который возникал бы при использовании единственного порога 30 °С, предложенного в первоначальной версии системы.

Предложенная архитектура легко масштабируется. К существующей линии CAN могут быть добавлены новые узлы без изменения конфигурации существующих – достаточно назначить им уникальные CAN ID. В качестве примеров расширения можно указать подключение датчиков напряжения и тока для контроля заряда аккумулятора, дополнительного исполнительного узла для управления нагревателем, узла с Bluetooth-модулем для передачи данных на

смартфон, а также модуля записи аварийных событий во встроенную EEPROM.

Выводы

В результате работы разработана и практически реализована распределённая система мониторинга и управления на основе CAN-шины и микроконтроллеров Arduino. Достигнута надёжная передача данных между узлами с приоритизацией сообщений, реализованы диагностика связи по heartbeat-механизму и автоматическое управление охлаждением с гистерезисом. Предложенная архитектура отличается модульностью, помехоустойчивостью и масштабируемостью. Помимо применения в транспортных средствах, система может быть использована в учебно-исследовательских целях при создании прототипов мобильных роботов, где требуется распределённый сбор данных с датчиков, диагностика подсистем и удалённое управление исполнительными устройствами по единой шине.

Перечень ссылок

1. MCP_CAN Library : репозиторий / Cory J. Fowler. — URL: https://github.com/coryjfowler/MCP_CAN_lib (дата обращения: 05.05.2026). — Текст : электронный.
2. MCP_CAN : Arduino Libraries / Cory J. Fowler. — URL: https://www.arduino-libraries.info/libraries/mcp_can (дата обращения: 05.05.2026). — Текст : электронный.
3. MCP2515 CAN Module Arduino Tutorial : сайт. — URL: <https://arduinokitproject.com/mcp2515-can-module-arduino-tutorial/> (дата обращения: 05.05.2026). — Текст : электронный.

УДК 621.383.51

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

В.Г. Черников, Н.М. Муха
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» г.
Донецк, ДНР, Российская Федерация

Аннотация: Разработана система управления ориентированием фотоэлектрического модуля на базе микропроцессорного контроллера и позиционного электропривода. Предложенный метод формирования сигнала задания на угол поворота модуля позволяет существенно повысить энергоэффективность фотоэлектрической системы.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль (ФЭМ), система ориентирования / трекер, разомкнутая система управления, алгоритм определения положения Солнца (SPA), наклонная ось вращения, энергоэффективность, микропроцессорный контроллер

Annotation: A control system for the orientation of a photovoltaic module based on a microprocessor controller and a position electric drive has been developed. The proposed method for generating the setpoint signal for the module rotation angle allows significantly increasing the energy efficiency of the photovoltaic system.

Keywords: photovoltaic module (PV module), solar tracking system / tracker, open-loop control system, solar position algorithm (SPA), tilted rotation axis, energy efficiency, microprocessor controller.

Введение

На фоне бурного прогресса в области "зеленой" энергетики, доля не загрязняющих окружающую среду источников энергии в общем объеме энергопотребления передовых государств неуклонно увеличивается. За последние десять лет максимальные темпы развития продемонстрировали энергокомплексы, основанные на ветровых турбинах и солнечных панелях. Как следствие, значительный научный и исследовательский интерес сосредоточен на создании алгоритмов управления, которые могут обеспечить более высокую производительность установок, использующих возобновляемые ресурсы.

Постановка задачи: Анализ существующих конструкций и алгоритмов управления для систем ориентирования фотоэлектрических модулей. Выбор аппаратных и программных компонентов, необходимых для реализации разомкнутой системы управления ориентированием ФЭМ с наклонной осью.

Эффективность фотоэлектрических модулей (ФЭМ) существенно зависит от угла падения солнечного излучения.

Оптимизация ориентации панелей повышает выработку энергии и экономическую эффективность СЭС. Существуют следующие основные типы систем ориентирования ФЭМ.

Стационарные системы — панели зафиксированы под оптимальным годовым углом, в Северном полушарии ориентированы на юг. Угол наклона приблизительно равен широте местности, возможна сезонная коррекция ($\varphi \pm 15^\circ$). Преимущества: низкая стоимость, надёжность, простота. Недостатки: неоптимальный угол в течение дня, сезонные потери. Применение: частные домохозяйства, малые объекты.

Одноосевые трекеры (горизонтальные, вертикальные, наклонные) поворачивают панели вокруг одной оси, отслеживая суточное движение Солнца. Прирост выработки — 20–30% по сравнению со стационарными. Требуют механизмов поворота, обслуживания, большей площади. Применение: средние и крупные СЭС.

Двухосевые трекеры обеспечивают слежение по двум осям, поддерживая нормальное падение лучей (угол падения - $\theta=0$, $\cos\theta=1$). Прирост выработки 35–40%. Недостатки: высокая стоимость, сложность управления, уязвимость к погоде. Применение: крупные СЭС, регионы с низкой инсоляцией. Разновидности систем ориентирования ФЭМ показаны на рис.1 [1].

Гибридные системы комбинируют стационарные и трекерные модули и позволяют оптимизировать затраты и эффективность в сложных условиях. Недостатки: усложнение проектирования и интеграции.

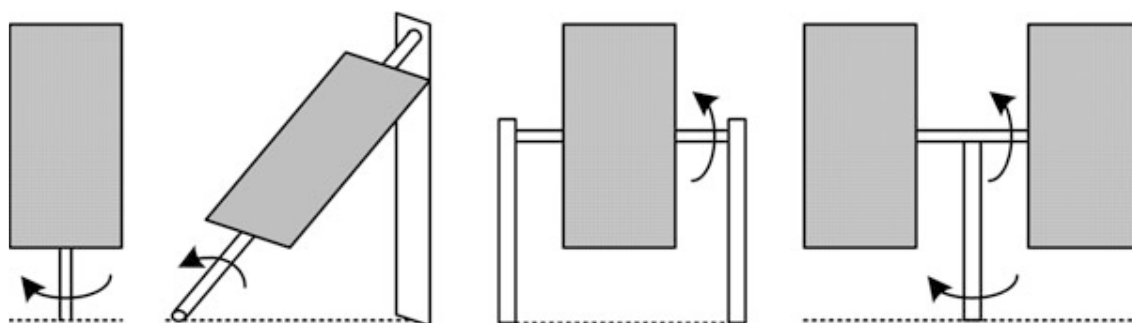


Рис.1 Типы систем ориентирования ФЭМ: одноосевые вертикальная, наклонная и горизонтальная и двухосевая

В активных трекерах, используемых для позиционирования фотоэлектрических панелей, ключевое значение имеют алгоритмы

управления, которые генерируют команды для исполнительных устройств, обеспечивая необходимое позиционирование с высокой точностью. Как показывают результаты исследований, классификация таких алгоритмов строится на принципе организации обратной связи и включает три основные категории: алгоритмы с разомкнутым контуром, с замкнутым контуром и комбинированные (гибридные) схемы [2].

Алгоритмы управления разомкнутого контура функционируют без использования обратной связи от датчиков освещённости. В данном случае положение фотоэлектрического модуля определяется расчётным путём на основе астрономических моделей движения Солнца (например, алгоритмов определения положения Солнца — SPA). Основным преимуществом такого подхода является простота реализации и отсутствие необходимости в датчиках, что снижает стоимость системы. Однако недостатком является чувствительность к внешним возмущениям и накоплению ошибок, связанных с неточностями модели и механическими погрешностями [2].

В алгоритмах с обратной связью для коррекции положения модуля в реальном масштабе времени применяется сигнал с датчиков (в частности, фоторезисторов, CCD-матриц либо иных сенсоров освещённости). Благодаря этому такие системы компенсируют воздействие внешних дестабилизирующих факторов — изменений погодных условий, механических люфтов и неточностей монтажа. К числу наиболее востребованных алгоритмов этого типа относятся двухпозиционные регуляторы, ПИ- и ПИД-законы управления, а также методики на основе нечёткой логики. Согласно аналитическим данным, системы замкнутого типа находят достаточно широкое практическое применение [2].

Гибридные алгоритмы управления представляют собой комбинацию методов разомкнутого и замкнутого контуров. В таких системах предварительное позиционирование осуществляется на основе расчётных моделей, после чего производится уточнение положения с использованием обратной связи от датчиков. Это позволяет объединить преимущества обеих стратегий: высокую энергоэффективность и устойчивость к возмущениям при сохранении приемлемой сложности системы. Гибридные подходы особенно актуальны для высокоточных систем, использующих концентраторы солнечных лучей. Блок-схема гибридной системы показана на рисунке 2.

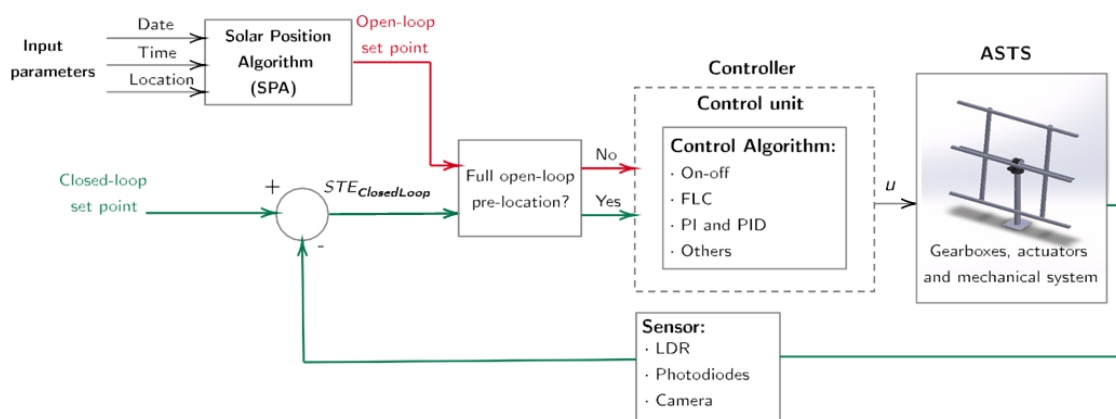


Рис.2 – Блок-схема гибридной системы управления

Таким образом, выбор конкретного алгоритма управления определяется требованиями к точности, стоимости и устойчивости системы ориентирования фотоэлектрического модуля. При этом повышение эффективности системы зачастую достигается за счёт оптимизации программной составляющей, без необходимости значительных изменений аппаратной части [2].

В статье рассматривается система управления ориентированием ФЭМ с наклонной осью, поскольку в этой системе один двигатель обеспечивает поворот модуля в горизонтальном и вертикальном направлениях. При этом, с точки зрения конструктивного решения, двигатель с закрепленной на валу шестерней вращает полудиск, который наклонен к земной поверхности на угол β . Поверхность модуля закреплена перпендикулярно поверхности полудиска, см. рис. 3.

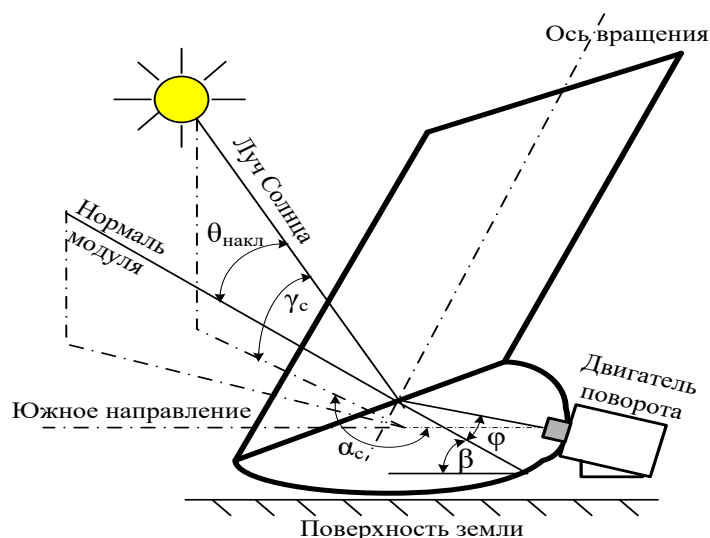


Рис.3 – Конструкция системы ориентирования с наклонной осью

На рисунке показаны следующие углы: φ – угол поворота полудиска относительно его центральной оси, β – угол наклона плоскости полудиска к земной поверхности, α – азимут Солнца, γ – угол высоты Солнца над горизонтом, $\theta_{\text{поп}}$ – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность модуля, то есть угол между нормалью модуля и направлением на Солнце.

В [3] показано, что оптимальный угол поворота полудиска системы ориентирования может быть вычислен на основании угла высоты солнца γ_C и азимута – α_C , а так же угла наклона полудиска к земной поверхности β по следующей формуле:

$$\varphi_{\text{опт}} = \arccos \left(\frac{\sin \gamma_C \cdot \sin \beta - \cos \gamma_C \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \beta}{\sqrt{(\sin \gamma_C \cdot \sin \beta - \cos \gamma_C \cdot \cos \alpha_C \cdot \cos \beta)^2 + (\cos \gamma_C \cdot \sin \alpha_C)^2}} \right) \quad (1)$$

В [4] также показано, что углы γ_C и α_C могут быть вычислены на основании информации о дне года. Рассматриваемая система управления, по приведенной выше классификации, относится к разряду разомкнутых систем, использующих алгоритм определения положения солнца (SPA).

Для реализации системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля предлагается использовать микропроцессорный контроллер – Simatic, который позволяет на основании данных системного таймера о дате и времени определять оптимальный угол поворота модуля. В качестве привода поворота использовался преобразователь частоты Micromaster 440, который обеспечивает вращение асинхронного электродвигателя. Структуру системы можно увидеть на рисунке 4.

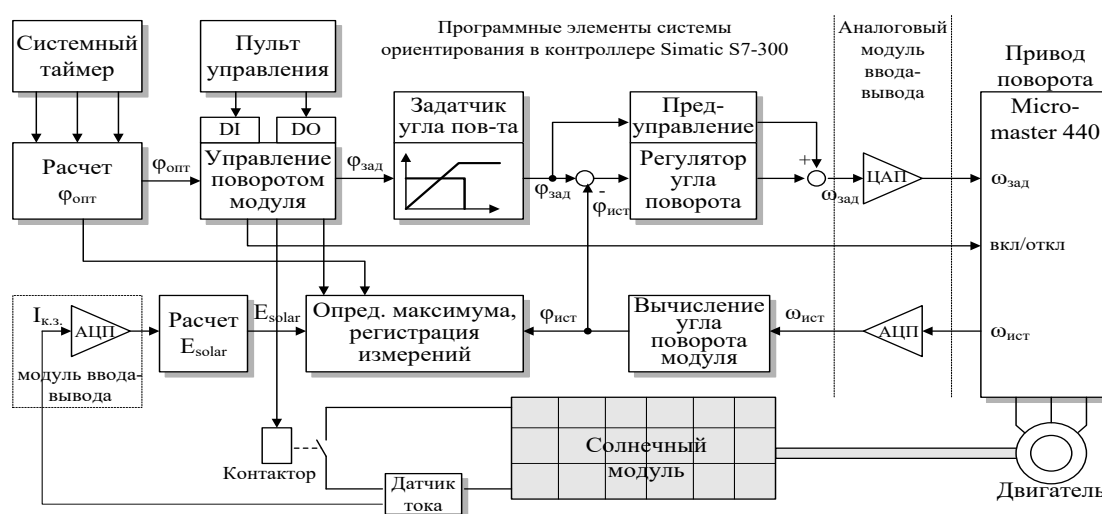


**Рис. 4 Структура системы управления ориентированием
фотоэлектрического модуля на базе ПЛК**

Блок управления поворотом модуля формирует последовательность заданий для системы ориентирования. Формирование сигнала задания на угол поворота модуля может происходить в двух режимах: автоматическом, при котором интервал выдачи задания определяется сигналом программного тактового генератора, и полуавтоматическом, где момент подачи задания задаётся оператором. Выбор режима осуществляется переключателями на пульте управления.

С помощью датчика положения обеспечивается плавное перемещение механизма поворота с заданными значениями скорости и ускорения. Далее сигнал задания поступает на регулятор положения, который совместно со звеном предуправления формирует сигнал задания скорости перемещения механизма ориентирования. Внутри звена предуправления вычисляется производная от сигнала задания на угол поворота $\varphi_{\text{зад}}$, что позволяет более эффективно формировать сигнал задания скорости и повысить быстродействие контура позиционирования. Цифровой сигнал заданного значения скорости $\omega_{\text{зад}}$ через ЦАП контроллера передаётся в аналоговой форме на привод поворота модуля.

Реальное значение скорости вращения привода $\omega_{\text{зад}}$ оценивается с помощью импульсного датчика, установленного на валу двигателя и имеющего точность 2048 импульсов на оборот. Сигналы импульсного датчика обрабатываются преобразователем частоты Micromaster 440 и в аналоговой форме поступают на АЦП контроллера, который оцифровывает значение сигнала скорости вращения двигателя поворота.

На основе полученного цифрового значения скорости может быть вычислен реальный угол поворота фотоэлектрического модуля $\varphi_{\text{ист}}$, который поступает в качестве обратной связи на регулятор положения.

При этом необходимо отметить, что нулевое значение угла поворота ФЭМ присваивается такому положению, когда его поверхность ориентирована перпендикулярно южному направлению. Нулевое значение угла поворота модуля фиксируется в системе управления соответствующим конечным выключателем.

В [5] показано, что предложенная система управления ориентированием ФЭМ при ясном небе повышает энергоэффективность фотоэлектрического модуля на 25% по сравнению с его жёстко закреплённым положением.

Выводы

1. Исследованы основные алгоритмы управления, используемые при реализации систем ориентирования фотоэлектрических модулей
2. Выбрано оборудование, необходимое для аппаратной реализации предложенной системы управления ориентированием ФЭМ с наклонной осью.
3. Определены задачи для программных блоков системы управления ориентированием фотоэлектрического модуля.
4. Приведена оценка повышения энергоэффективности ФЭМ в случае применения системы управления ориентированием с наклонной осью.
- 5.

Перечень ссылок

1. Wesselak Viktor Photovoltaik / Viktor Wesselak. – Berlin: Springer, 2012. – 129 с.
2. Fuentes-Morales R. F., et al. Control algorithms applied to active solar tracking systems: A review // Solar Energy. – 2020. – Vol. 212. – P. 203–219.
3. Черников, В.Г. Совершенствование систем управления специализированными энергоустановками на базе возобновляемых источников энергии : дис. ... канд. техн. наук : 2.3.3 / В. Г. Черников. — Донецк : Донецкий национальный технический университет, 2023. — 298 с.:
4. Куашнинг Ф. Системы возобновляемых источников энергии. Технология, расчеты, моделирование: учебник / Ф. Куашнинг. – Астана: Фолиант, 2013. – 480 с.
5. Черников В.Г. Разработка метода оптимального управления системой ориентирования фотоэлектрического модуля / Черников В.Г., Павлыш В.Н. // Научный журнал «Информатика и кибернетика». - Донецк, 2021. - №4(26). - С. 29-33.

УДК 621.314

ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСТАНЦИЯ

Д.М. Шевченко

ГБПОУ «НЕВИННОМЫССКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ТЕХНИКУМ»

г. Невинномысск, Ставропольский край

Аннотация: Представлен анализ внедрения высокоавтоматизированных подстанций (ВАПС) как ключевого элемента цифровой трансформации электроэнергетики России. Рассмотрена трёхуровневая архитектура ВАПС на базе стандарта МЭК 61850, особенности коммуникационных протоколов и преимущества цифровых решений. На примере подстанции «Медведевская» продемонстрированы практические результаты автоматизации: энергоэффективность, экологичность и возможность безлюдного режима работы. Показана революционная роль ВАПС в повышении надёжности энергоснабжения.

Ключевые слова: высокоавтоматизированные подстанция, цифровая энергетика, стандарт МЭК 61850, коммуникационные протоколы

Abstract: The paper presents an analysis of highly automated substations (HAS) implementation as a key element of Russia's digital energy transformation. The three-tier architecture of HAS based on IEC 61850 standard, communication protocols specifics, and digital solutions benefits are examined. The Medvedevskaya substation case study demonstrates practical results: energy efficiency, environmental friendliness, and unmanned operation capability. The revolutionary role of HAS in enhancing power supply reliability is shown.

Keywords: highly automated substations, digital energy, IEC 61850 standard, communication protocol

Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации, охватывает основную деятельность электросетевого комплекса - передачу и распределение электрической энергии и непосредственно связанные с ней аспекты смежных видов деятельности (генерацию и сбыт электрической энергии) на территории России.

Автоматизация и цифровизация затронула не только медицину, промышленность и множество других областей, но и энергетику. Все из-за удобства, теперь не надо хранить информацию в блокноте,

оборудования может общаться между собой и на основе данных предпринимать какие-либо решения. Главным проявлением цифровизации в энергетике является переход от традиционных подстанций с электромеханической аппаратурой и реле к микропроцессорному. Такой переход отличается своей дороговизной при этом никто не гарантирует что будет понимать устройства от другого бренда, чтобы избавиться от этой проблемы достаточно закупать от одного производителя. Но долго это продолжаться не могло, из-за устаревших протоколов дальнейшие развития традиционных подстанций невозможно. Осталось перейти от традиционных к высокоавтоматизированным подстанциям.

Высокоавтоматизированные подстанции является очередным этапом развития электроэнергетической отрасли и представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на оптимизацию и повышение эффективности производственных процессов распределения энергетических ресурсов и контроля за ними за счет применения новой технологии управления энергообъектом, построенной с учетом требований международного стандарта МЭК 61850. В отличие от традиционных подстанций оно выполнено на цифровых технологиях, международный стандарт МЭК 61850 «Коммуникационные сети и системы на подстанциях» определяет протоколы передачи, конфигурационный язык, информационные модели, процессы жизненного цикла, требования к ИЭУ, ПО и многие другие аспекты. Защиту и управление выполняют ИЭУ, их информационный обмен может полностью выполняться по сети Ethernet. Стандартные протоколы связи на всех уровнях обеспечивают совместимость устройств. Онлайн-мониторинг и дистанционное управление стали базовой возможностью ВАПС. Для измерений могут применяться маломощные (нетрадиционные) измерительные преобразователи.

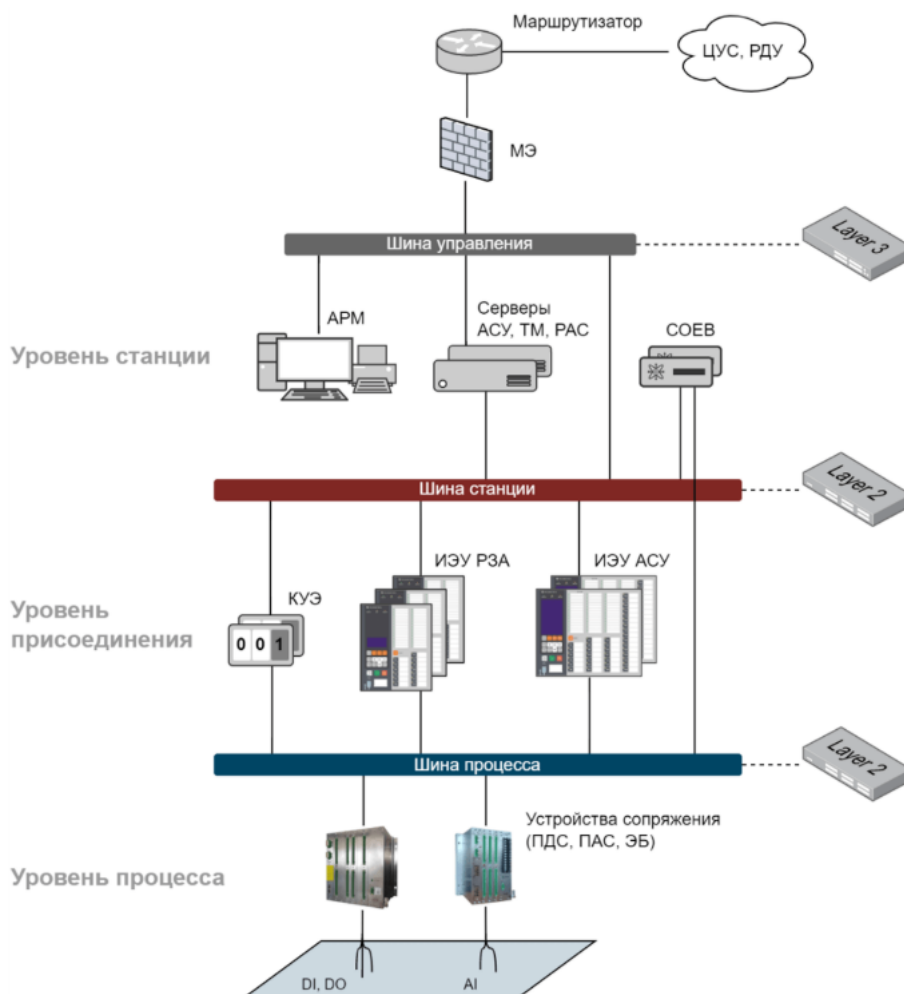


Рисунок 1 - Структура ВАС

Чтобы оборудование могло общаться между собой и понимать друг друга были созданы протоколы MMS, GOOSE, SV.

Протокол передачи данных MMS применяется для передачи данных по клиент-серверной технологии, как правило используется для обмена информацией между ИЭУ и системами верхнего уровня, а также между ИЭУ по локальной вычислительной сети. MMS управляет устройствами, собирает данные для SCADA, настраивает параметры системы.

Протокол GOOSE используется для быстрой передачи данных о событиях между ИЭУ по локальной вычислительной сети. Передает критически важные данные такие как сигналы аварийного выключения и включения выключателей, сигналы РЗА, сигналы неисправности цепей ТТ и ТН и сигналы с силового оборудования, действующего на отключения выключателей.

Протокол передачи данных SV используется для передачи значений тока и напряжения по локальной вычислительной сети. обеспечивает непрерывный поток аналоговых данных для алгоритмов защиты и мониторинга.

ВАПС построена на основе трёхуровневой иерархической архитектуры (как показано на схеме), где каждый уровень выполняет свои функции и взаимодействует с другими через специализированные шины и протоколы связи.

На уровне процесса происходит непрерывный сбор первичных данных о состоянии оборудования, преобразования аналоговых сигналов в цифровой формат и подаются команды на исполнительные механизмы. Состоит уровень из устройств сопряжения, которые преобразуют сигналы от датчиков и первичных измерительных преобразователей. Связь осуществляется через шину процесса

На уровне присоединения происходит обработка и концентрация данных с уровня процесса, реализуются локальные функции РЗА, передаются команды на уровень станции и выполняются команды оттуда же. Уровень состоит из контроллера управления оборудованием (КЭО), который обеспечивает взаимодействие между уровнем присоединения, интеллектуальные электронные устройства релейной защиты (ИЭУ РЗА) анализирует параметры и в случае нестабильной работы подает команду на отключение, интеллектуальные электронные устройства автоматизированной системы управления (ИЭУ АСУ) управляют коммутационными аппаратами. Связь осуществляется через шину станции по протоколам MMS и GOOSE.

На уровне станции происходит централизованное управление подстанцией. Здесь же происходит визуализация и архивирования данных, реализация алгоритмов противоаварийной автоматики, обмен данными с центром управлением сетями и региональным диспетчерским управлением при помощи маршрутизатора и шины управления.

Вышеописанная концепция уже воплощена в жизнь. В мае 2018 года закончилось строительство первой в России ВАПС “Медведевская”. Подстанция была спроектирована для электроснабжения объектов инновационного центра “Сколково”. Применены берегающие технологии, к примеру использования вырабатываемого тепла трансформатора на отопления помещения, приняты экологичные решения, которые сводит к нулю загрязняющие выбросы в атмосферу. На подстанции располагаются 2 силовых трансформатора мощность 80 МВА, распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ) 110 кв и комплексы РЗА и АСУТП на

микропроцессорных терминалах. Благодаря принятым решениям и использованным технологиям потребность в присутствии персонала нет.

Вывод

Внедрение высокоавтоматизированных подстанций представляет собой революционный шаг в развитии электроэнергетической отрасли. Благодаря применению цифровых технологий, современных протоколов связи и микропроцессорных систем управления достигается существенное повышение эффективности, надёжности и безопасности энергоснабжения. ВАПС становятся неотъемлемой частью современной энергетической инфраструктуры, обеспечивая оптимальное распределение и контроль энергетических ресурсов, а также минимизацию человеческого фактора в управлении энергообъектами.

Список используемых источников:

1. Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий» // Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/>
2. Наумов В.А., Матисон В.А., Федоров Ю.Г. Новые направления развития стандартизации в процессе цифровой трансформации электроэнергетики // Энергия единой сети. 2022 № 3-4 (64-65). С. 20-29.
3. Черкасский П., Попов С. Риски применения электротехнических комплексов на основе СИМ-модели (МЭК 61970, МЭК 61968) в сетевом комплексе России // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023 № 4 (31). С. 36 – 41
4. ГОСТ Р МЭК 61850-6–2009. Изм. 1 Сети и системы связи на подстанциях – Часть 6: Язык описания конфигурации для связи между интеллектуальными электронными устройствами на электрических подстанциях. Введ. 2018-06.

УДК 621.311.1:004.7

ГИБРИДНЫЙ КАНАЛ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Т.В. Яковенко, Д.А. Кухленко
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический
университет», г. Алчевск, ЛНР

Аннотация: Рассмотрена архитектура гибридного канала связи для мониторинга воздушных линий электропередач. Обосновано разделение потоков данных: низкоскоростной помехоустойчивый канал на базе LoRaWAN для телеметрии и команд управления и высокоскоростной канал Cat-M1 (LTE-M) для передачи изображений дефектов.

Ключевые слова: мониторинг ЛЭП, гибридная связь, дистанционный контроль, энергоэффективность.

Annotation: A hybrid communication channel architecture for overhead power line monitoring is proposed. The data flows separation is justified: low-speed noise-immune LoRaWAN channel for telemetry and control commands and high-speed Cat-M1 (LTE-M) channel for defect image transmission.

Keywords: power line monitoring, hybrid communication, remote control, energy efficiency.

В условиях высокой степени износа распределительных сетей и роста потребления электроэнергии задача оперативного выявления дефектов на воздушных линиях становится критической. Традиционные наземные обходы характеризуются значительными временными затратами и ограниченным пространственным охватом. Как отмечают И.Р. Рыскулов, А. Алманбетов и С. Кочконбаев, наличие опасной растительности на пути линий электропередач, проседание грунта и прочие воздействия нарушают нормальное рабочее состояние объектов передачи электроэнергии, что создаёт серьёзную угрозу для жизни людей [1]. Применение средств дистанционного контроля позволяет существенно повысить частоту и качество осмотров, однако ключевой проблемой остаётся обеспечение надёжной передачи данных с подвижного объекта в условиях пересечённой местности и при ограниченном энергоресурсе бортовой аппаратуры. В работе предлагается гибридная архитектура канала связи, сочетающая два разнородных протокола: LoRaWAN для дальней помехоустойчивой передачи телеметрии и команд, а также Cat-M1 для высокоскоростной

передачи фото- и видеоинформации при обнаружении дефекта. Такой подход позволяет минимизировать энергопотребление в крейсерском режиме и сохранять возможность детального осмотра аномалий в реальном времени.

Проведённый сравнительный анализ протоколов LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT, SigFox, Weightless-P) и сотовых IoT-решений (Cat-M1, EC-GSM) показал, что SigFox не поддерживает мобильность конечного устройства, что исключает его применение для движущегося носителя, а Weightless-P требует строго определённой компонентной базы и не получил широкого распространения. Согласно данным О.В.Афанасьевой и Т.Ф. Тулякова, традиционные методы мониторинга, такие как визуальный осмотр и использование механических средств, уже не справляются с возросшими требованиями к надёжности контроля. NB-IoT обеспечивает хорошую энергоэффективность и глубину покрытия, однако при перемещении между сотами возникают задержки на перерегистрацию, что неприемлемо для непрерывного мониторинга [2]. LoRaWAN, использующий физический уровень LoRa с модуляцией CSS (Chirp Spread Spectrum), работает в нелицензируемом диапазоне ISM 868 МГц, обеспечивая дальность до 15 км на открытой местности при скорости от 0,3 до 50 кбит/с. Как показано в работе А.А. Карманова и А.А. Савостина, выходная мощность, вид модуляции, ширина полосы пропускания и скорость передачи данных в LoRa подбираются для достижения оптимальных значений [3]. Энергопотребление минимально: класс А с асинхронной передачей позволяет устройству находиться в глубоком сне большую часть времени. Недостаток LoRaWAN — низкая пропускная способность, недостаточная для передачи изображений. Cat-M1 (LTE-M, eMTC) использует лицензированный спектр (800/900/1800 МГц), полосу 1,08 МГц и скорость до 1 Мбит/с, поддерживает мобильность без разрыва соединения (handover). Энергопотребление Cat-M1 выше, чем у NB-IoT, но ниже, чем у стандартного LTE, а режимы PSM и eDRX позволяют продлить автономную работу. Главный недостаток — зависимость от зоны покрытия сотового оператора. В Луганской Народной Республике покрытие присутствует вдоль большинства трасс ЛЭП, проходящих вблизи населённых пунктов. Л.В. Фисунова отмечает, что при благоприятных метеоусловиях и оптимально спланированном маршруте один комплекс способен за рабочий день выполнить детальную съёмку до 200 км воздушных линий [4]. Таким образом, ни один протокол не является универсальным, а комбинация LoRaWAN и Cat-M1 даёт синергетический эффект.

Предлагаемая система работает следующим образом. В фоновом режиме активен только канал LoRaWAN, передающий текущие координаты, высоту, уровень заряда батареи, исправность бортовых систем, а также результаты автоматического анализа тепловизионного потока в виде бинарного признака «норма/аномалия». Периодичность передачи составляет 1–2 пакета в секунду, а энергопотребление бортового LoRa-модема не превышает 100 мВт. В.В. Костарев и С.А. Тюрин указывают, что LoRaWAN способен одновременно обслуживать устройства трёх классов, причём класс А предполагает асинхронную передачу, инициируемую устройством, что делает его самым экономичным [5]. При обнаружении аномалии (локальный перегрев контактного соединения, искрение, механическое повреждение изолятора) по каналу LoRaWAN инициируется команда активации Cat-M1 модуля. Модуль выходит из спящего режима (PSM), регистрируется в сети и начинает передачу снимков высокого разрешения или короткого видеоклипа. После завершения передачи модуль снова уходит в сон. Такая архитектура обеспечивает среднее энергопотребление, близкое к чистому LoRaWAN, но с возможностью получения доказательной фотофиксации дефекта. Для ЛЭП, проходящих по открытой местности, оптимальным является выбор параметра SF9 (скорость 1760 бит/с, чувствительность –139,5 дБ). SF10 и SF12 дают выигрыш в дальности, но снижают скорость и увеличивают время передачи пакета. Ширина полосы принимается равной 125 кГц, мощность передатчика — 14 дБм (25 мВт), что достаточно для уверенного приёма базовой станцией на удалении 8–12 км. Для защиты канала используется шифрование AES-128 с сессионными ключами NwkSKey (целостность и аутентификация пакетов MAC) и AppSKey (шифрование полезной нагрузки). Ключи генерируются при регистрации устройства на сервере приложений. Для Cat-M1 применяется режим eDRX с циклом 20,48 с, обеспечивающий компромисс между задержкой доступа и энергосбережением. Cat-M1 унаследовал архитектуру LTE и проектировался под устройства с жёсткими ограничениями по энергопотреблению, что прямо отвечает требованиям бортовой аппаратуры. Скорость передачи на восходящей линии составляет до 300 кбит/с, что позволяет передать JPEG-изображение размером 200–300 КБ за 5–8 секунд. Мощность передатчика Cat-M1 — 23 дБм (200 мВт), однако для коротких сессий это не приводит к существенному разряду.

Выводы.

Таким образом, предложенная гибридная архитектура канала связи (LoRaWAN + Cat-M1) позволяет эффективно совместить низкое энергопотребление с возможностью оперативной передачи фотофиксации дефектов при дистанционном контроле воздушных линий электропередач. Протокол LoRaWAN обеспечивает постоянную телеметрию и управление на дальности до 9–12 км, а стандарт Cat-M1 активируется только по событию для высокоскоростной передачи доказательной информации. Такой подход повышает информативность мониторинга без существенного сокращения времени автономной работы. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию машинного зрения для автоматической классификации дефектов непосредственно на борту и выбор оптимальной политики передачи кадров по гибриднему каналу.

Перечень ссылок

1. Рыскулов И.Р., Алманбетов А., Кочконбаев С. Актуальность использования беспилотных летательных аппаратов при проведении профилактических работ ЛЭП в условиях Кыргызстана // Вестник Жалал-Абадского государственного университета. – 2019. – № 4(43). – С. 59-65.
2. Афанасьева О.В., Туляков Т.Ф. Анализ эффективности традиционных и современных технологий мониторинга линий электропередач // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2025. – № 4(246). – С. 182-188.
3. Карманов А.А., Савостин А.А. Технология LoRa как средство цифровой радиотелеметрии для IoT устройств // Вестник СКУ им. М. Козыбаева. – 2023. – № 1(57). – С. 100-106.
4. Фисунова Л.В. Беспилотный контроль состояния воздушных линий электропередачи // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 6. – С. 290-295.
5. Костарев В.В., Тюрин С.А. Обзор и сравнительный анализ сетевых технологий LoRaWAN и NB-IoT // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: Материалы всероссийской научно-технической конференции. В 2-х томах, Пермь, 30–31 мая 2019 года. Том 2. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2019. – С. 216-220.