

На правах рукописи



Абдуллазянов Айнур Фоатович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС АВТОНОМНОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ФУНКЦИЯМИ ДИАГНОСТИКИ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И СИСТЕМАМИ
НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Специальность 2.4.2 –

Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции» имени В.К. Шибанова Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель: **Вагапов Георгий Валериянович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электрические станции» им. В. К. Шибанова ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты: **Суслов Константин Витальевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет МЭИ» (г. Москва);

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Защита диссертации состоится 26 сентября 2024 года в 13.00, в аудитории 1313 на заседании диссертационного совета 24.2.345.05 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева» по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.345.05 по адресу: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р. Е. Алексеева» 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 28Б и на сайте <http://www.nntu.ru/content/aspirantura-i-doktorantura/dissertacii>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.345.05, к.т.н.



Титов Дмитрий Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Современные распределительные электрические сети 6–10 кВ характеризуются широким и быстрым внедрением технологий *Smart Grid*, которым присущи такие аспекты функционирования, как гибкость – способность подстраиваться под потребности потребителей электроэнергии, доступность – свободное подключение новых пользователей, включая генерирующие источники традиционного типа и возобновляемые источники энергии, надежность – гарантированная защищенность и качество поставки электроэнергии в соответствии с вызовами цифрового века, экономичность – эффективное управление и регулирование функционированием электрической сети. Применение аккумуляторных систем накопления электроэнергии (АСНЭ) обеспечивает гибкость, доступность, экономичность работы электротехнического комплекса (ЭТК) с газопоршневыми или газотурбинными энергоустановками (ГПУ и ГТУ), особенно при островном режиме. ГПУ чувствительны к резким изменениям нагрузки, что ограничивает их использование при наличии резкопеременной нагрузки или же при частых пусках сравнительно мощных электродвигателей. Использование АСНЭ дает возможность компенсации сбросов и набросов электрической мощности в сети, сохраняя параметры качества электроэнергии, что и делает электрическую сеть гибкой.

В автономных системах электроснабжения нефте- и газодобычи и в районах Крайнего Севера актуальна проблема экономии топлива в энергоустановках распределенной генерации: привозное жидкое топливо кратно возрастает в цене в сравнении со стоимостью топлива на материке, а в случае попутного газа, используемого для ГПУ и ГТУ, себестоимость производимой электроэнергии существенно зависит от его химического состава, так как глубокая очистка высокочрезвычайно затратна. В этой связи актуальной является проблема разработки методики выбора параметров и алгоритма управления АСНЭ, обеспечивающих минимизацию эксплуатационных расходов на потребляемое топливо с сохранением ресурса аккумуляторных батарей (АБ).

В воздушных распределительных электрических сетях (РЭС) напряжением 6–10 кВ серьезной проблемой является идентификация мест однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) на воздушных линиях (ВЛ), которые представляют опасность с точки зрения длительного воздействия на электрооборудование повышенного напряжения. Малые значения аварийных токов в сравнении с рабочими значениями фазных токов препятствуют оперативному выявлению признаков, характеризующих удаленность повреждения от центра питания (ЦП). Наличие АСНЭ в составе РЭС открывает новое направление поиска методов распознавания как аварийных участков электропередач, так и конкретных мест ОЗЗ. Связано это с тем, что сами АСНЭ могут выступать источниками зондирующих сигналов. Современные РЭС располагают возможностями резервирования за счет распределенной генерации, установки реклоузеров, что в определенной мере позволяет поддерживать электроснабжение потребителей при отключениях фидеров со стороны ЦП. Спланированное кратковременное отключение фидера для выпол-

нения процедур его тестирования резко сокращает поиск места повреждения и существенно снижает вероятность перехода ОЗЗ в короткие замыкания.

Таким образом, актуальна проблема разработки методов тестирования фидеров с использованием АСНЭ в качестве источника зондирующих сигналов, а также мобильных устройств распознавания мест ОЗЗ на участке фидера, заранее локализованном расчетным путем, что решает задачу минимизации ущерба потребителю от недоотпуска электроэнергии.

Цель диссертационной работы – разработка методов и алгоритмов эффективного управления режимами ЭТК автономного электроснабжения с АСНЭ, обеспечивающими экономию топлива и ускорение поиска мест ОЗЗ на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи.

Объект исследования

Объектом исследования выступают стационарные ЭТК автономного электроснабжения, включающие в себя источники генерации, аккумуляторные системы накопления электроэнергии, систему коммутации для подключения двунаправленного преобразователя к диагностируемому воздушным линиям 10 кВ, а также мобильный электротехнический комплекс распознавания места ОЗЗ (мобильный ЭТК) на основе тестовых сигналов от стационарного ЭТК.

Предмет исследования

Предметом исследования являются согласованное управление режимами работы энергоустановок и АСНЭ ЭТК, обеспечивающее экономию топлива, а также диагностирование воздушных линий тестовыми сигналами постоянного и переменного тока с целью распознавания места ОЗЗ, включая адаптированный под них мобильный ЭТК.

Задачи исследования

1. Выбор параметров режима энергоустановок (ЭУ), мощности и энергоемкости АСНЭ на суточном цикле их функционирования, обеспечивающих минимизацию расхода топлива в ЭТК автономных систем электроснабжения, при вариации условий заряда и разряда АБ.

2. Разработка методов диагностирования отключенных фидеров на основе использования АСНЭ как источника тестовых сигналов переменного тока для расчета расстояния до места ОЗЗ по данным односторонних измерений параметров тестовых режимов.

3. Разработка методов расчетного определения места ОЗЗ на основе тестирования отключенного фидера по двум его фазам сигналами постоянного тока от АСНЭ и алгоритмов формирования тестовых схем.

4. Разработка, структурный и параметрический синтез мобильного ЭТК для диагностики ЭТК автономного электроснабжения для распознавания места ОЗЗ по тестовым сигналам от АСНЭ.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработаны методы выбора параметров режимов ЭТК, мощности и энергоемкости АСНЭ, обеспечивающих минимизацию расхода топлива ЭУ в условиях заряда аккумуляторных батарей номинальным и пониженным током и их разряда форсированным током на основе не-

прерывного метода оптимизации Лагранжа, налагаемого на дискретные интервалы ступенчатых графиков нагрузки.

2. Предложены метод и схемное решение диагностирования отключенных аварийных ВЛ электропередач 6–10 кВ сигналами переменного тока нулевой последовательности (НП) от АСНЭ на разных частотах для определения расстояния до ОЗЗ и их сочетание с методом «резонансных» гармоник для однозначного определения места аварии на фидере древовидной структуры.

3. Разработаны метод, основанный на формировании двух разных путей их замыкания на землю посредством избирательной коммутации понижающих трансформаторов и выполнении односторонних измерений параметров тестового режима, алгоритм и схемное решение диагностирования отключенных аварийных ВЛ электропередач 6–10 кВ сигналами постоянного тока от АСНЭ по двум фазам воздушных линий.

4. Выполнен структурный и параметрический синтез, разработаны алгоритм и программное обеспечение мобильного ЭТК для топографической диагностики электротехнического комплекса автономного электроснабжения с целью конкретизации места ОЗЗ посредством распознавания зондирующих сигналов от АСНЭ в спектре электрического поля ВЛ.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод выбора параметров режимов ЭУ и АСНЭ как составных частей ЭТК по условиям минимизации расхода топлива энергоустановок в режимах заряда АБ номинальным и пониженным током и разряда АБ форсированным током, учитывающий изменение потерь электроэнергии в АСНЭ.

2. Метод и схемное решение диагностирования отключенных аварийных фидеров 6–10 кВ ЭТК сигналами переменного тока НП на пониженных частотах для расчета расстояния до мест ОЗЗ и их сочетание с методом «резонансных» гармоник для ограничения зоны поиска места ОЗЗ на фидерах древовидной структуры.

3. Метод диагностирования отключенных аварийных фидеров 6–10 кВ ЭТК сигналами постоянного тока по двум фазам на основе алгоритма выбора коммутируемых трансформаторов по результатам односторонних измерений фазных токов, обеспечивающий однозначное определение места ОЗЗ на фидерах древовидной структуры.

4. Схемные и функциональные решения мобильного ЭТК, использующего зондирующие сигналы в ВЛ от АСНЭ, методы обработки измеряемых сигналов, алгоритмы и программное обеспечение, предназначенные для диагностирования места ОЗЗ в процессе топографического поиска места ОЗЗ посредством выделения зондирующих сигналов в спектре электрического поля воздушной линии.

Теоретическая значимость работы

Обоснована методика управления режимами заряда-разряда АСНЭ, обеспечивающая экономию топлива энергоустановок. Разработаны методы тестирования радиального фидера и алгоритмы формирования схем тестирования, обеспечивающие распознавание поврежденного

участка и места ОЗЗ при наличии переходного сопротивления. Обоснована методика локации места ОЗЗ непосредственно на трассе ВЛ по спектральному составу электрического поля.

Практическая значимость работы состоит в том, что она позволяет: сократить время на диагностику и определение места ОЗЗ и, как следствие, снизить недоотпуск электроэнергии конечному потребителю; определить мобильным электротехническим комплексом поврежденную арматуру ВЛ в любых погодных условиях; обеспечить экономию топлива энергоустановок посредством оптимального управления режимами заряда и разряда АСНЭ.

Методы исследования

Для теоретического решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей и теории длинных линий, метод оптимизации на основе неопределенных множителей Лагранжа, методы цифровой обработки сигналов, метод симметричных составляющих; отладка разработанных алгоритмов для мобильного ЭТК выполнялась на основе имитационного моделирования в программно-аппаратном комплексе (ПАК) *RTDS* с последующей проверкой работоспособности методов посредством сопоставления с результатами натуральных экспериментов.

Достоверность результатов, выводов и рекомендаций подтверждается совпадением приведенных результатов моделирования в сертифицированном программном продукте *Real Time Digital Simulation* с результатами натуральных экспериментов; сопоставлением полученных результатов с результатами, приведенными в ранее опубликованных работах других авторов, с использованием апробированного ПАК *RTDS*.

Апробация работы

Основные результаты работы обсуждались на всероссийских и международных конференциях: VIII Международной научно-технической конференции «Развитие и повышение надежности распределительных электрических сетей», г. Москва, 2023; XV Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем», Чебоксары, 2023; Международной научно-практической конференции «Инновации в науке и технике», Бишкек, 2022; Всероссийской научно-практической конференции «Релейная защита и автоматика. Режимы нейтрали. Ограничение перенапряжений», Екатеринбург, 2021; *International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Latvian*, 2021; XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, 2020; XII Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», Чебоксары, 2020; *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2020; IV Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике», Брянск, 2020.

Публикации

Основные результаты изложены в 16 публикациях (в том числе 7 публикациях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК по специальности 2.4.2, 2 публикациях в журналах, индексируемых в *Scopus* и *Web of Science*), в 1 патенте на изобретение и 1 свидетельстве на программу для ЭВМ.

Личное участие автора в получении результатов. Все основные теоретические положения разработаны лично автором, как и анализ численных расчетов на имитационных моделях. Также автор анализировал результаты экспериментов. Проведение натуральных экспериментов по мониторингу ОЗЗ на ВЛ выполнено им в соавторстве.

Внедрение результатов. Результаты диссертационного исследования внедрены в АО «Сетевая компания», Республика Татарстан, в виде мобильного электротехнического комплекса.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Перспективно развитие темы в части использования искусственного интеллекта для оптимизации управления ЭТК «энергоустановка – АСНЭ» в условиях вариации суточных графиков нагрузки, минимизации количества коммутаций при тестировании фидера в зависимости от его схемной структуры, совершенствования алгоритмов обработки сигнала мобильного ЭТК с целью снижения воздействия помех.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 2.4.2 в области исследований:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Структура и объем работы: диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 207 страниц. Работа содержит 5 таблиц, 118 рисунков. Список литературы состоит из 104 наименований.

Научное исследование проведено в рамках выполнения ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор проекта *RFMEFI57418X0188*, на тему «Разработка систем накопления электроэнергии в системе автономного электроснабжения в децентрализованных

зонах с использованием гибридных систем, состоящих из традиционных генерирующих источников и систем накопления электроэнергии».

Содержание работы

Во **введении** диссертации изложены актуальность темы, теоретическая и практическая значимость, ее новизна, выносимые на защиту положения.

В **первом разделе** диссертации выполнен обзор научно-технической литературы, включающей в себя монографии, статьи в научных журналах, доклады на конференциях, патенты по избранной тематике. Показано, что наиболее перспективно применение АСНЭ на территориях, где отсутствует или ограничено централизованное электроснабжение. Выполненный обзор методов распознавания как самого факта ОЗЗ, так и последующего установления места повреждения электропередачи показал, что проблема идентификации места ОЗЗ на фидерах радиальной структуры до настоящего времени решена только в ограниченных масштабах, и недостаточно учитывается влияние переходных сопротивлений. Отмечено, что крайне ограниченно рассматриваются возможности использования АСНЭ в электрических сетях для улучшения индексов *SAIDI*, *SAIFI* и *CAIDI* посредством расширения функционала АСНЭ.

Во **втором разделе** диссертации обоснован выбор параметров АСНЭ в составе локального ЭТК «ЭУ – АСНЭ». На примере ступенчатого профиля мощности нагрузки P_L , рисунок 1, приведена математическая модель минимизации расхода топлива.

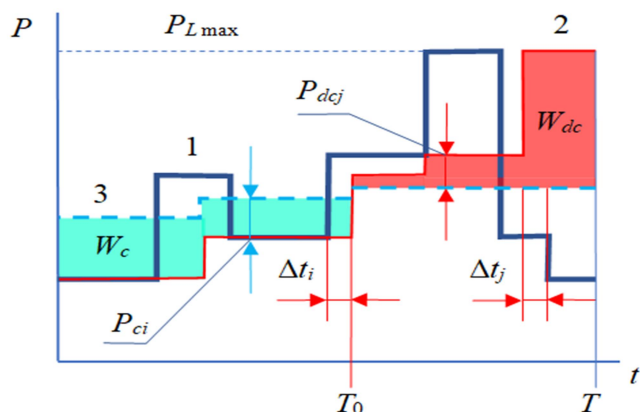


Рисунок 1 – Профиль мощности нагрузки (1), график мощности нагрузки по ее продолжительности (2), график мощности ЭУ (3)

P_{ci} – мощность, поступающая из сети в АСНЭ на i -м интервале времени;

P_{dcj} – мощность, отданная АСНЭ в сеть на j -м интервале времени;

W_c – энергия, отданная из сети в АСНЭ на этапе заряда АБ;

W_{dc} – энергия, полученная сетью от АСНЭ на этапе разряда АБ;

$P_{L\max}$ – максимальная мощность нагрузки;

T_0 – продолжительность заряда АБ АСНЭ;

T – длительность цикла «заряд-разряд».

Для каждого интервала времени *заряда* аккумуляторных батарей (АБ) с индексами « i » записываются уравнения связи между переменными – мощностью генерации P , мощностью нагрузки P_L и мощностью P_c – на основе выполнения баланса мощности:

$$Z_i = P_i - P_{Li} - P_{ci} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (1)$$

Аналогично записываются для интервала времени *разряда* АБ с индексами «*j*» уравнения баланса мощности:

$$Z_j = P_j - P_{Lj} + P_{dcj} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (2)$$

Уравнение баланса энергии на интервале времени *T* учитывает потери электроэнергии через КПД η в АСНЭ в режимах заряда и разряда АБ

$$Z_E = \sum_i \eta_i P_{ci} \Delta t_i - \sum_j \eta_j^{-1} P_{dci} \Delta t_j = 0, \quad \Delta t_i = \Delta t_j = \Delta t. \quad (3)$$

Функция Лагранжа *S* для минимизации расхода топлива *Q* имеет вид:

$$S = \sum_i Q_i + \sum_j Q_j + \sum_i \lambda_i Z_i + \sum_j \lambda_j Z_j + \lambda_E Z_E. \quad (4)$$

Полагаем, что удельный расход топлива описывается формулой

$$q = a + bP^\mu. \quad (5)$$

В пределах точности прогнозирования графиков можно принять приближенно, что КПД постоянный на соответствующих интервалах времени: $\eta_i = \eta_c$, $\eta_j = \eta_{dc}$. Из чего следует, что энергоустановки должны работать с постоянной мощностью генерации как в режиме заряда (P_{g1}), так и в режиме разряда (P_{g2}) АБ, связанные между собой через формулу

$$\frac{P_{g1}}{P_{g2}} = (\eta_c \eta_{dc})^{1/(\mu-1)} = \eta^{2/(\mu-1)}. \quad (6)$$

В результате получаем следующие значения мощности генерации

$$P_{g2} = \frac{\eta^2 P_{sL}}{1 - \varepsilon \tau}, \quad P_{g1} = \frac{P_{sL}}{1 - \varepsilon \tau}, \quad (7)$$

где

$$P_{sL} = \frac{\eta^2 \sum_i P_{Li} + \sum_j P_{Lj}}{T/\Delta t}, \quad \tau = \frac{T_0}{T}, \quad \varepsilon = 1 - \eta^{\frac{2\mu}{\mu-1}}. \quad (8)$$

Мощность АБ определяется по режиму их заряда, так как разряд может происходить повышенным током. Наименьший номинальный ток АБ I_r определяется из условия

$$I_r \geq \frac{\max\{P_{g1} - P_{Li}\}}{U_r}, \quad (9)$$

где U_r – номинальное напряжение АБ.

Повышение ресурса АБ достигается увеличением тока I_r в сравнении с условием (9). Проверка выбранного номинала тока осуществляется в режиме разряда АБ по условию

$$I_r \geq \frac{\max\{P_{Lj} - P_{g2}\}}{k_c U_r}, \quad (10)$$

где $k_c = 3 \div 5$ – кратность форсировки тока разряда.

Проверка АБ на необходимую емкость осуществляется по условию обеспечения ЭТК требуемой энергией разряда W_r , которая рассчитывается по формуле

$$W_r = W_{dc}/\eta^2 = \frac{1}{\eta^2} \sum_j (P_{Lj} - P_{g2}) \Delta t_j. \quad (11)$$

Возможна другая постановка задачи по организации режимов заряда-разряда АБ, когда экономия топлива является вторичным критерием, а первичным выбирается ресурс АБ. В этом случае заряд производится неизменным током ниже номинального, а балансирование мощности в данном режиме выполняется за счет энергоустановки. Уравнение баланса энергии (3) принимает вид:

$$k_p P_{S0} T_0 - \sum_j P_{dcj} \Delta t_j = k_p P_{S0} T_0 - \sum_j (P_{Lj} - P_{G0}) \Delta t_j = 0, \quad (12)$$

где P_{S0} и P_{G0} – генерируемые мощности соответственно на заряд АБ и в нагрузку при разряде АБ, $k_p = k_W \eta^2$. Коэффициент $k_W \leq 1$ учитывает возможную неполноту разряда АБ по условиям уровня напряжения. Переменные P_{G0} и P_{S0} в этом режиме связаны между собой:

$$k_p P_{S0} T_0 - \sum_j (P_{Lj} - P_{G0}) \Delta t_j = 0. \quad (13)$$

Отсюда получаем, что

$$P_{G0} = \frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - k_p P_{S0} \frac{T_0}{T_{dc}}. \quad (14)$$

Тогда находим расход топлива Q на всем интервале работы энергоустановки длительностью T , который можно рассчитать по формуле, записанной относительно одного переменного параметра – P_{S0} :

$$\begin{aligned} Q &= \sum_i (a + b P_G^\beta) \Delta t_i + (a + b P_{G0}^\beta) (T - T_0) = \\ &= aT + \sum_i (P_{Li} + P_{S0})^\beta \Delta t_i + \left(\frac{\sum_j P_{Lj} \Delta t_j}{T_{dc}} - k_p P_{S0} \frac{T_0}{T_{dc}} \right)^\beta (T - T_0). \end{aligned} \quad (15)$$

Далее для каждого априори заданного значения T_{dc} рассчитываются по формуле (15) значения расхода топлива Q при изменении свободной переменной – величины генерируемой в сеть АСНЭ мощности P_{S0} . В результате находится локальный минимум расхода топлива Q . После чего повторяется расчет при другом значении T_{dc} и т. д. Численный пример для случая работы ЭУ на активную нагрузку представлен на рисунке 2. Согласно графику, рисунок 2б, интервал дискретности $\Delta t_j = 4$ ч. Примем, что $k_p = 0,9$; положим, что $T_{dc} = 4$ ч. Тогда в формуле (14) верхнее значение J индекса j равно 1. Отсюда находим

$$P_{G0} = \frac{\sum_{j=1}^1 P_{Lj} \Delta t_j}{T_{max}} - k_p P_{S0} \frac{T_0}{T_{dc}} = \frac{0,4 \cdot 4}{4} - 0,9 \cdot \frac{20}{4} \cdot P_{S0} = 0,4 - 4,5 \cdot P_{S0}. \quad (16)$$

Суточный расход топлива Q_4 рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} Q_4 &= 535,4 + 1474,28 \cdot [(0,05 + P_c)^{1,45} + (0,1 + P_c)^{1,45} + (0,2 + P_c)^{1,45} + \\ &+ (0,25 + P_c)^{1,45} + (0,3 + P_c)^{1,45} + (0,4 - 4,5 \cdot P_c)^{1,45}]. \end{aligned} \quad (17)$$

На рисунке 2 приведены результаты расчета на дискретных интервалах времени, внутри которых минимизация расхода топлива основана на использовании непрерывных переменных.

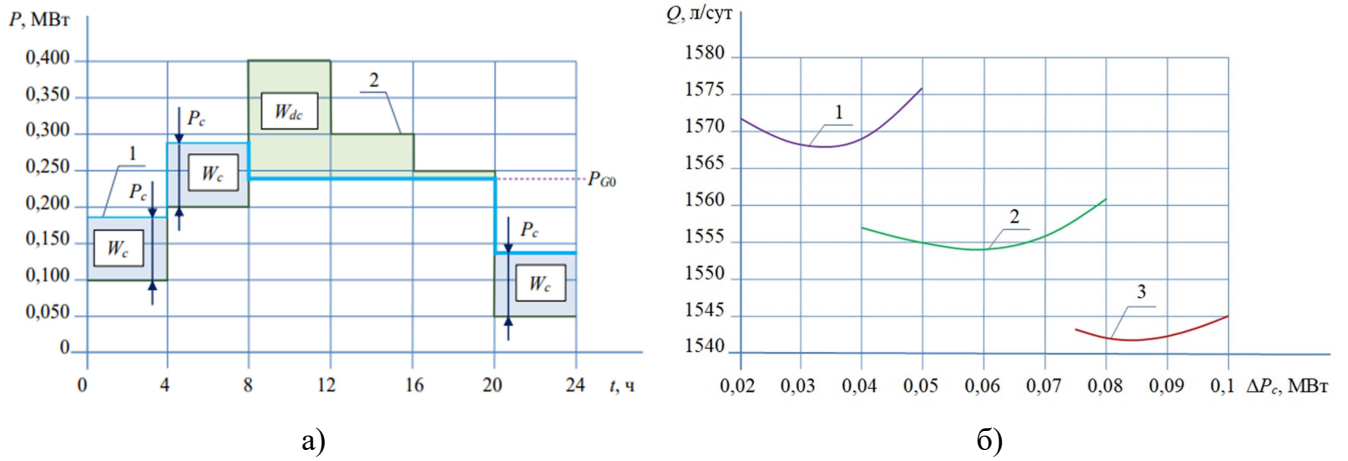


Рисунок 2 – Графики режимов работы ЭТК при $T_{dc} = 12$ часов (а) и расхода топлива (б):
 1 – профиль генерируемой мощности; 2 – профиль мощности нагрузки

Минимальный суточный расход топлива $Q = 1542$ л при $T_{dc} = 12$ ч и $P_c = 84$ кВт. Расчеты при свободном изменении тока заряда показывают, что в этом случае $Q = 1544$ л, т. е. получается практически тот же результат. Отличие в выборе параметров АСНЭ состоит в том, при свободном изменении тока заряда снижается ресурс АБ, но и номинальная мощность накопителя также может быть снижена. В диссертации выполнены численные расчеты и приведены условия выбора мощности АСНЭ для различных условий заряда и разряда АБ на основе зарядной характеристики литий-ионных АБ, рисунок 3.

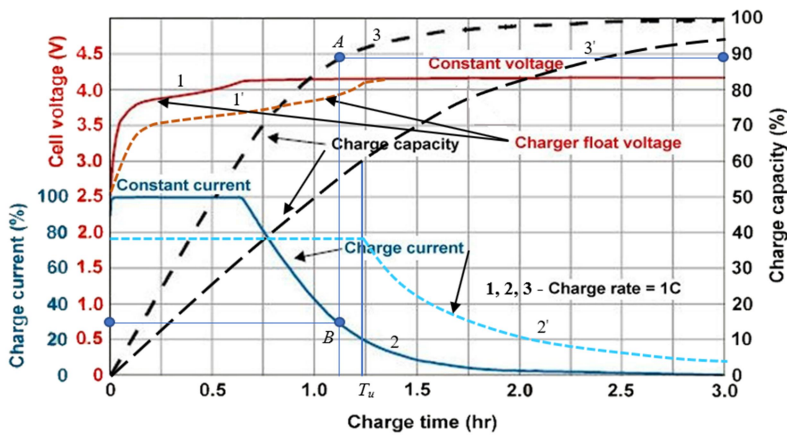


Рисунок 3 – Зарядные характеристики аккумуляторов Li-ion

Паспортный режим заряда:

- 1 – напряжение питания АБ,
- 2 – ток заряда,
- 3 – зарядная емкость.

Режим заряда пониженным током:

- 1' – напряжение питания АБ,
- 2' – ток заряда,
- 3' – зарядная емкость.

Формула расчета кратности тока заряда на стадии его постоянства

$$0,95k_c I_r U_r [T_0 - 3 + 0,6500(k_c)^{-0,4065}] + [1 - 0,37 \cdot (k_c)^{0,97}] W_{dc} / 0,8(T - T_0)\eta U_r = W_{dc} / 0,8(T - T_0)\eta U_r. \quad (18)$$

Продолжительность заряда неизменным током рассчитывается по формуле

$$T_u + 3 - 0,6500(k_c)^{-0,4065} = T_0. \quad (19)$$

Для удельных расходных характеристик, монотонно снижающих производную при росте мощности, экономия возможна только при отключении ЭУ в режиме минимальных нагрузок, когда на сеть разряжается АСНЭ.

В **третьем разделе** диссертации рассмотрено расширение функционала ЭТК в части использования АСНЭ как источника тестовых сигналов, способствующих определению расстояния до ОЗЗ, с возможностью конкретизации места ОЗЗ на фидерах 6–10 кВ древовидной структуры при учете влияния переходного сопротивления в месте контакта, рисунок 4.

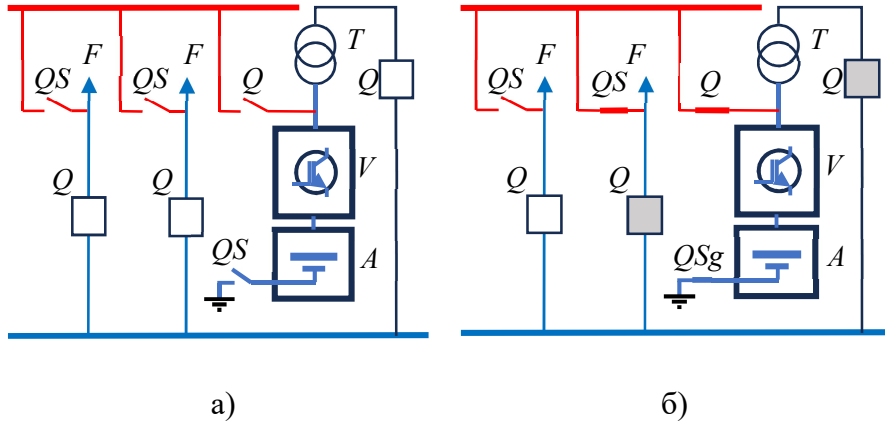


Рисунок 4 – Схемы ЭТК – рабочая (а) и тестовая (б) – для зондирования фидера на переменном или постоянном токе

При тестировании фидера $F1$ сигналами постоянного или переменного тока от АБ АВ через преобразователь VK отключаются выключатели Q и $Q1$, замыкаются разъединители QS , $QS1$, QSg . Разъединитель QS имеет пофазное управление.

Рассмотрен вариант использования АСНЭ для тестирования состояния ВЛ на предмет определения удаленности ОЗЗ, основанный на применении зондирующих сигналов переменного НП и постоянного тока. Последнее требует отключения трансформаторов. На низких частотах замыкание тестовых токов НП возможно только по одному контуру, которому соответствует схема замещения, где отсутствуют поперечные емкостные проводимости, рисунок 5.

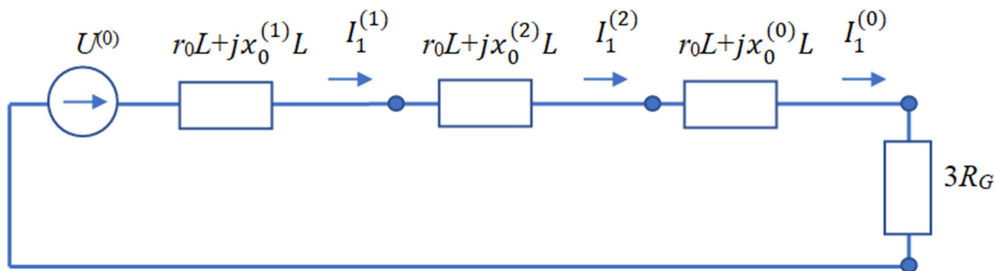


Рисунок 5 – Упрощенная схема замещения фидера

Из схемы, рисунок 5, находим ток замыкания на землю I_G , т. е. утроенный тестовый ток НП:

$$I_G = 3I^{(0)} = \frac{3U^{(0)}}{\left\{ \left[3r_0 + jn(2x_0 + x_0^{(0)}) \right] L + 3R_G \right\}} = \frac{3U^{(0)}}{\left\{ (3r_0 + j3nx_\sigma)L + 3R_G \right\}}, \quad (20)$$

где $x_\sigma = (2x_0 + x_0^{(0)})/3$ – погонное индуктивное сопротивление рассеяния провода.

По значениям $R_s = r_0L + R_G$, I_0 и U_0 из выражения (20) может быть определено расстояние до места ОЗЗ. По известному значению суммарного сопротивления $R_s = 112$ Ом (режим тестирования ВЛ выполнялся на постоянном токе) и суммарного сопротивления на переменном токе $z_1 = 116,7$ Ом (рассчитано по измеренным току и напряжению в начале фидера на имитационной модели) расстояние до места ОЗЗ определено по формуле

$$L = \sqrt{(Z_1)^2 - (R_s)^2} / nx_\sigma = \sqrt{(116,7)^2 - (112)^2} / (1 \cdot 0,318) = 103,1 \text{ км.} \quad (21)$$

Повышение частоты тестирования способствует увеличению точности расчетов, на частоте 100 Гц получено $L = 99,7$ км, ошибка 0,3 %. В диссертации обоснована эффективность сочетания метода низкочастотного тестирования с методом «резонансных» частот, не требующего отключения трансформаторов и применимого при $R_G < 100$ Ом. На рисунке 5 показано наложение на схему фидера древовидной структуры значений «резонансных» гармоник и расчетных значений расстояния до места ОЗЗ по тестовым режимам. Рисунок 6 демонстрирует, что при ОЗЗ в узлах 3 и 6 значения «резонансных» гармоник одинаковые, что не позволяет распознать однозначно, где именно произошла авария.

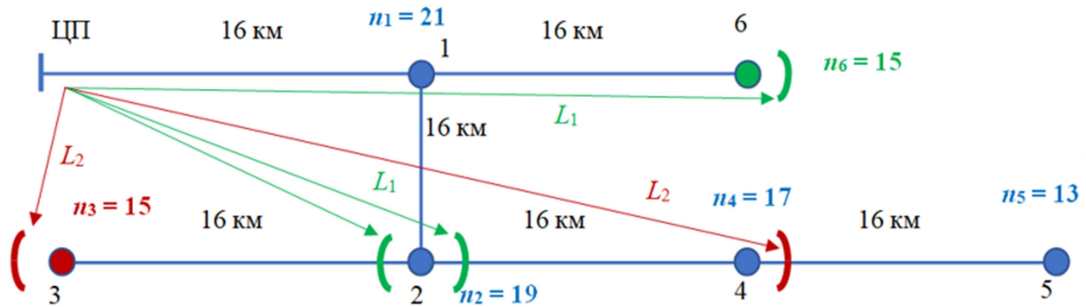


Рисунок 6 – Фактические места ОЗЗ, расчетные расстояния до них и значения «резонансных» частот: ● – ОЗЗ в узле 6, ● – ОЗЗ в узле 3

Тестовые режимы выявили, что ОЗЗ находится на расстоянии $L_1 \approx 33$ км от ЦП, чему соответствуют узлы 2 и 6. Таким образом, общим результатом в обоих методах является узел 6, тем самым установлена ВЛ с ОЗЗ и ограничена зона поиска места повреждения. Аналогично для ОЗЗ в узле 3. В общем случае для фидера древовидной структуры одностороннее диагностирование схемы с поперечной несимметрией не дает однозначного ответа о положении места несимметрии. Рассмотрен принцип тестирования на примере схемы, рисунок 7а, где в узлах 2–4 подключены ТП с дистанционно управляемыми высоковольтными коммутационными аппаратами $Q_2 - Q_4$. Идея метода двустороннего тестирования с измерениями на одном конце фидера состоит в том, что на постоянном токе можно организовать через обмотку ВН трансформатора дополнительный путь тестового тока к месту ОЗЗ с другой стороны ВЛ по неповрежденной фазе. При этом на стороне ЦП должны быть одновременно подключены источники постоянного напряжения к двум фазам, рисунок 7б.

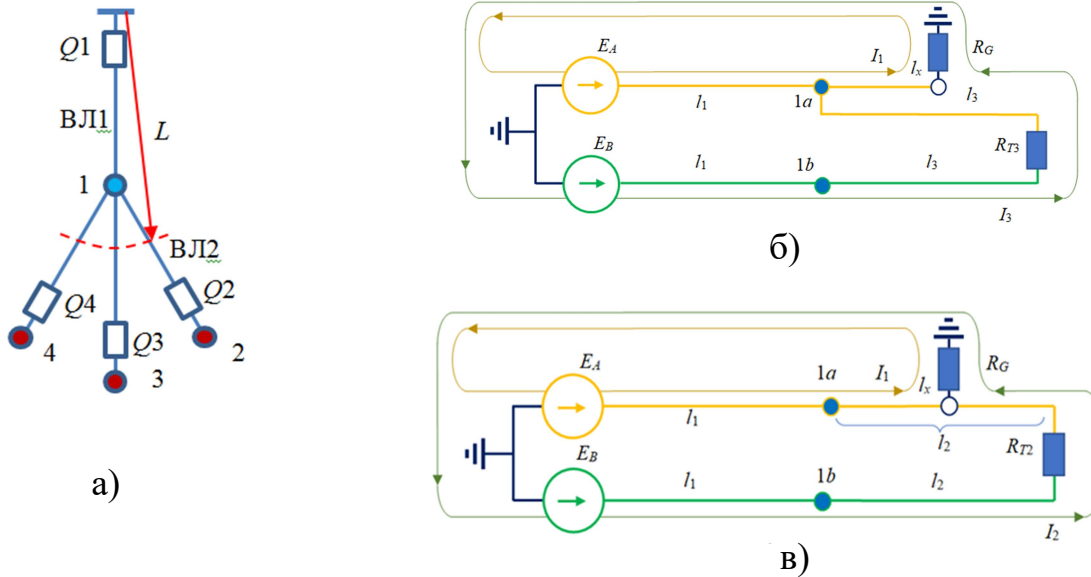


Рисунок 7 – Тестирование фидера через трансформаторы:
а – принципиальная схема фидера; б – включен $Q3$, в – включен $Q2$

Если включен аппарат $Q3$ на ВЛ3, а $Q33$ на ВЛ2, то образуется электрическая цепь из двух параллельных ветвей, рисунок 7б, из которой следует очевидное соотношение между токами двух параллельных ветвей

$$I_1 / I_2 = (l_1 + 2l_3) / l_1. \quad (22)$$

Формула (22) служит первичной проверкой, есть ли необходимость в дальнейших коммутациях трансформаторов. Если измеренные токи удовлетворяют условию (22), это означает, что $Q33$ на другой ВЛ. Включается коммутационный аппарат на ВЛ2, условие (22) не выполняется и используется схема замещения, рисунок 7в, для которой справедлива формула расчета расстояния до места $Q33$

$$l_x = \frac{(E_A - E_B) / r_0 - I_1 l_1 + I_2 (l_1 + 2l_2)}{I_1 + I_2}. \quad (23)$$

Важно, что расчет места $Q33$ не зависит от величины переходного сопротивления. Имитационное моделирование тестирования по схеме, рисунок 7б, при $R_G = 1$ кОм показало, что без учета влияния провиса провода точность расчета по формуле (23) составила менее 1 %.

В работе приведена методика формирования тестовых схем, минимизирующая количество оперативных переключений. Также потребовалась алгоритмизация расчета активного сопротивления каждой фазы (условно A и B), связывающих источники питания с общим узлом, при смещении этого узла в процессе перебора вариантов расположения места $Q33$, поскольку для расчета места $Q33$ используется формула (при общей питающей ЭДС)

$$l_{Nx} = \frac{2R_B - (1 + \mu)R_A}{r_0(1 + \mu)}, \quad \mu = I_A / I_B, \quad (24)$$

где R_B отсчитывается от ЦП до узла с включенным трансформатором; R_A – от ЦП до узла, от которого определяется удаленность ОЗЗ; l_{Nx} отсчитывается от «внутреннего» узла выделенной магистрали.

Для численных расчетов сопротивлений R_A и R_B в формуле (24) разработан модифицированный метод узловых проводимостей, в котором математически описываются две проводящие фазы. Его целесообразно применять, когда уже используется в РЭС метод узловых проводимостей для расчета режимов на переменном токе. Разработан также более простой в программной его реализации метод расчета сопротивлений R_A и R_B на основе последовательно укорачивающихся ленточных матриц. В качестве примера рассмотрена схема, рисунок 8, с ОЗЗ на ВЛ5.

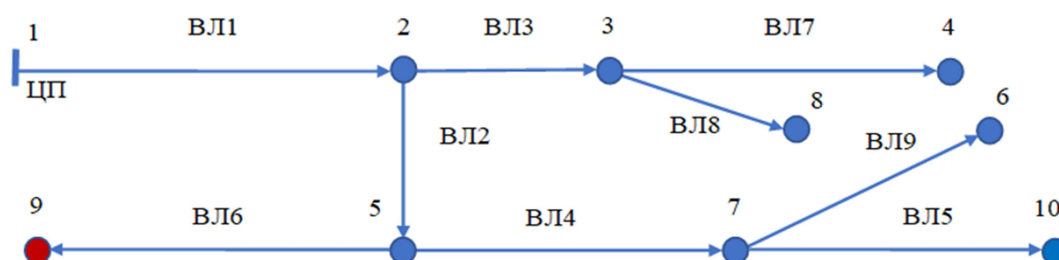


Рисунок 8 – Пример расчетной схемы фидера

Запишем для данной схемы ленточную матрицу связи ветвей с узлами, где в узле 9 к фидеру подключен трансформатор, остальные трансформаторы отключены:

Ветви:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Узлы:	+	1	2	2	5	7	5	3	3	7	(25)
	-	2	5	3	7	10	9	4	8	6	

Применительно к матрице (25) запускается процедура исключения «висящих» узлов и связанных с ними ветвей, за исключением узла 1 и выделенного узла 9, где подключен трансформатор. «Висящими» считаются те узлы, которые только один раз записаны в матрице (25). После первой проверки «висящих» узлов (узлы 4, 6, 8, 10) удаляются ветви 5, 7, 8, 9 и образуется следующая матрица:

Ветви:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Узлы:	+	1	2	2	5	7	5	3	3	7	(26)
	-	2	5	3	7	10	9	4	8	6	

На последующем этапе находятся «висящие» узлы 3 и 7 и окончательно формируется матрица, отражающая связь между узлами 1 и 6, которая, в свою очередь, разбивается на две подматрицы, используя узел 2 по его наименьшему номеру:

Ветви:		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	+	1		2	2	5	7	5	3	3	7	(27)
Узлы:	-	2		5	3	7	10	9	4	8	6	

В соответствии с матрицей (27) выполняется суммирование сопротивлений ветвей каждой подматрицы по формулам

$$R_A = \sum_{n=1}^N R_n, \quad R_S = \sum_{n=N+1}^M R_n, \quad R_B = R_A + 2R_S. \quad (28)$$

В формулах (28) суммируются только те ветви, которые входят в соответствующие подматрицы. Для конкретного примера $N = 1$, $M = 6$ и

$$R_A = R_1, R_S = R_2 + R_6, \quad R_B = R_A + 2R_S. \quad (29)$$

Далее проверяется условие (22) на предмет того, может ли быть ОЗЗ на ВЛ3, ВЛ7 и ВЛ8, связанных с узлом 2. Это условие не будет выполнено. Далее рассматривается узел 5 матрицы (25), где условие (22) выполняется. Формируется новая физическая схема путем отключения трансформатора в узле 9 и включения трансформатора в узле с наименьшим номером 6, рисунок 9, измеряются значения токов I_A и I_B на входе фидера и т.д. В рассматриваемом примере получаем

$$l_{7x} = \frac{2(R_1 + R_2 + R_4 + R_5) - (1 + \mu)(R_1 + R_2 + R_4)}{r_0(1 + \mu)}. \quad (30)$$

Таким образом, последовательным перебором отпаяк и соответствующей коммутацией трансформаторов можно установить место повреждения. Рассмотрена также возможность использования тестирования фидеров без отключения трансформаторов. Подача переменного напряжения НП на двух частотах в качестве тестового сигнала исключает из схемы замещения все неповрежденные отпайки. Тогда формируются два уравнения, из которых находится расстояние до места ОЗЗ (проверка на ПАК RTDS, ОЗЗ на конце ВЛ длиной 100 км):

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \sqrt{(n_1 x_\sigma L)^2 - (R_S)^2} \\ Z_2 &= \sqrt{(n_2 x_\sigma L)^2 - (R_S)^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow L = x_\sigma^{-1} \sqrt{\frac{Z_2^2 - Z_1^2}{n_2^2 - n_1^2}} = 0,318^{-1} \sqrt{\frac{167^2 - 128^2}{4^2 - 2^2}} = 97,4 \text{ км}. \quad (31)$$

Использовались частоты 200 и 100 Гц.

Ошибка расчета на близких частотах составила 2,6 %.

На фидере древовидной топологии в результате будет получено несколько потенциально возможных точек ОЗЗ. Для однозначной реализации тестирования на постоянном токе фидера с подключенными трансформаторами показано формальное описание схемы, которая содержит все фазные провода. Формируется матрица рейтинга узлов по расстоянию до шин ЦП

$$S = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \text{Узлы (-1)} & n_1 & n_2 & \dots & n_i & n_{i+1} & \dots & N \\ \hline \text{Расстояние} & L_1 & L_2 & \dots & L_i & L_{i+1} & \dots & L_N \\ \hline \end{array}, \quad (32)$$

где $L_1 < L_2 < \dots < L_N$.

Поскольку по результатам тестирования схемы переменным током известно расстояние до места ОЗЗ L (по формуле (31)), в матрице (37) выбирается такой узел n_i , для которого первым выполняется условие $L < L_i$.

Далее по ленточной матрице \mathbf{M} выбирается любая ветвь m_j , входящая в узел i (по значению «-1»). Также устанавливается по выделенной ветви узел n_k , из которого данная ветвь выходит (по значению «1»). С учетом принятого направления всех ветвей от источника к нагрузке, выбранная ветвь m_j будет единственной. После чего эта ветвь делится узлом $N + 1$ (N – количество узлов фидера, включая узел ЦП) на две части. В результате вычисляется длина каждого отрезка ВЛ:

$$l_{m2} = L_i - L_k, \quad l_{m1} = l_m - l_{m2}. \quad (33)$$

После чего записывается по известным правилам узловое уравнение, в котором в качестве базисного и балансирующего узла с нулевым потенциалом принята земля, а напряжение в узле 1 известно и все задающие токи \mathbf{J} обнулены; рассчитываются на модели токи в ветвях. Если результаты близки к измеренным токам в режиме тестирования, то именно выбранная ВЛ является аварийной. В противном случае выбирается следующая по рейтингу матрицы (32) ветвь, отходящая от уже выбранного узла и процедура повторяется.

В четвертом разделе диссертации рассмотрен мобильный электротехнический комплекс определения места повреждения на воздушной линии напряжением 6–35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали. Он расширяет идею тестирования фидеров сигналами переменного тока от АСНЭ, обеспечивая определение места ОЗЗ непосредственно на трассе, после того как предварительно выявлен поврежденный участок электропередачи. Магнитное поле от аварийных составляющих рабочих токов слабо выражено при ОЗЗ через переходные сопротивления. Электрическое поле в режиме ОЗЗ искажается, так как нарушается симметрия системы фазных напряжений. В мобильном ЭТК использован дополнительный признак ОЗЗ – уровень ВГ электрического поля. При больших значениях переходных сопротивлений, когда слабо выраженные их естественные проявления в ЭП не могут быть распознаны мобильным ЭТК, предложено использование тестовых сигналов от АСНЭ с заранее заданными частотами, на которые настраивается система распознавания. Математически реализация анализа параметров токов и напряжений непромышленной частоты основывается на Фурье-преобразовании. Для удаления шумов и колебаний полезного сигнала был использован математический метод скользящего среднего.

Для повышения чувствительности системы вводятся весовые значения w измеренных сигналов

$$g_i = \frac{1}{2K + 1} \cdot \sum_{j=-K}^K w_i f_{i+j}, \quad \sum_{j=-K}^K w_i = 1, \quad (34)$$

где $i = 1 + K, 2 + K, \dots, N - K$, а в качестве весовой функции используется распределение Гаусса случайных величин.

Для произвольного сигнала $f(t)$, состоящего из информативной периодической компоненты $s(t)$ и шумовой компоненты s' , математическое выражение может быть представлено следующим образом:

$$f(t) = s(t) + s'(t). \quad (35)$$

Соответственно через N периодов измерений искомый сигнал $f(t)$, обозначенный как $f_k(t)$, математически описывается следующей зависимостью

$$\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N f_k(t) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N s(t) + \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N s'(t). \quad (36)$$

Выражение (36) показывает восстановление информативной периодической компоненты $s(t)$ и существенное снижение шумовой компоненты s' вследствие ее природы, характеризующейся нормальным распределением, с ростом количества N периодов измерений. При многократном суммировании количества N периодов измерений будет выделен полезный сигнал. Функция автокорреляции позволяет определить периодичность свойств полезного сигнала.

Если сигналы на ранней стадии дефекта непериодические, то в ЭТК предусмотрено использование среднеквадратического значения сигнала, осредненного на интервале фиксации дефекта. На рисунке 9 представлена блок-схема мобильного ЭТК.

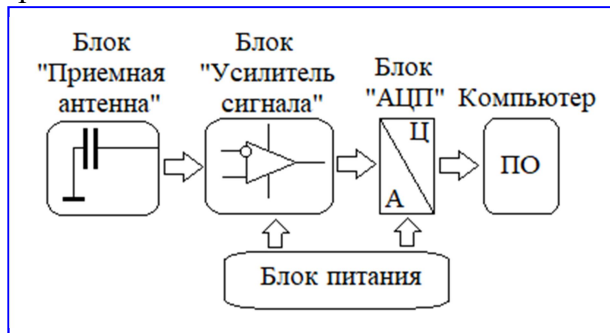


Рисунок 9 – Блок-схема мобильного электротехнического комплекса

Рисунок 10 иллюстрирует в общем виде блок-схему алгоритма выделения полезного сигнала.

Проектирование схем преобразователя напряжения и усилителя осуществлялось в специализированном ПО для проектирования промышленных печатных плат *Altium Designer*. В диссертации представлена полная схема ЭТК. Апробация мобильного ЭТК осуществлялась: в лабораторных условиях на ПАК *RTDS*, в условиях полигона и в реальных условиях действующих РЭС. Серии экспериментальных исследований направлены на определение достигнутых функциональных возможностей мобильного ЭТК на каждом этапе апробации. В лабораторных условиях сигнал моделировался в ПАК *RTDS* и подавался на усилитель напряжения.

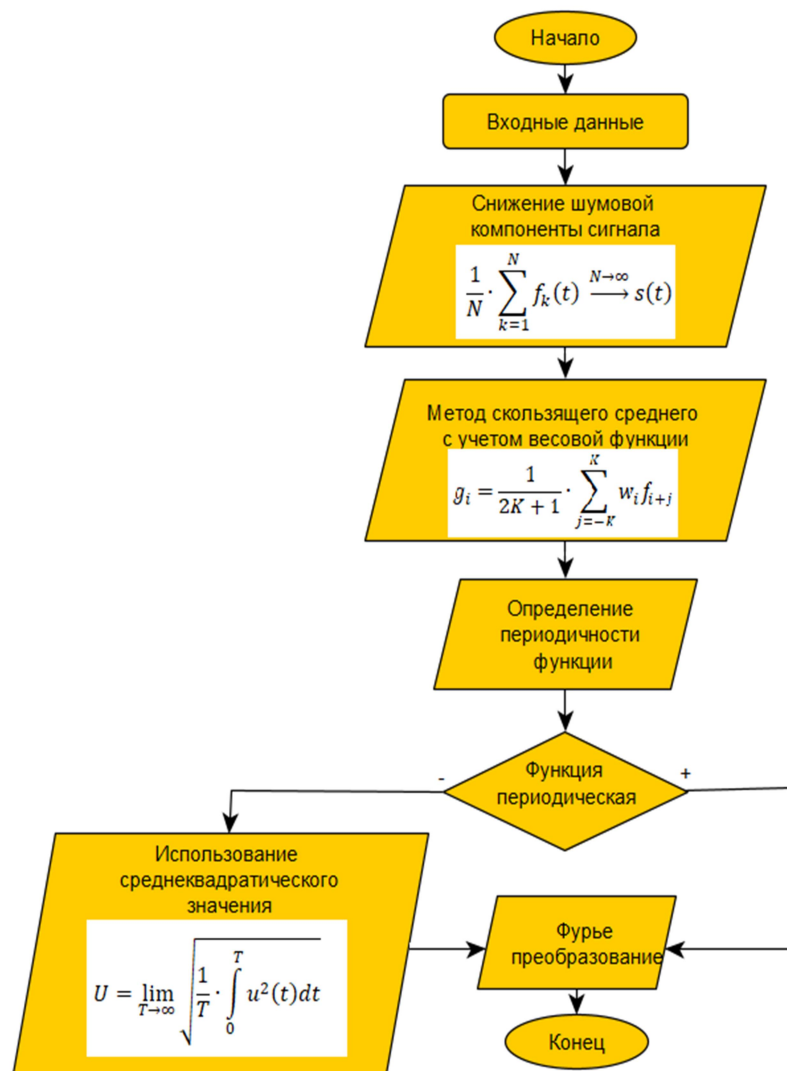


Рисунок 10 – Укрупненная блок-схема алгоритма выделения полезного сигнала

К его выходу был подключен одиночный провод длиной 10 м, выведенный в другую лабораторию к ЭТК, рисунок 11а. Таким образом создавался контур «фаза – воздушный промежуток – распределенная земля», тестовые сигналы задавались фазным напряжением. На рисунке 11б представлены результаты опыта распознавания сигнала частотой 550 Гц. При задании от АСНЭ сигнала кратные частоты способствуют сепарации из зашумленного сигнала напряжения искомой частоты, что позволяет повысить чувствительность мобильного ЭТК.

Было выполнено наложение на базисный источник напряжения 155 В частотой 50 Гц источника напряжения 2 и 0,4 В частотой 550 Гц.

На рисунке 12 показаны результаты обработки сигнала мобильным ЭТК. Серия натуральных исследований была осуществлена на полигоне ЧОУ ДПО «Центр работ под напряжением», г. Заинск, АО «Сетевая компания», Республика Татарстан. Выбор полигона обусловлен наличием ВЛ напряжением 6 кВ и наличием специального автомобильного подъемника, рисунок 13а. На рисунке 13б приведены результаты обработки сигнала на одном из этапов.

Необходимость использования специальных зондирующих сигналов подтверждается натурным экспериментом, когда мобильный ЭТК использовался в зоне воздействия ВЛ-110 кВ, проходящей вблизи обследуемого фидера 10 кВ, рисунок 14.

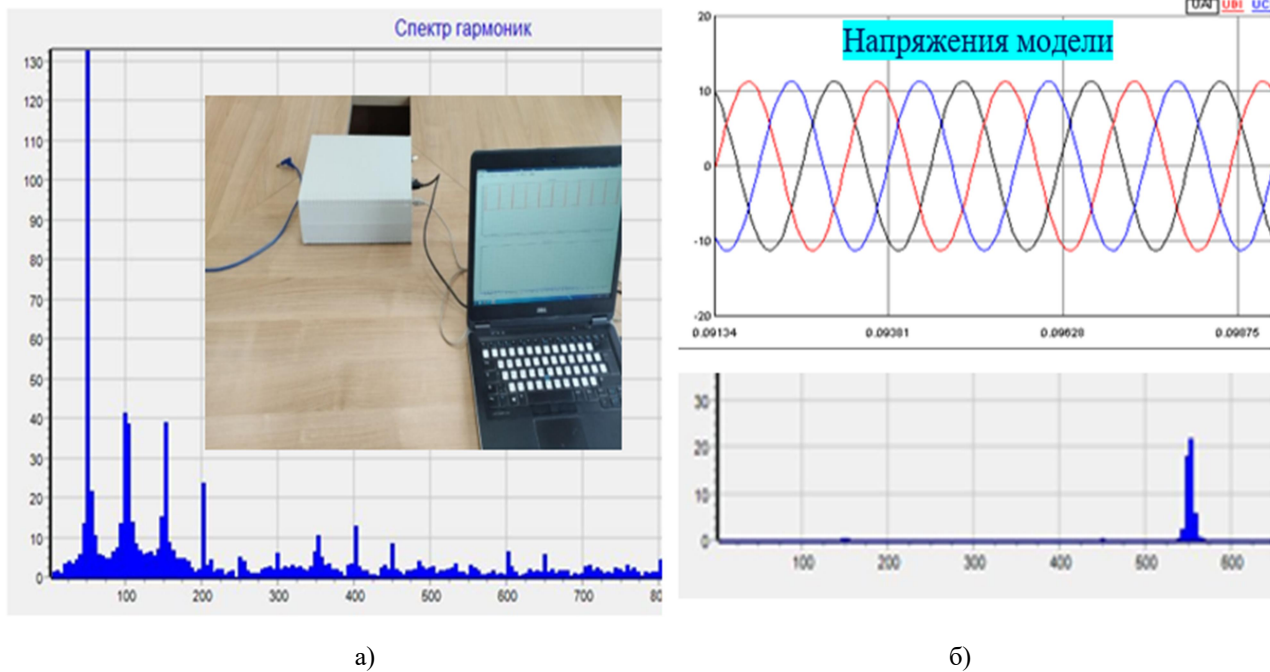


Рисунок 11 – Лабораторные испытания мобильного ЭТК: а – спектр полигармонического сигнала в ЭТК, б – напряжения сигнала 155 В частотой 550 Гц и спектр сигнала в ЭТК

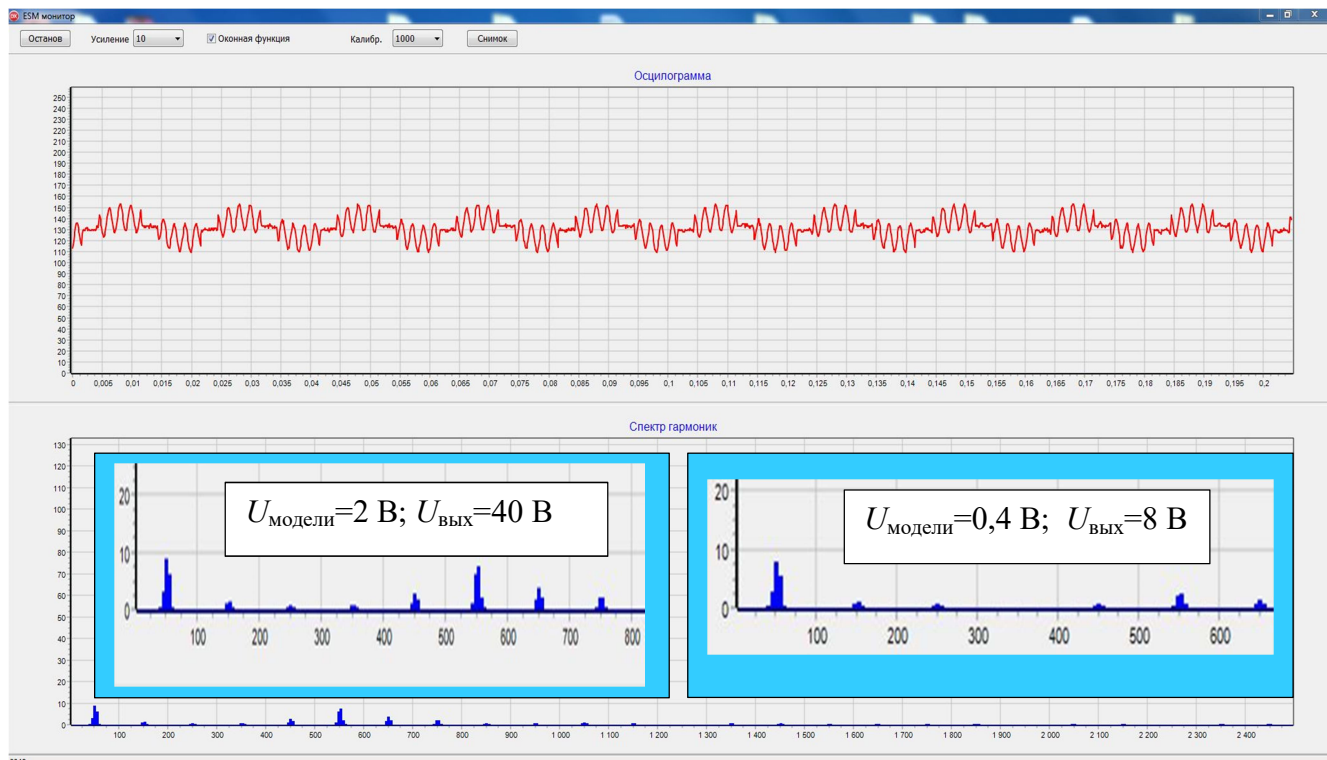
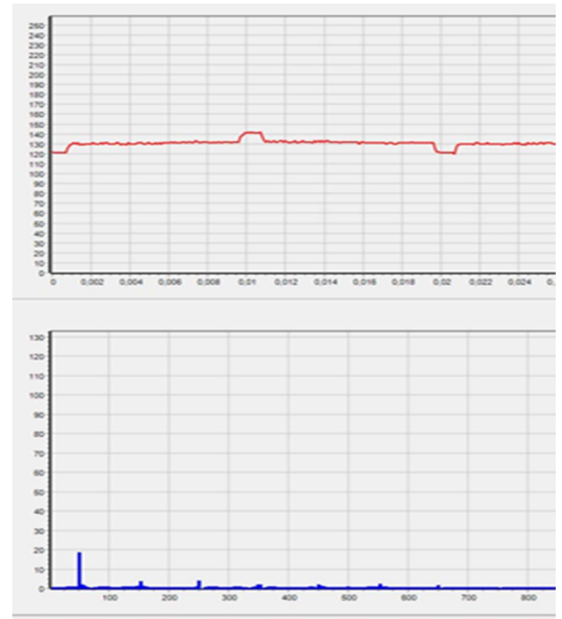


Рисунок 12 – Результаты обработки сигналов 50 и 550 Гц – 40 и 8 В



а)

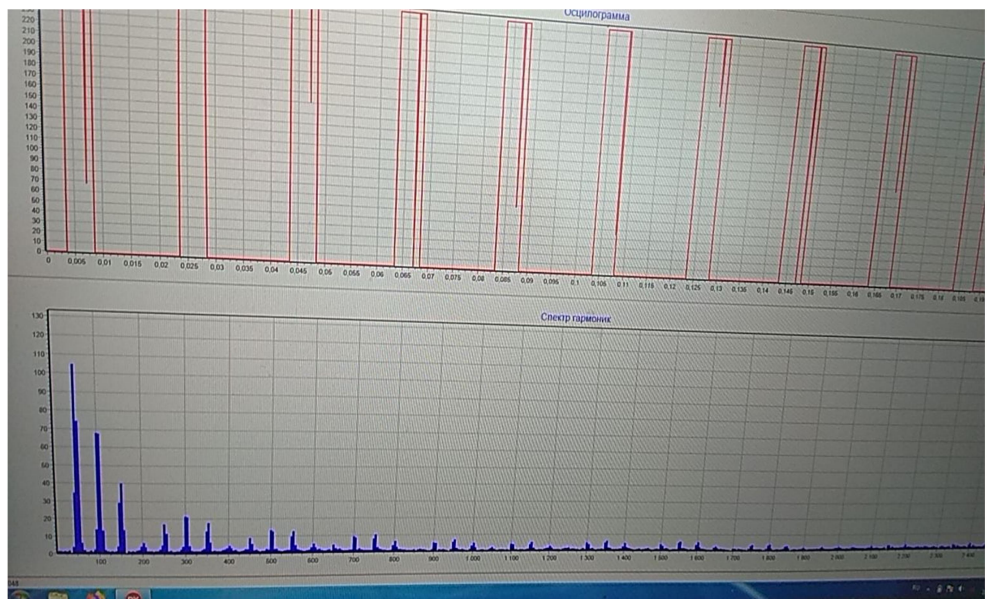


б)

Рисунок 13 – Испытания мобильного ЭТК на ВЛ 6 кВ:
а – подъем мобильного ЭТК, б – результаты обработки сигнала



а)



б)

Рисунок 14 – Испытания мобильного ЭТК вблизи ВЛ-110 кВ (а) и наведенные ВГ (б)

Апробация мобильного ЭТК показала возможность выделения различных видов сигналов как в лабораторных условиях, так и в условиях реальных ВЛ.

Заключение

В настоящем исследовании обоснованы методы, алгоритмы, схемные решения, позволяющие повысить эффективность работы ЭТК автономного электроснабжения, включающего

в себя АСНЭ, за счет экономии топлива в энергоустановках, расширения функционала АСНЭ в части диагностики воздушных линий ЭП напряжением 6–10 кВт с целью определения мест ОЗЗ с последующим его уточнением мобильным ЭТК. Все это способствует улучшению ключевых показателей по оценке эффективности эксплуатации систем автономного электроснабжения *SAIDI*, *SAIFI* и *CAIDI*.

На основе сочетания непрерывных и дискретных методов оптимизации суточного цикла работы АСНЭ по критерию минимума расхода топлива энергоустановок построены алгоритмы управления АСНЭ. Рассмотрены варианты изменяемого тока заряда АБ, когда АСНЭ работает в режиме баланса мощности и обеспечивает максимальную экономию топлива энергоустановки и пониженного тока заряда, повышающего ресурс АБ. Экономия топлива в зависимости от графиков электрической нагрузки может достигать 5–10 %.

В диссертации разработаны группа методов и схемные решения по использованию АСНЭ для диагностирования ВЛ при ОЗЗ. Обосновывается тестирование отключенного фидера переменным током НП разных частот. При этом решается задача на основе односторонних измерений определения расстояния до места ОЗЗ в условиях древовидной структуры фидера. В сочетании с методом «резонансных частот» сокращается зона топографического поиска места аварии. Показано, что тестирование фидера со стороны ЦП по двум его фазам через выделенные трансформаторы посредством односторонних измерений можно определить место ОЗЗ, и при этом разработанный метод не чувствителен к величине переходного сопротивления в месте аварии.

Разработанный действующий образец мобильного ЭТК фиксации места ОЗЗ при обходе ВЛ взаимодействует с сигналами, генерируемыми АСНЭ в аварийную фазу фидера, что повышает его избирательность в условиях наведенных помех от соседних ВЛ. Обработка сигнала с использованием весовых коэффициентов, задаваемых вероятностным распределением Гаусса, позволяет повысить чувствительность мобильного ЭТК, его чувствительность в условиях ОЗЗ через переходные сопротивления и также одновременно снизить влияние наведенных помех. Лабораторные испытания и натурные эксперименты подтвердили работоспособность заложенных алгоритмов и программного обеспечения. Ожидаемое улучшение индексов *SAIDI*, *SAIFI* и *CAIDI* за счет комплексного использования АСНЭ и мобильного ЭТК до 15 %.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации по теме диссертации в журналах из списка ВАК по специальности

1. Вагапов Г. В., Абдуллазянов А. Ф. Мобильный электротехнический комплекс для бесконтактного определения места повреждения на воздушной линии электропередачи напряжением 6–10 кВ / Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // Вестник КГЭУ. – 2023. – Т. 15, № 2 (58). – С. 140–151.

2. Тестирование фидеров древовидной структуры 6–10 кВ для определения места ОЗЗ / А. И. Федотов, Н. К. Андреев, Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // Вестник КГЭУ. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 80–92.

3. Многопараметрический электротехнический комплекс онлайн-мониторинга однофазных замыканий на землю фидеров древовидной структуры систем электроснабжения с изолированной нейтралью напряжением 6–35 кВ / А. И. Федотов, Р. Э. Абдуллазянов, Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2022. – № 8. – С. 2–11.

4. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи / А. И. Федотов, Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов, А. М. Шаряпов. – Текст : непосредственный // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 146–155.

5. Использование электрохимических накопителей энергии в системах автономного электроснабжения для снижения расхода топлива энергоустановок / А. И. Федотов, Е. А. Федотов, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 3–17.

6. Практическая реализация системы пофидерной диагностики однофазных замыканий на землю с распределенным сбором данных в режиме реального времени / А. И. Федотов, Р. Ш. Басыров, Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 2. – С. 78–85.

7. Экспериментальное исследование возможности выделения режима однофазного замыкания на землю в сети 6–10 кВ интеллектуальной системой учета электроэнергии / А. Ф. Абдуллазянов, А. И. Федотов, М. Н. Хабибуллин, Л. И. Абдуллин, Г. В. Вагапов. – Текст : непосредственный // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 5–15.

Публикации по теме диссертации, индексируемые в международных базах *Scopus* и *Web of Science*

8. Single-phase ground fault test of overhead power lines in ungrounded power grids of 6–10 kV / A. Fedotov, G. Vagapov, A. Abdullazyanov, R. Abdullazyanov, L. Grackova. – Текст : непосредственный // 2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, (RTUCON 2021) (15–17 November 2021, Riga, Latvia.) – Riga: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2021. – Pp. 1–5. DOI: 10.1109/rtucon53541.2021.9711581

9. Development the functionality of digital electricity meters for diagnostic of single-phase damages / A. Fedotov, G. Vagapov, L. Abdullin, A. Abdullazyanov. – Текст : непосредственный // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), October 6, 2020. – Riga: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2020. – Pp. 1–4. DOI: 10.1109/fareastcon50210.2020.9271337

Список патентов по теме диссертации

10. Патент на изобретение 2771222 С1, 28.04.2022. Способ определения поврежденного фидера при однофазном замыкании на землю в распределительной электрической сети / Федотов А. И., Латипов А. Г., Абдуллазянов А. Ф., Вагапов Г. В.

11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023614371, 01.03.2023. Программное обеспечение мобильного электротехнического комплекса определения места повреждения на воздушной линии электропередачи напряжением 6–35 кВ с изолированным режимом работы нейтрали / Вагапов Г. В., Федотов А. И., Чернов А. Б., Абдуллазянов А. Ф.

Публикации по теме диссертации в сборниках международных и всероссийских конференций

12. Экономия топлива в электротехническом комплексе «Энергоустановка – АСНЭ» / А. И. Федотов, Г. В. Вагапов, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XV Всероссийской научно-технической конференции, 2 июня 2023 г. – Чебоксары, 2023. – С. 231–232.

13. Аппаратная реализация системы пофидерного контроля однофазных замыканий на землю в лабораторных условиях / А. И. Федотов, А. Ф. Абдуллазянов, Л. И. Абдуллин, Г. В. Вагапов. – Текст : непосредственный // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. – Казань, 2020. – С. 250–253.

14. Выделение режима однофазного замыкания на землю в сети 6–10 кВ на основе интеллектуальной системы учета электроэнергии / Л. И. Абдуллин, А. Ф. Абдуллазянов, М. Н. Хабибуллин, Г. В. Вагапов. – Текст : непосредственный // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2020. – С. 276–279.

15. Определение параметров режима однофазного замыкания на основе умных измерителей / Л. И. Абдуллин, Г. В. Вагапов, Э. Р. Балявина, А. Ф. Абдуллазянов. – Текст : непосредственный // САПР и моделирование в современной электронике: сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – Брянск, 2020. – С. 310–312.