

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический

Кафедра энергетики

Направление подготовки 13.04.02 - Электроэнергетика и электротехника

Направленность (профиль) образовательной программы

Электроэнергетические системы и сети

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

_____ Н.В. Савина

« ____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Применение инновационных технологий в электрических сетях с
переключательными пунктами для оптимизации режимов распределительных
сетей в КНР

Исполнитель

студент группы 342-ом3

подпись, дата

Чжао Гоцзин

Руководитель

доцент, канд. техн. наук

подпись, дата

А.Н. Козлов

Руководитель

научного содержания

программы магистратуры

профессор, докт. техн.

наук

подпись, дата

Н.В Савина

Нормоконтроль

старший преподаватель

подпись, дата

Л.А. Мясоедова

Рецензент

подпись, дата

Благовещенск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

_____ Н.В. Савина
«_____» _____ 20__ г.

З А Д А Н И Е

К выпускной квалификационной работе студента Чжао Гоцзин

1. Тема выпускной квалификационной работы: Применение инновационных технологий в электрических сетях с переключательными пунктами для оптимизации режимов распределительных сетей в КНР

(утверждено приказом от 06.03.2025 № 609-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 06.06.2025

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Руководящие документы Министерства энергетики КНР и научно-исследовательских организаций по режимам работы электрических сетей.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): Состояние распределительных электрических сетей в КНР. Конструкции переключательных пунктов. Реклоузер – конструкция и назначение. Варианты применения реклоузера. Требования к системе мониторинга распределительных сетей и оптимизация режимов их работы. Инновационные технические решения при проектировании распределительных сетей.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) перевод текста рисунков, выполненных на китайском языке, презентация, лист графической части

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов) _____

7. Дата выдачи задания 12.01.2025

Руководитель выпускной квалификационной работы: Козлов Александр Николаевич, доцент, кандидат технических наук

(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата): 12.01.2025

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 101 страницы, 21 рисунок, 2 таблиц, 47 источник, 1 приложение.

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ, РЕКЛОУЗЕР, ТЕХНОЛОГИЯ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ, СВЯЗЬ 5G, САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ, МЯГКИЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ.

В работе рассмотрены пути повышения надёжности и эффективности распределительных сетей 10 кВ на основе применения интеллектуальных реклоузеров. Сравнены подходы Китая и России к технологии секционирования, выявлены преимущества реклоузеров в различных схемах: с односторонним и резервным питанием, с плавкими предохранителями, на протяжённых линиях. Предложена стратегия оптимизации, включающая использование 5G-связи для ускорения самовосстановления, мягких переключателей для гибкости сети и интеллектуальных алгоритмов (GBDT) для повышения точности управления. Проведено моделирование в MATLAB/Simulink, подтвердившее сокращение времени отключений и повышение стабильности питания.

Рассмотрены перспективы цифровизации распределительных сетей, включая интеграцию искусственного интеллекта и новых коммуникационных технологий. Работа имеет практическое значение для модернизации энергосистем в условиях перехода к интеллектуальной инфраструктуре.

Магистерская диссертация была разработана в операционной системе Windows 10, с использованием следующих программных продуктов: Microsoft Office Word 2024, Microsoft Office Visio 2024, Microsoft Office Excel 2024, MATLAB и ПБК RastrWin 3.

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	3
Введение.....	7
1 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕКЛОУЗЕРОВ	9
1.1 Значение секционирования воздушных линий электропередачи.....	9
1.2 Обзор развития секционирующих устройств распределительной сети	11
1.2.1 Этапы развития секционирующего оборудования	11
1.2.2 Традиционные секционирующие устройства в распределительных сетях России	15
1.2.3 Необходимость замены традиционных секционирующих устройств реклоузерами.....	17
1.3 Конструкция и принцип действия реклоузера.....	20
1.4 Конструкция и принцип действия реклоузера.....	23
1.5 Выводы.....	26
2 ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКЛОУЗЕРА	28
2.1 Последовательное применение реклоузеров в различных конфигурациях линий.....	28
2.1.1 Вариант секционирования линий с односторонним питанием ..	28
2.1.2 Вариант секционирования линий с резервным питанием.....	30
2.1.3 Вариант секционирования с применением плавких предохранителей	33
2.1.4 Вариант секционирования для протяжённых линий с усиленной защитой.....	35
2.2 Анализ применимости вариантов применения реклоузеров.....	38
2.3 Сравнение характеристик и эффективности вариантов применения реклоузеров.....	42
2.4 Выводы.....	44

3 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕКЛОУЗЕРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	46
3.1 Современное состояние и вызовы оптимизации распределительных сетей в Китае	46
3.2 Стратегии оптимизации работы реклоузеров на основе интеллектуальных коммуникаций и обработки данных	51
3.2.1 Технологическая схема быстросействующей защиты и самовосстановления	53
3.2.2 Оптимизация алгоритма управления реклоузером с использованием методов, основанных на данных	58
3.2.3 Технология гибких мягких коммутационных устройств	63
3.3 Моделирование оптимизации распределительной сети в среде Matlab	66
3.3.1 Описание системы моделирования	66
3.3.2 Техническая верификация и оценка эффективности оптимизации	69
3.4 Применение инновационных технологий в распределительных сетях	73
3.5 Выводы	75
4 ПЕРСПЕКТИВЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ НОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	77
4.1 Тенденции развития распределительных сетей и нормативно-политические ориентиры	77
4.2 Перспективы развития новых коммуникационных технологий в распределительных сетях	79
4.3 Перспективы применения искусственного интеллекта в системе управления реклоузерами	83
4.4 Выводы	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	91

ПРИЛОЖЕНИЕ А. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК НА КИТАЙСКОМ ЯЗЫКЕ.....	96
---	----

Введение

Современные распределительные сети всё чаще сталкиваются с вызовами, связанными с увеличением нагрузки, подключением распределённых источников энергии и необходимостью повышения надёжности электроснабжения. В этих условиях возрастает значение применения интеллектуальных устройств, таких как реклоузеры, которые обеспечивают автоматическую локализацию повреждений и восстановление питания в кратчайшие сроки. В последние годы в Китае и России активизировались исследования и внедрение таких технологий в средневольтные воздушные линии, особенно на уровне 10 кВ.

Выбор темы обусловлен необходимостью повышения эффективности управления распределительными сетями, особенно в сельских и пригородных районах, где из-за географических условий и протяжённости линий риск отключений особенно высок. В качестве исходных данных для разработки использованы статистические отчёты энергетических компаний, нормативные документы (в том числе китайские стандарты на распределение и автоматизацию), а также практические кейсы применения реклоузеров в разных регионах.

Актуальность темы заключается в необходимости сокращения времени отключений, повышения точности определения места повреждения и обеспечения устойчивой работы сетей при минимальных трудозатратах. Традиционные методы с использованием масляных выключателей и секционных шкафов уже не удовлетворяют требованиям современных интеллектуальных сетей. Поэтому внедрение новых решений на базе цифровой связи, гибкой коммутации и аналитических алгоритмов имеет стратегическое значение.

Научная новизна работы заключается в разработке и проверке комплексного подхода к оптимизации управления распределительными сетями с помощью реклоузеров, сочетающего 5G-коммуникации, технологии

мягкой коммутации и алгоритмы на основе искусственного интеллекта. В рамках исследования предложена методология выбора оптимальной стратегии секционирования и проведено моделирование её эффективности на примере типовой сети 10 кВ.

Практическая значимость выражается в возможности применения разработанных решений в действующих распределительных системах, как в Китае, так и в других странах, для повышения уровня автоматизации, снижения эксплуатационных затрат и повышения качества электроснабжения. Полученные результаты могут использоваться энергетическими компаниями при планировании модернизации сетей и выборе оборудования для реконструкции.

Участие и публикация в научных конференциях: 20 апреля 2023 года я принял участие в XXXIII научной конференции Амурского государственного университета «День науки» с докладом на тему «Использование сердечников из аморфных магнитных сплавов в силовых трансформаторах». 13 марта 2025 года я выступил на XXXIV научной конференции Амурского государственного университета «День науки» с презентацией «Оптимизация режимов распределительных сетей с переключательными пунктами в КНР».

1 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ И ТЕХНОЛОГИИ РЕКЛОУЗЕРОВ

1.1 Значение секционирования воздушных линий электропередачи

Воздушные линии распределительной сети, находясь длительное время под воздействием окружающей среды, подвержены различным внешним факторам, таким как удары молний, контакт с ветвями деревьев, а также активность животных. В случае короткого замыкания или иной серьёзной неисправности обычно происходит отключение всей линии, что приводит к массовым отключениям электроснабжения в зоне питания и вызывает значительные экономические потери. Согласно данным энергетических служб, около 80 % неисправностей в распределительных сетях являются кратковременными по своему характеру [1]. В связи с этим, возможность быстрого изолирования повреждённого участка и оперативного восстановления электроснабжения на неповреждённых сегментах существенно снижает время отключения и сопутствующие убытки.

В структуре энергосистемы распределительная сеть является ключевым звеном между подстанцией и конечными потребителями, и, как правило, организована по радиальной или кольцевой схеме. Именно в этом контексте получила развитие технология секционирования распределительных сетей, которая служит фундаментом для построения автоматизированной и интеллектуальной системы управления современной распределительной сетью, а также играет важную роль в модернизации городских сетей и повышении надёжности сельских электросетей. С целью повышения непрерывности электроснабжения и гибкости эксплуатации систем в распределительных сетях широко применяется технология секционирования. Она реализуется путём разделения воздушной линии на несколько независимых зон управления с установкой управляемых коммутационных устройств на границах этих зон. В случае возникновения неисправности в одном из сегментов, данный участок быстро отключается, а неповреждённые участки повторно включаются за счёт реконфигурации сети или резервного

питания, тем самым минимизируя зону поражения и время отключения [2].

Для наглядной демонстрации механизма автоматического секционирования и резервного электроснабжения на воздушной линии на рисунке 1–1 представлена схема изоляции повреждённого участка и восстановления питания, реализуемая под управлением удалённого терминала (RTU). Данный подход предполагает автоматическое определение повреждённой зоны с последующим отключением выключателя и включением резервной линии питания, что позволяет эффективно достичь локальной изоляции и быстрого восстановления электроснабжения на исправных участках.

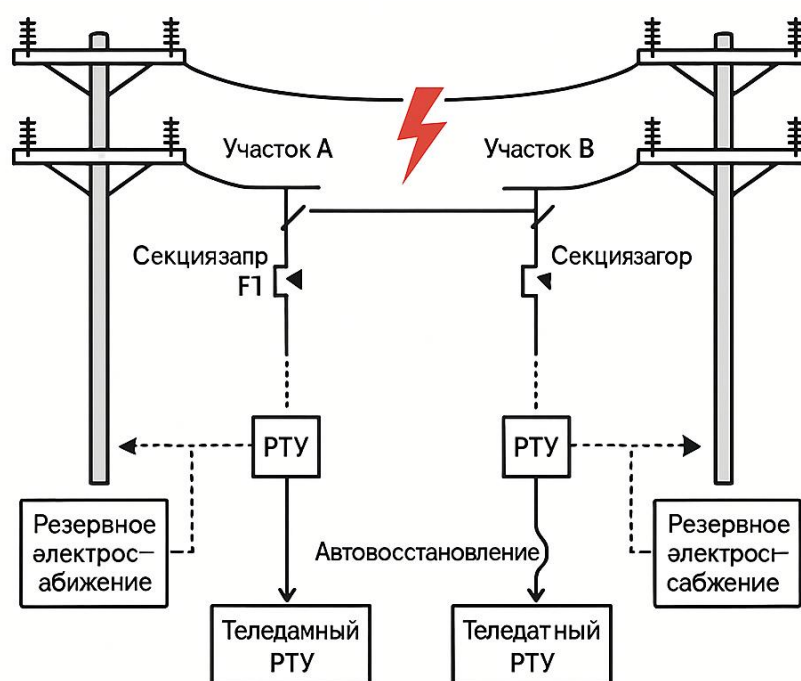


Рис. 1-1. Схема автоматического секционирования и восстановления электроснабжения на воздушной линии под управлением RTU

На практике распределительных сетей Китая и России технология секционирования воздушных линий получила широкое применение для изоляции повреждений и повышения надёжности электроснабжения.

Так, например, в Китае на 10-киловольтной сельской фидере в уезде Синьсин городского округа Юньфу провинции Гуандун, общей протяжённостью около 35 км и обслуживающей порядка 1200 потребителей, после внедрения интеллектуальных секционирующих устройств в 2022 году

средняя продолжительность отключений по системе (показатель SAIDI) снизилась примерно на 40 %, а надёжность электроснабжения возросла более чем на 15 % [3].

В 2023 году российская компания «Россети» реализовала проект установки автоматических реклоузеров на 10-киловольтной линии протяжённостью около 60 км в Красноярском крае. Эта линия обеспечивает электроснабжение примерно 2000 абонентов. В рамках проекта были внедрены интеллектуальные контроллеры с поддержкой протокола IEC 61850, что позволило значительно ускорить обнаружение и изоляцию неисправностей, тем самым сократив зону отключения и уменьшив прямые экономические потери примерно на 20 % [4].

Таким образом, грамотное секционирование воздушных линий не только повышает гибкость структур распределительных сетей, но и служит важным инструментом обеспечения стабильности электроснабжения и оптимизации эксплуатационных расходов.

1.2 Обзор развития секционирующих устройств распределительной сети

1.2.1 Этапы развития секционирующего оборудования

Технологии секционирующих выключателей в распределительных сетях Китая претерпели эволюцию от ручного управления к интеллектуальному, что заложило прочную основу для повышения надёжности электроснабжения. Во второй половине XX века в распределительных сетях среднего напряжения 10 кВ основными средствами защиты и секционирования были выключатели на подстанциях, плавкие предохранители типа «drop-out» и ручные разъединители [5]. В случае аварии локализация и изоляция неисправности осуществлялись вручную, что приводило к длительным отключениям — вплоть до нескольких часов.

Во второй половине 1990-х годов, с ростом потребности в автоматизации распределительных сетей и внедрением зарубежных технологий, в Китае началась разработка автоматических секционирующих устройств для

установки на опорах. В XXI веке такие устройства стали основой модернизации распределительных сетей, активно внедряемой Государственной электросетевой корпорацией и Южной сетевой компанией Китая. Реклоузеры стали ключевыми элементами секционирования фидеров.

В период с 2005 по 2010 год традиционные масляные реклоузеры постепенно были вытеснены вакуумными моделями из-за их недостатков: необходимость частой замены изоляционного масла, большие габариты и опасность возгорания [6]. Вакуумные реклоузеры, напротив, отличались длительным ресурсом отключений (до 20 000–30 000 циклов), отсутствием необходимости в обслуживании и экологической безопасностью, что сделало их основным выбором на рынке [7].

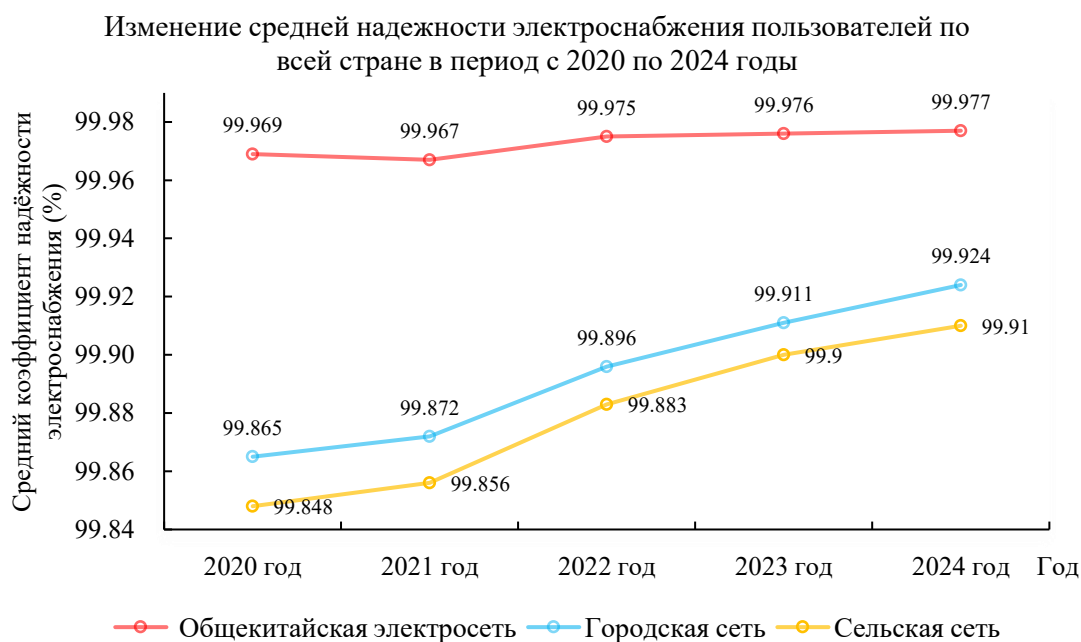


Рис. 1-2. Изменение средней надежности электроснабжения пользователей по всей стране в период с 2020 по 2024 годы

Отечественные производители, такие как XJ Electric и Pinggao Electric, разработали модели ZW32M-12, AB-3S-12, CHZ-12, использующие вакуумные дугогасительные камеры и пружинные или магнитные механизмы привода. Они оснащаются микропроцессорными контроллерами, поддерживают до трёх повторных включений, функцию защиты от перегрузок и возможность удалённого управления [8]. Продукция ведущих

международных компаний, таких как ABB (серия OVR) и Schneider Electric (серия U), также широко применяется в распределительных сетях Китая [9].

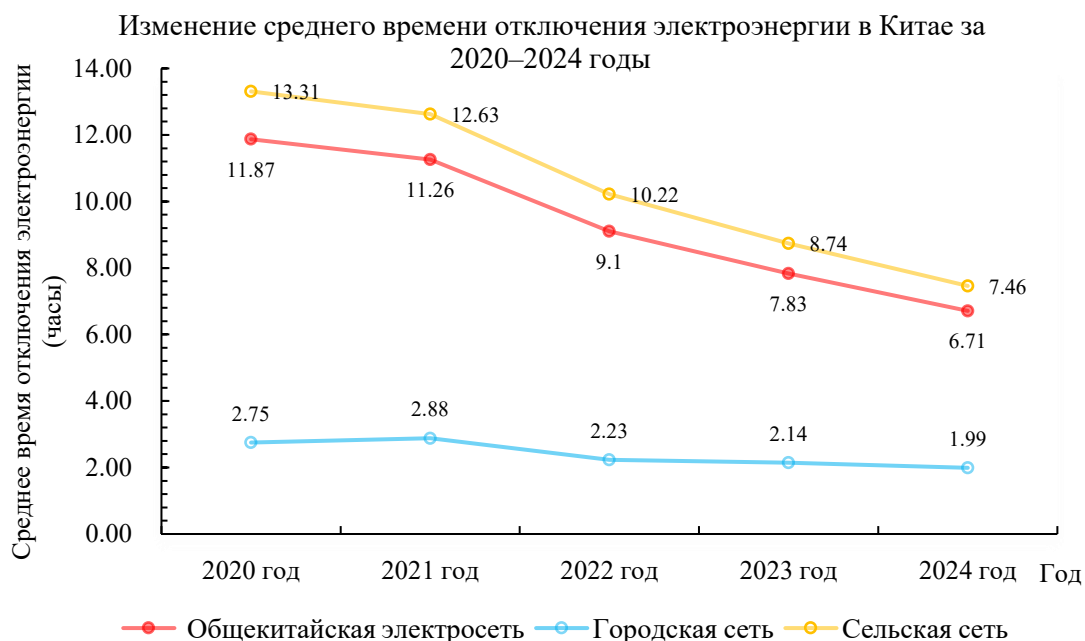


Рис. 1-3. Изменение среднего времени отключения электроэнергии в Китае за 2020–2024 годы

Динамика изменения среднего уровня надёжности электроснабжения пользователей по всей стране за период 2020–2024 годов приведена на рисунке 1–2, а изменение среднего времени отключения — на рисунке 1–3. Источник данных: Годовой отчёт Государственного энергетического управления КНР о надёжности электроснабжения за 2024 год.

Технология секционирования в распределительных сетях России начала развиваться сравнительно рано и прошла путь от масляных выключателей до интеллектуальных реклоузеров. Уже в 1960-х годах на воздушных линиях напряжением 6–10 кВ стали внедряться так называемые “точки секционирования воздушных линий”, где применялись масляные выключатели, установленные в уличных шкафах или небольших распределительных пунктах, оснащённых релейной защитой. Основной задачей таких устройств было обеспечение надёжной защиты при передаче электроэнергии на большие расстояния. Однако они обеспечивали только простую защиту от перегрузки и однократное автоматическое включение,

требовали ручного сброса и регулярного обслуживания, а высокая стоимость ограничивала их применение преимущественно важными линиями.

Во 1980-х годах внедрение вакуумной технологии дугогашения способствовало миниатюризации и автоматизации секционирующего оборудования [10]. По сравнению с масляными выключателями, вакуумные устройства имели вдвое меньшие габариты, значительно более продолжительный ресурс отключений, и со временем полностью вытеснили громоздкие масляные аналоги. Это стало отправной точкой для развития опорных реклоузеров (реклоузеров, устанавливаемых непосредственно на опорах воздушных линий) [11].

К концу XX века компания Tavrida Electric разработала серию реклоузеров PBA/TEL (в частности, модель Rec15), которые стали доминирующим решением на российском рынке. Устройства данной серии представляли собой полностью интегрированные модули, включающие трёхфазный вакуумный выключатель, датчики тока и напряжения, а также микропроцессорный контроллер. Конструкция позволяла устанавливать их непосредственно на опорах ВЛ, обеспечивая 2–3 попытки повторного включения с интервалами от 0,2 до 1 секунды и полностью автоматическую изоляцию повреждений без участия персонала [12].

В период 2000–2010 годов реклоузеры серии PBA/TEL были широко внедрены на 10-киловольтных линиях, что существенно повысило уровень автоматизации распределительных сетей [13]. В 2010-х годах, с развитием технологий интеллектуальных сетей и распределённой генерации, российские распределительные компании (например, ПАО «Россети») начали внедрение децентрализованной автоматизации, требуя от потребителей, включая промышленные и горнодобывающие предприятия, устанавливать реклоузеры на отходящих линиях для локализации аварий на стороне потребителя [14].

Таким образом, как в Китае, так и в России развитие секционирующих устройств в распределительных сетях прошло путь от традиционного ручного управления к высокоавтоматизированным интеллектуальным системам. В

Китае благодаря масштабным программам модернизации, реализуемым Государственной и Южной сетевыми корпорациями, был достигнут значительный прогресс от импортных решений к локализованным и, в дальнейшем, интеллектуализированным моделям.

Это позволило сформировать зрелую техническую базу и отраслевые стандарты. В России, напротив, накопленный ещё в советский период опыт в области релейной защиты и вакуумных технологий позволил рано начать широкое внедрение вакуумных реклоузеров на длинных воздушных линиях, а также сосредоточиться на развитии децентрализованных систем автоматизации. Несмотря на различия в подходах, обе страны стремятся к повышению эффективности устранения неисправностей, сокращению времени отключения и обеспечению непрерывности электроснабжения. Постоянное совершенствование секционирующего оборудования становится ключевым элементом модернизации распределительных сетей и создаёт основу для будущей интеграции распределённых источников энергии и построения самоизлечивающихся сетей.

1.2.2 Традиционные секционирующие устройства в распределительных сетях России

В распределительных сетях России традиционные секционирующие устройства, как правило, представляют собой наружные металлические шкафные распределительные комплексы, наиболее типичным примером которых являются установки серии КРУН-СВЛ. Эти устройства объединяют в одном корпусе различные компоненты: разъединитель, выключатель (вакуумный или масляный), трансформаторы тока и напряжения, ограничители перенапряжений, а также системы управления и релейной защиты.

Как показано на рисунке 1–4, конструкция КРУН-СВЛ представляет собой герметичный интегрированный модуль: высоковольтные элементы (в том числе выключатель и разъединитель) объединены с низковольтным шкафом управления и релейной защитой, а встроенная терморегулирующая

система предотвращает образование конденсата и обледенение. Компактная конструкция позволяет существенно сократить объём вторичных соединений на месте установки. Также оборудование поддерживает функции учёта электроэнергии.

Кроме того, в зависимости от условий эксплуатации установки КРУН-СВЛ могут быть укомплектованы системами одностороннего или двустороннего питания, автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического резерва (АВР).

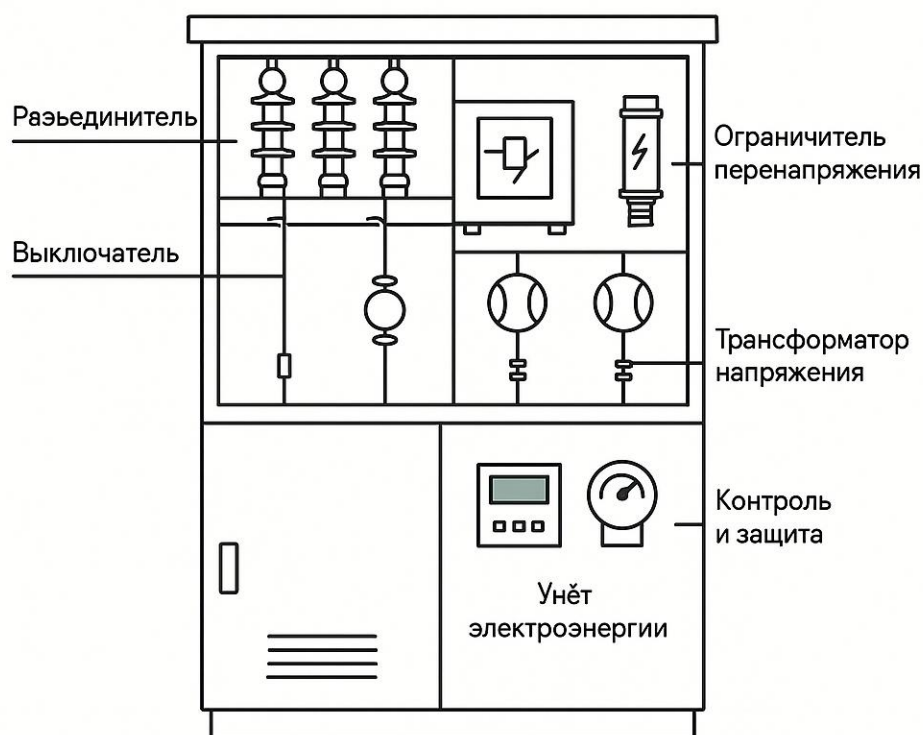


Рис. 1-4. Внутреннее устройство КРУН-СВЛ

Несмотря на техническую продвинутость, традиционные секционирующие шкафные устройства имеют ряд существенных ограничений и эксплуатационных проблем.

Прежде всего, они отличаются большими габаритами и массой: масса одного шкафа может достигать нескольких тонн. В составе оборудования используются масляные выключатели или вакуумные выключатели с заменяемыми дугогасительными камерами, требующие регулярных осмотров и технического обслуживания (например, замены масла, проверки степени вакуума и др.), что увеличивает трудозатраты на эксплуатацию.

Кроме того, после установки такие шкафы имеют фиксированное положение и слабо адаптируются к изменениям топологии сети. В случае необходимости перестройки сетевой конфигурации или подключения распределённых источников энергии часто требуется ручное отключение и повторное включение, что говорит о низком уровне автоматизации. Надёжность таких устройств ограничивается сроком службы механических компонентов, при этом интервалы регламентных проверок велики, а сам ремонт оборудования в случае неисправности требует значительных усилий на месте установки.

С точки зрения функциональности традиционные секционирующие устройства, будучи ориентированы на локальное управление коммутацией, практически не обладают возможностями удалённого мониторинга и информационного взаимодействия, что не соответствует требованиям современной интеллектуальной распределительной сети. Хотя такие устройства способны обеспечить базовое секционирование линий и ограниченную функцию автоматического повторного включения, их конструкция и алгоритмы управления уже не удовлетворяют требованиям интеллектуального и высоконадёжного энергоснабжения. Это делает модернизацию оборудования крайне актуальной [15].

1.2.3 Необходимость замены традиционных секционирующих устройств реклоузерами

В отличие от прежних секционирующих устройств, которые требовали отдельной установки релейной защиты и ручного управления, современные реклоузеры обладают функцией автономного управления. Они способны самостоятельно обнаруживать ток короткого замыкания, автоматически отключаться и вновь включаться согласно заданной временной логике, включая повторные циклы, без необходимости в дополнительной внешней защите. Такая конструкция позволяет при кратковременных неисправностях быстро восстанавливать электроснабжение, а при постоянных повреждениях — после заданного числа неудачных попыток включения блокировать цепь,

тем самым изолируя повреждённый участок и значительно повышая надёжность электроснабжения [16].

Ещё одним преимуществом реклоузеров является простота интеграции в сети и поддержка интеллектуального управления. Большинство современных моделей оснащаются цифровыми контроллерами и обеспечивают взаимодействие с системами управления распределительными сетями. Они позволяют дистанционно отслеживать параметры работы, такие как ток и напряжение, а также выполнять команды на включение и отключение через канал связи. Это даёт возможность выполнять такие функции, как определение местоположения неисправности, её изоляция и автоматическое восстановление питания, без вмешательства обслуживающего персонала. По сообщениям, после внедрения реклоузеров и устройств автоматического ввода резерва значительно повысился уровень надёжности электроснабжения, а необходимость в сложной релейной защите была существенно снижена [17].

Реклоузеры также могут взаимодействовать с другими автоматизированными устройствами, например с дистанционными терминалами FTU, в составе кольцевых сетей. Такие решения позволяют выполнять самодиагностику и устранение неисправностей даже при отсутствии телекоммуникационной сети. В сетях с распределённой генерацией, возобновляемыми источниками энергии или в микросетях реклоузеры способны гибко изменять число попыток включения и интервалы срабатывания, подстраиваясь под условия двунаправленного потока мощности и быстрой перестройки топологии сети.

С точки зрения конструкции один реклоузер способен заменить несколько традиционных предохранителей или нагрузочных выключателей, что сокращает общее количество точек секционирования. Например, установка автоматического реклоузера на магистральном участке фидера позволяет избежать каскадных отключений, характерных для схем с многоступенчатыми предохранителями, при этом на ответвлениях могут оставаться более дешёвые секционирующие устройства для локальной

изоляции. На практике такая схема показала более высокую надёжность.

В Китае предложена концепция использования реклоузеров в сочетании с технологией импульсного включения для автоматизации распределительных сетей сельской местности. Суть технологии заключается в следующем: после отключения реклоузера в результате короткого замыкания включение происходит в момент, когда фазное напряжение на стороне источника достигает 118° , а отключение — при первом прохождении тока через ноль. Весь процесс занимает всего 3–8 мс. Как показано на рисунке 1–5, в течение этого краткого интервала формируется незначительный импульс тока, по которому можно судить о наличии или отсутствии неисправности. Если линия исправна — реклоузер немедленно замыкается, если нет — остаётся в отключённом состоянии.

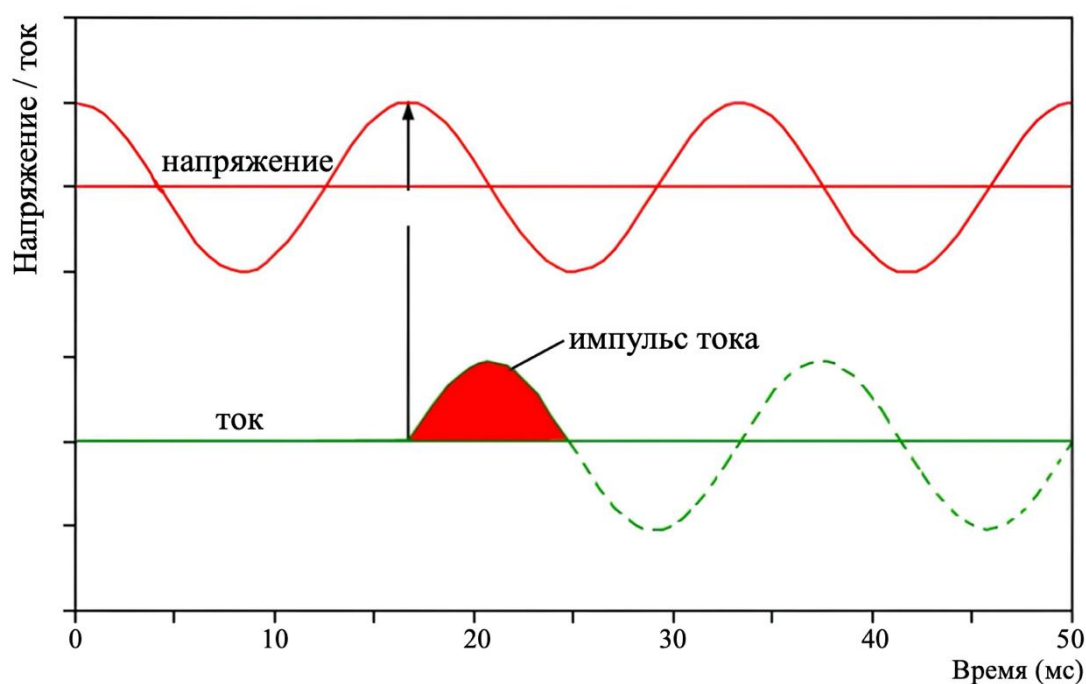


Рис. 1-5. График импульсного включения и выключения

Для оценки влияния различных типов оборудования на поведение системы при аварийных ситуациях традиционные секционирующие устройства и интеллектуальный импульсный реклоузер IntelliRupter были подключены к одной и той же линии. В ходе моделирования различных типов повреждений была проведена серия сравнительных испытаний, направленных на анализ реакции системы при попытке автоматического

повторного включения в условиях постоянного короткого замыкания.

Результаты трёх наиболее показательных экспериментов приведены в таблице 1–1. Как показали испытания, даже при выполнении импульсного включения в условиях постоянной неисправности импульсный реклоузер не вызывает повторной перегрузки системы. Это свидетельствует о высокой селективности и чувствительности устройства, а также о способности предотвращать повторные воздействия на сеть. Таким образом, внедрение импульсной технологии реклоузеров значительно повышает надёжность и качество электроснабжения после модернизации распределительной сети.

Таблица 1-1 Таблица классификации реклоузеров

		I (A)	T (s)	I ² T (A ² s)
1	Секционирующие устройства	2000	0.542	2168000
	Импульсное замыкание	930	0.0053	4800 (0.22%)
2	Секционирующие устройства	5000	0.162	4050000
	Импульсное замыкание	2460	0.0055	34400 (0.85%)
3	Секционирующие устройства	12500	0.088	13750000
	Импульсное замыкание	6380	0.0056	236900 (1.72%)

В целом, реклоузеры отличаются компактной конструкцией, низкими затратами на установку и обслуживание, а также высоким уровнем интеллектуального управления, что полностью соответствует тенденциям автоматизации и цифровизации электроэнергетических систем. Таким образом, замена традиционных точек секционирования реклоузерами стала объективно необходимым выбором для повышения надёжности электроснабжения и модернизации распределительных сетей [18].

1.3 Конструкция и принцип действия реклоузера

Реклоузер (Recloser) — это важное устройство высоковольтного коммутационного оборудования, применяемое в распределительных сетях, которое способно автоматически обнаруживать и устранять неисправности путём многократного отключения и повторного включения, восстанавливая

электроснабжение [19].

Согласно стандарту IEEE, реклоузер выполняет запрограммированные циклы отключения и повторного включения после обнаружения неисправности, вплоть до полного восстановления исходного режима или окончательного отключения при постоянной аварии [20]. Основная функция реклоузера заключается в быстрой автоматической ликвидации кратковременных повреждений без участия персонала, а также в изоляции участков при постоянных повреждениях, что позволяет существенно повысить надёжность электроснабжения.

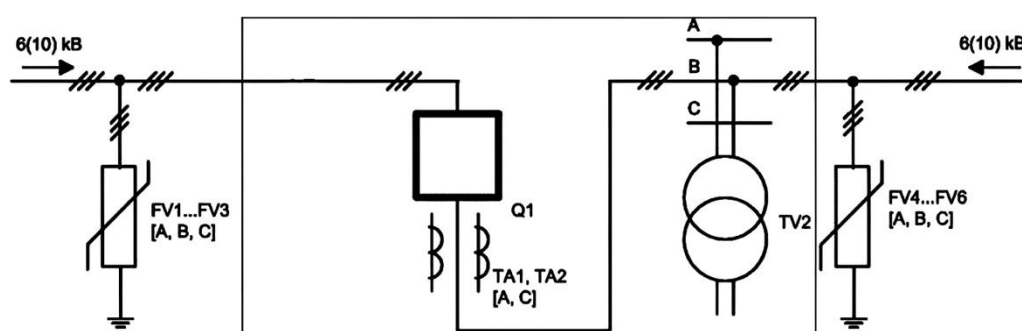


Рис. 1-6. Принципиальная схема включения реклоузера в линию при одностороннем питании

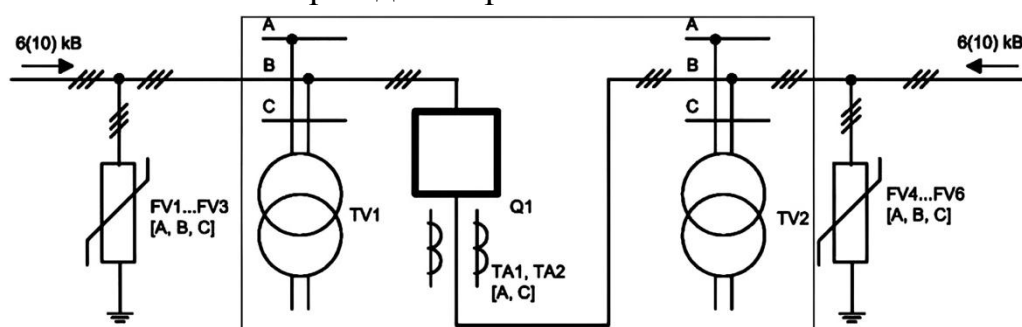


Рис. 1-7. Принципиальная схема включения реклоузера в линию при двустороннем питании

В зависимости от схемы питания реклоузеры подразделяются на односторонние и двусторонние. На рисунке 1–6 показан односторонний реклоузер, который получает питание для собственных нужд (оперативное питание) от трансформатора собственных нужд (ТСН), подключённого со стороны источника. На рисунке 1–7 представлена схема двустороннего реклоузера, который может получать питание от любого из двух трансформаторов собственных нужд, установленных по обе стороны

устройства.

С конструктивной точки зрения типичный реклоузер состоит из трёх основных компонентов: коммутационного блока (выключателя), исполнительного механизма и контроллера. Коммутационный блок, как правило, использует вакуумный выключатель или выключатель с элегазовой (SF_6) средой в качестве дугогасительного элемента, в сочетании с изоляционными опорами и металлическим корпусом. Исполнительный механизм отвечает за выполнение операций включения и отключения; наиболее распространёнными типами являются пружинный привод, электромагнитный привод и прямой привод с постоянными магнитами.

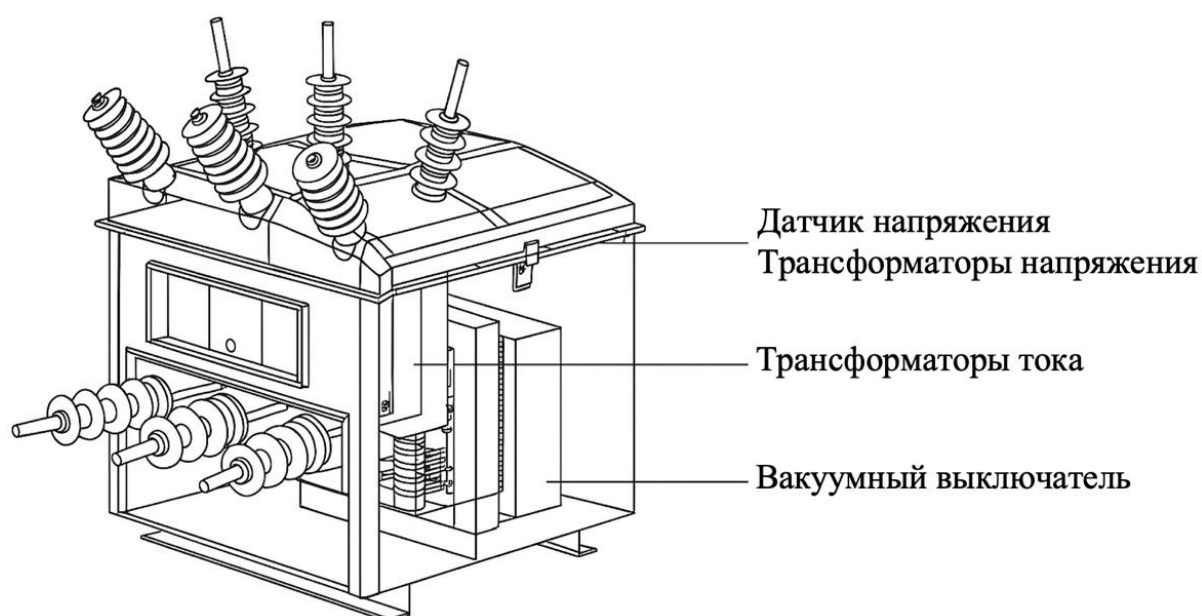


Рис. 1-8. Схема внутреннего устройства типичного реклоузера

Контроллер является ключевым элементом системы управления, обеспечивающим обнаружение повреждений и выполнение заданных алгоритмов работы. На рисунке 1–8 представлена внутренняя конструкция типичного реклоузера, включающая в себя встроенные трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, датчики и вакуумный выключатель, что обеспечивает компактность устройства и высокий уровень интеграции интеллектуальных функций.

Согласно классификации по изоляционной среде, реклоузеры подразделяются на маслонаполненные, вакуумные и элегазовые (SF_6). Выбор

дугогасительной среды оказывает прямое влияние на характеристики и надёжность реклоузера. На ранних этапах развития применялись маслonaполненные конструкции, однако из-за необходимости частого технического обслуживания и потенциальных рисков для безопасности они были постепенно выведены из эксплуатации. В настоящее время в большинстве современных моделей применяются технологии вакуумного или элегазового дугогашения. Вакуумные реклоузеры отличаются длительным ресурсом отключений, не требуют частого обслуживания и считаются экологически безопасными, благодаря чему получили наибольшее распространение. Элегазовые реклоузеры обладают высокими изоляционными и коммутационными характеристиками, что делает их подходящими для миниатюрных конструкций и эксплуатации в условиях повышенных требований к окружающей среде. Однако для них требуется строгий контроль герметичности во избежание утечки газа [21].

По способу установки реклоузеры делятся на опорные (наружные) и внутренней установки. Опорные модели используются на воздушных линиях и обладают хорошей устойчивостью к воздействию внешней среды. Устройства внутренней установки применяются в распределительных пунктах, комплектных распределительных устройствах и кольцевых ячейках, что особенно актуально для городских сетей.

Кроме того, в зависимости от номинального напряжения реклоузеры классифицируются на низковольтные, средневольтные и высоковольтные. Низковольтные устройства (до 15 кВ) предназначены для изоляции и восстановления питания при локальных неисправностях. Средневольтные модели (от 15 до 38 кВ) являются основными элементами автоматизации распределительных сетей. Высоковольтные реклоузеры (свыше 38 кВ) применяются на магистральных линиях и в ответвлениях с критичной нагрузкой.

1.4 Конструкция и принцип действия реклоузера

Контроллер реклоузера использует принципы микропроцессорной

защиты, обеспечивая оперативное обнаружение тока короткого замыкания и реализацию логики отключения и повторного включения. Основной задачей алгоритма управления является достижение баланса между изоляцией неисправности и восстановлением электроснабжения.

При коротком замыкании или другой аварийной ситуации сначала срабатывает встроенное реле максимального тока, инициируя быстрое отключение выключателя для устранения аварийного тока. Затем запускается таймер повторного включения, и по истечении заданной задержки контроллер выполняет попытку повторного включения.



Рис. 1–9. Блок-схема автоматического повторного включения реклоузера

Если после первого повторного включения линия восстанавливается, контроллер сбрасывается и переходит в режим мониторинга следующего возможного повреждения. В случае неудачи алгоритм продолжает повторные

попытки до достижения максимального установленного числа включений (как правило, от 1 до 3 раз). Если все попытки оказываются безуспешными, контроллер классифицирует повреждение как постоянное, блокирует дальнейшую работу и оставляет выключатель в отключённом состоянии, требуя вмешательства персонала.

На рисунке 1–9 представлена схема автоматического цикла отключения и повторного включения. В процессе работы контроллер регистрирует состояние каждой операции, параметры повреждения и передаёт данные через модуль связи на диспетчерский пункт, что позволяет оперативному персоналу получать информацию о месте аварии и порядке срабатываний. Контроллер поддерживает настройку различных стратегий повторного включения: с постоянной или переменной (обратной) временной задержкой. В режиме с постоянной задержкой каждое повторное включение выполняется через фиксированный интервал времени, что подходит для ликвидации кратковременных повреждений. В режиме с обратной временной задержкой время включения регулируется в зависимости от амплитуды тока — чем выше ток, тем быстрее производится повторное включение.

Современные контроллеры поддерживают управление отключением как по одной, так и по трём фазам. В системах с заземлённой нейтралью возможно применение однополюсного повторного включения, что позволяет сократить число отключённых потребителей. Кроме того, встроены функции распознавания фаз, синхронного включения, регистрации последовательности событий и осциллографирования, что значительно усиливает возможности системы в области самодиагностики и анализа данных [22].

Некоторые высококлассные устройства поддерживают протокол связи IEC 61850, что позволяет обмениваться данными с терминалами фидеров и системами автоматизации подстанций, а также дистанционно выполнять мониторинг состояния и отправку управляющих команд. Так, наружный вакуумный реклоузер типа ZW32 оснащён контроллером, поддерживающим

до трёх попыток повторного включения, с возможностью гибкой настройки интервала между ними в пределах от 0,2 до 1 секунды. Это позволяет одновременно удовлетворять требованиям как городских, так и сельских распределительных сетей к быстрому восстановлению электроснабжения. При успешном первом включении контроллер завершает цикл, сбрасывает счётчик после завершения времени восстановления и возвращается в исходное состояние. В случае неудачи всех попыток система выдаёт сигнал блокировки, запрещая дальнейшие попытки включения и обеспечивая устойчивую изоляцию повреждённого участка.

Таким образом, логика управления реклоузером сочетает в себе эффективную защиту и интеллектуальный анализ, что позволяет одновременно обеспечить надёжность электроснабжения и минимизировать риски ложных срабатываний. Гибкость настроек и мощные функции обработки информации делают реклоузер важнейшим элементом автоматизации и самовосстановления распределительных сетей.

1.5 Выводы

В данном разделе рассмотрено значение секционирования воздушных распределительных линий. С учётом сложных условий эксплуатации и частых кратковременных повреждений, установка управляемых устройств секционирования позволяет эффективно изолировать повреждённые участки и быстро восстанавливать электроснабжение. Это повышает надёжность и эффективность работы сети. Примеры из Китая и России подтверждают важность автоматического секционирования для сокращения времени отключений.

В разделе также проанализирована эволюция оборудования для секционирования. В Китае под руководством Государственной электросетевой корпорации осуществлён переход от ручного управления к автоматическому повторному включению с формированием системы на базе вакуумных реклоузеров. В России, опираясь на технический опыт и децентрализованное управление, внедряются интеллектуальные опорные

реклоузеры для повышения эффективности изоляции повреждений. Несмотря на разные подходы, обе страны ориентированы на надёжность и модернизацию оборудования.

Затем рассмотрены преимущества современных реклоузеров по сравнению с традиционными устройствами секционирования. Реклоузеры объединяют функции обнаружения, управления и связи, поддерживают многократное включение, автоматическую блокировку и дистанционное управление, что упрощает автоматизацию сетей. Интеграция с технологией импульсного включения повышает точность и адаптивность при устранении повреждений.

Дана характеристика конструкции и принципа действия реклоузеров: типовой аппарат включает коммутационный блок, механизм и контроллер, осуществляющий отключение и повторное включение по заданной логике. Он поддерживает до трёх попыток включения, различные временные задержки, ведёт регистрацию событий и взаимодействует с удалёнными системами, что соответствует требованиям цифровой надёжной сети. Таким образом, развитие технологий секционирования и реклоузеров взаимосвязано: первое обеспечивает надёжность, второе — интеллектуальное управление. Их совместное применение формирует техническую основу для самовосстанавливающихся интеллектуальных распределительных сетей.

2 ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКЛОУЗЕРА

2.1 Последовательное применение реклоузеров в различных конфигурациях линий

В распределительных сетях существуют различные типы линий, и стратегии применения реклоузеров в зависимости от конфигурации этих линий имеют свои особенности. Типовые распределительные линии напряжением 10 кВ включают одиночные радиальные фидеры, резервные сети с двухсторонним питанием и соединённые участки, а также протяжённые фидеры.

В таких линиях реклоузеры могут использоваться в качестве секционных выключателей в координации с другими защитными устройствами (автоматическими выключателями, плавкими предохранителями, секционирующими устройствами и др.) для обеспечения точной изоляции повреждённых участков и быстрого восстановления электроснабжения на неповреждённых участках. Ниже представлены схемы размещения реклоузеров и логика их работы для различных типовых конфигураций распределительных сетей.

2.1.1 Вариант секционирования линий с односторонним питанием

Радиальные распределительные линии с односторонним питанием являются одной из наиболее распространённых конфигураций в распределительных сетях Китая, например, типичные фидеры напряжением 10 кВ. Такие линии питаются с одной стороны подстанции и не имеют резервного источника на конце. При возникновении повреждения необходимо своевременно выполнить секционирование вверх по течению от места неисправности, чтобы ограничить зону отключения. Применение реклоузеров в такой структуре имеет два ключевых аспекта: секционирование магистральной линии для локализации повреждений и координация с плавкими предохранителями на ответвлениях для обеспечения селективности отключений.

На рис. 2-1 представлена типовая структура радиальной сети с

односторонним питанием. Первый реклоузер (A1) размещается на выходе из подстанции и выполняет функцию автоматического выключателя фидера, предотвращая распространение аварии вверх по сети. Второй реклоузер (A2) устанавливается в среднем участке магистрали и делит её на несколько зон защиты. При повреждении одного участка реклоузер позволяет оперативно его изолировать и минимизировать масштаб отключения. Третий реклоузер (A3) монтируется на ответвлениях и служит для отсечения неисправностей на пользовательском уровне, не затрагивая магистральную линию.

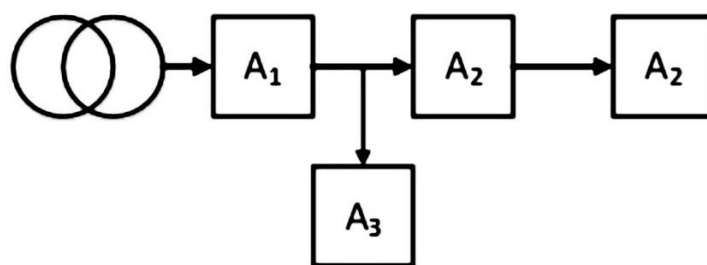


Рис. 2-1. Структура распределительной сети с односторонним питанием

При размещении нескольких реклоузеров вдоль линии учитываются принципы «баланса нагрузки» и «равномерного секционирования». Например, фидер средней длины можно разделить на два-три участка с равной нагрузкой или числом потребителей, что обеспечивает равномерную зону питания для каждого реклоузера. Практические данные показывают, что установка одного реклоузера на фидере позволяет сократить количество отключённых пользователей примерно на 50 %, а установка двух — разделить фидер на три зоны, значительно уменьшая масштаб аварий.

Для обеспечения селективности между реклоузерами и выключателем подстанции устанавливаются ступенчатые уставки защиты и временные задержки. Чем ближе реклоузер к месту повреждения, тем быстрее он должен сработать; чем ближе к источнику питания, тем больше временная задержка. Такая логика позволяет отключать только повреждённый участок, а в остальных зонах реклоузеры автоматически восстанавливают электроснабжение.

Координация реклоузера и предохранителя на ответвлениях играет

ключевую роль. Применяется принцип «координации предохранителя и реклоузера»: на ветвях монтируется предохранитель, а реклоузер магистрали выступает резервной защитой.

При коротком замыкании на ветви реклоузер выполняет быструю попытку автоматического повторного включения (обычно «одна быстрая»); если повреждение сохраняется, он задерживает следующее отключение, позволяя предохранителю перегореть и устранить повреждение («вторая медленная»). Это предотвращает срабатывание магистрального реклоузера и отключение всей линии. Стандартная схема — «одна быстрая + две медленные» (А-В-В) попытки, при которой реклоузер вначале пытается восстановить подачу, а при неудаче — допускает отключение ветви через предохранитель.

Такая стратегия достигает баланса между селективной защитой и надёжностью электроснабжения. При временном повреждении линия восстанавливается автоматически; при постоянном — локализуется только ветвь. Единственным недостатком является необходимость замены предохранителя вручную, что увеличивает время восстановления.

С развитием автоматизации распределения предохранители постепенно заменяются интеллектуальными устройствами, такими как TripSaver от Schneider Electric — однофазный реклоузер, устанавливаемый вместо предохранителя на опоре. Он способен автоматически восстанавливать подачу энергии после временных повреждений, сокращая отключения и исключая необходимость ручного обслуживания.

2.1.2 Вариант секционирования линий с резервным питанием

В распределительных сетях с двумя источниками питания или кольцевой структурой размещение реклоузеров и стратегия управления становятся более гибкими и сложными. Такие сети, как правило, получают питание от двух и более источников и формируют кольцевую или "рука об руку" структуру с помощью секционных выключателей. При возникновении неисправности на одном из фидеров, исправный источник питания может

автоматически обеспечить резервное электроснабжение пострадавшего участка через соединительную линию, реализуя стратегию самовосстановления с резервированием.

Как показано на рисунке 2-2, в типовой схеме двустороннего питания на выходе каждого распределительного устройства устанавливается реклоузер для защиты соответствующих фидеров. В точке соединения между двумя фидерами устанавливается постоянно разомкнутый реклоузер в качестве пункта сетевого резервирования, который служит переключателем на резервный источник. Кроме того, вдоль каждого фидера могут быть установлены дополнительные секционные реклоузеры в соответствии с принципами секционирования для более точного выявления и изоляции повреждений.

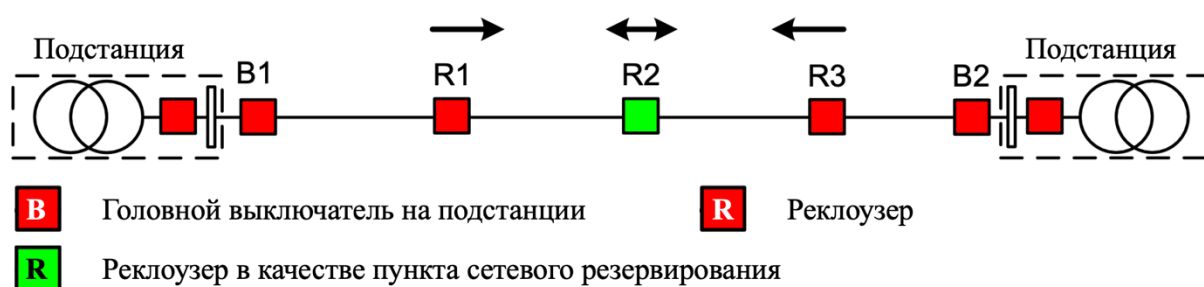


Рис. 2-2. Структура распределительной сети с двусторонним питанием и размещением реклоузеров

Когда на одном из фидеров происходит неисправность, реклоузеры по обе стороны от повреждённого участка автоматически отключаются и остаются в отключённом состоянии, изолируя повреждение. Затем сетевой реклоузер, обнаружив падение напряжения с одной стороны и наличие питания с другой, срабатывает с небольшой задержкой, обеспечивая питание для неповреждённых потребителей через резервный маршрут. Этот процесс занимает всего несколько секунд и не требует участия диспетчерского персонала, что соответствует концепции самовосстанавливающихся распределительных сетей. Ключевым моментом здесь является координация временных параметров срабатывания реклоузеров, чтобы избежать конфликтов питания и гарантировать стабильность сети [23].

В ряде современных городов южного Китая уже внедрены локальные системы самовосстановления с возможностью автономного определения и срабатывания. Эти системы используют встроенные функции обнаружения и управления реклоузеров, обеспечивая быструю изоляцию и восстановление питания за счёт обмена минимальными данными между соседними устройствами — всё это без участия центрального пункта управления. Весь процесс занимает миллисекунды и стал ключевым элементом повышения уровня автоматизации распределения.

При реализации резервного питания критически важно исключить параллельную работу источников и перегрузки. Обычно используется стратегия «сначала отключение, затем включение» — после отключения реклоузеров по обе стороны от повреждения следует задержка, затем сетевой реклоузер подключает резервное питание. Такие устройства оборудованы функцией контроля напряжения, позволяющей разрешать включение только при наличии напряжения на одной стороне и его отсутствии — на другой. В случае недостаточной мощности резервного источника предусмотрена функция отказа от включения. Все эти функции могут быть реализованы в контроллере реклоузера или через простую коммуникацию, без участия головного узла.

По сравнению с однонаправленными сетями, системы с резервированием и самовосстановлением значительно выигрывают по показателям надёжности. Во-первых, время отключения в неповреждённых участках сокращается до минимума. Во-вторых, большинство потребителей не ощущают перебоев, сталкиваясь лишь с кратковременным падением напряжения. Например, в одном из случаев в США после аварии на линии, вызванной падением столба, 86% потребителей восстановили питание за считанные секунды за счёт резервного питания от соседнего фидера. В другом случае, в одном из городов южного Китая, внедрение технологии самовосстановления позволило снизить индекс SAIDI более чем на 10%.

Эти результаты достигаются при увеличении инвестиций в систему —

дополнительное оборудование (сетевые реклоузеры, устройства связи и управления), а также более сложные схемы защиты. Однако в долгосрочной перспективе для городских сетей с высокими требованиями к надёжности и ключевых потребителей такие вложения оправданы: они существенно снижают потери от отключений и улучшают качество обслуживания, что выражается в сокращении компенсационных выплат и росте удовлетворённости клиентов [24].

2.1.3 Вариант секционирования с применением плавких предохранителей

Плавкие предохранители благодаря своей низкой стоимости и простой конструкции широко применяются в распределительных сетях на отходящих линиях и для защиты трансформаторов. В традиционных распределительных сетях предохранители, как правило, используются в качестве устройств защиты на конечных ветвях и взаимодействуют с вышестоящими реклоузерами или автоматическими выключателями, образуя схему «реклоузер – плавкий предохранитель» для ступенчатого отключения аварий. Принцип их согласованной работы (модель «одно быстрое и два медленных включения») был уже рассмотрен ранее. В данной секции дополнительно рассматриваются особенности применения стратегии секционирования с использованием предохранителей, включая вопросы селективности защиты и координации срабатывания.

Цель координации работы между предохранителем и реклоузером заключается в том, чтобы при гарантированной изоляции поврежденного участка минимизировать зону отключения, ограничив её только ответвлением. Для этого временная характеристика срабатывания предохранителя должна располагаться перед медленной характеристикой повторного включения реклоузера, то есть при постоянной (устойчивой) аварии предохранитель должен сработать быстрее, чем замедленное повторное включение реклоузера. Напротив, при кратковременных (неустойчивых) повреждениях быстрая характеристика срабатывания

реклоузера должна опережать минимальную характеристику плавкого предохранителя, чтобы успеть устранить повреждение до его сгорания. Типовая схема применения стратегии секционирования с предохранителями показана ниже на рисунке 2-3.

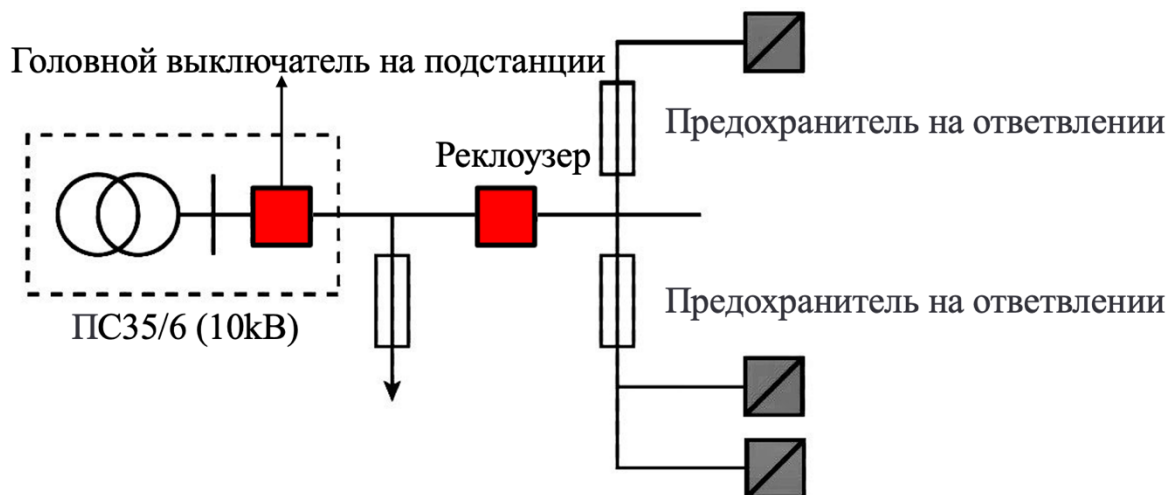


Рис. 2-3. Применение плавких предохранителей для секционирования распределительной сети

Стратегия секционирования с применением предохранителей особенно актуальна для сельских распределительных сетей и вторичных ответвлений. Её основными преимуществами являются низкие затраты, удобство модернизации и минимальное вмешательство в существующие линии. В типовых проектах основная магистраль разделяется при помощи автоматических выключателей или реклоузеров, тогда как ответвления защищаются плавкими предохранителями. При такой конфигурации повреждения магистрали изолируются реклоузерами, а повреждения на ответвлениях устраняются предохранителями – каждый элемент выполняет свою функцию [25].

Важно избегать ситуаций, когда предохранитель фактически становится основным защитным устройством, например, если ответвление не оснащено предохранителем и полагается на вышестоящий реклоузер, то его повреждение может привести к отключению всей магистрали, что противоречит требованиям селективности распределительной сети. В сетевом планировании необходимо обеспечивать наличие конечных плавких

предохранителей или секционализаторов на каждой ветви, чтобы реализовать локальное секционирование.

Для обеспечения баланса между надёжностью и экономической эффективностью на критичных ответвлениях может применяться двойная защита «реклоузер + плавкий предохранитель»: в начале ветви устанавливается малогабаритный реклоузер, выполняющий функции секционализатора, при этом предохранитель остаётся в качестве резервной защиты. В нормальных условиях реклоузер и предохранитель синхронно фиксируют повреждения, однако сам реклоузер не имеет дугогасительной способности и срабатывает только после отключения вышестоящего реклоузера, при этом размыкая цепь под ненапряжением для изоляции аварийного участка. Затем вышестоящий реклоузер подаёт питание повторно, и благодаря предварительному размыканию секционализатором, повреждённый участок оказывается отключённым от системы, а оставшиеся части сети продолжают получать питание.

Внедрение секционализаторов позволяет сократить количество срабатываний предохранителей, избежать их частой замены и обеспечить многоуровневую координацию защиты. Однако это также приводит к увеличению затрат и требований к техническому обслуживанию. Поэтому при реальном проектировании необходимо учитывать как критичность нагрузки, так и экономические возможности при принятии решения о включении секционализаторов в сеть.

2.1.4 Вариант секционирования для протяжённых линий с усиленной защитой

В сельских распределительных сетях Китая нередко применяются сверхдлинные фидеры, обслуживающие обширные территории с высокой вероятностью повреждений и значительными затратами времени на их осмотр. В таких условиях эффективное секционирование с использованием реклоузеров требует интеграции современных средств связи и технологий локализации неисправностей.

Для ограничения зоны отключения на подобных линиях применяется стратегия многоуровневого секционирования с установкой нескольких реклоузеров. Однако традиционная координация по временным уставкам ограничивает количество ступеней: при увеличении их числа значительно возрастает задержка срабатывания у устройств, расположенных ближе к источнику, что увеличивает общее время устранения аварии и может привести к нарушению селективности. Согласно исследованиям, на линии 25 кВ при стандартных уставках допустимо не более четырёх ступеней секционирования, тогда как усовершенствованные подходы позволяют увеличить это число до шести [26].

Для преодоления ограничений классических уставок всё чаще внедряются синхронные схемы управления с передачей управляющих сигналов между реклоузерами. Типовая реализация основана на высокоскоростной связи между смежными устройствами, обеспечивающей одновременное отключение повреждённого участка с обеих сторон без жёсткой иерархии уставок. В решении, разработанном компанией NARI, используется распределённое управление на базе GOOSE-сообщений: при аварии крайние реклоузеры отключаются синхронно за миллисекунды, основной выключатель подстанции не срабатывает, а питание остальной сети сохраняется.

Система в реальном времени определяет тип повреждения: при временных авариях запускается автоматическое повторное включение, при устойчивых — отключение сохраняется. После локализации неисправности осуществляется восстановление нормальной схемы электроснабжения. Благодаря локальному обмену данными между устройствами, без участия центральной станции, значительно повышаются скорость самовосстановления и общая надёжность. Такая архитектура имитирует свойства кольцевых сетей и особенно эффективна в условиях сверхдлинных распределительных линий.

В сетях, где отсутствует возможность внедрения высокоскоростной

связи, координация многоуровневых реклоузеров по-прежнему осуществляется на основе традиционных уставок. В подобных условиях можно повысить эффективность координации за счёт оптимизации настроек: увеличить чувствительность и быстродействие конечных реклоузеров, тогда как устройства, ближе расположенные к источнику, получают увеличенную задержку срабатывания. Распределение ступеней секционирования при этом должно учитывать частоту возникновения повреждений и нагрузку в соответствующих участках. Согласно литературным источникам, хорошей практикой является реализация стратегии бинарного деления: размещение реклоузеров на точках, делящих линию пополам по длине или по вероятности возникновения аварии. Это позволяет достичь разумного баланса между надёжностью и стоимостью [27].

Даже при оптимальной настройке временных уставок последовательное включение большого числа реклоузеров приводит к сужению зоны селективности и снижению эффективности. Поэтому для сверхдлинных линий необходимы дополнительные коммуникационные решения. В ряде сетей на участках секционирования устанавливаются индикаторы повреждений с беспроводными модулями. При аварии информация через GPRS передаётся на диспетчерский пункт, где оператор дистанционно отключает повреждённый сегмент. Несмотря на участие человека, среднее время локализации снижается до менее двух минут, что значительно ускоряет ремонт.

Более продвинутые системы интегрируются с автоматизированными платформами верхнего уровня. Они анализируют данные от реклоузеров и индикаторов повреждений (ток, напряжение) в реальном времени, автоматически определяют аварийный участок, изолируют его и восстанавливают электроснабжение.

Комплексный подход — многоуровневое секционирование, связь между реклоузерами и точное позиционирование аварий — считается наиболее эффективным для сверхдлинных линий. Он минимизирует зону отключения,

ускоряет изоляцию повреждений и переключение питания. Такие решения активно внедряются в рамках новой модернизации сельских распределительных сетей Китая, реализуемой компанией State Grid. Автоматические секционирующие устройства и реклоузеры с функцией самовосстановления позволяют сократить среднюю длительность отключений с нескольких часов до десятков минут, при этом надёжность приближается к уровню городских сетей.

2.2 Анализ применимости вариантов применения реклоузеров

В условиях разнообразия структуры нагрузки, плотности потребителей и требований к надёжности электроснабжения, различные схемы секционирования с применением реклоузеров и плавких предохранителей демонстрируют различную эффективность и экономическую целесообразность. В данном разделе рассмотрены четыре типовые стратегии секционирования, применяемые в распределительных сетях Китая, а также даны рекомендации по их применению в зависимости от эксплуатационных условий.

Данная схема применяется в зонах с низкой плотностью нагрузки и отсутствием резервного питания, например, в сельских распределительных сетях на отходящих линиях и в изолированных фидерах. Её преимуществами являются простота архитектуры и невысокая стоимость реализации: для обеспечения базовой изоляции повреждений достаточно сочетания реклоузеров и плавких предохранителей без необходимости в сложных коммуникационных решениях.

С точки зрения надёжности такая схема способна значительно сократить длительность отключения при устойчивых повреждениях, но из-за отсутствия резервного питания все потребители в момент аварии испытывают кратковременное отключение (при срабатывании главного выключателя). Таким образом, преимущественно улучшается показатель SAIDI (средняя продолжительность отключения), но не SAIFI (частота отключений). Для экономически менее развитых регионов, не

предъявляющих высоких требований к непрерывности электроснабжения, данная схема представляет собой разумный компромисс между надёжностью и затратами: при минимальных инвестициях достигается улучшение качества электроснабжения без значительного увеличения сложности обслуживания.

Эта стратегия применяется в сетях с высокой плотностью нагрузки и повышенными требованиями к надёжности, таких как городские кольцевые сети, промышленные парки, кабельные сети и др. Её основное преимущество заключается в возможности мгновенного восстановления электроснабжения в неповреждённых участках при аварии за счёт резервного питания, что делает воздействие отключения практически незаметным для конечного потребителя.

Кроме того, схема повышает гибкость управления сетью, позволяя, например, при плановых ремонтах вручную перераспределять нагрузку через секционные пункты. К недостаткам относятся высокие капитальные затраты и технологическая сложность: требуется строительство линий связи, установка дополнительных реклоузеров и внедрение систем связи и координации защиты.

Для вновь проектируемых городских сетей схема с двумя источниками и кольцевой структурой часто используется по умолчанию. Однако при модернизации существующих радиальных сетей в структуру «рука об руку» необходимо учитывать наличие физической возможности соединения между фидерами и ограничения по мощности трансфера. Если соседние фидеры существенно различаются по пропускной способности или отсутствует подходящий узел соединения, эффективность реализации схемы значительно снижается. Несмотря на высокие начальные инвестиции, схема обеспечивает значительное снижение потерь от отключений и повышение удовлетворённости потребителей, что делает её незаменимой в условиях городских распределительных сетей и для снабжения критически важных нагрузок.

Наиболее эффективна для распределительных сетей с развитой

разветвлённой структурой, особенно в пригородных районах. Реклоузеры в данной схеме размещаются на магистральных линиях, а плавкие предохранители — на конечных ответвлениях, что позволяет максимально использовать их преимущества: низкая стоимость, простота установки и высокая надёжность. Реклоузеры, в свою очередь, обеспечивают функции автоматического повторного включения и снижают количество срабатываний предохранителей.

Основным преимуществом является высокая экономичность: предохранители значительно дешевле реклоузеров, не требуют питания и технического обслуживания. Однако они не подлежат дистанционному управлению и не интегрируются в систему автоматизации, что затрудняет оперативное выявление и устранение повреждений. Чтобы устранить этот недостаток, некоторые предприятия начали использовать однофазные мини-реклоузеры (например, устройства типа TripSaver) в качестве замены предохранителей, позволяя реализовать функции АПВ и телеиндикации на конечных участках [28].

Тем не менее, высокая стоимость таких решений ограничивает их применение преимущественно критически важными участками. Таким образом, наиболее распространённой остаётся схема «магистраль — реклоузер, ответвления — предохранители», обеспечивающая надёжность при приемлемых затратах. Реклоузеры обеспечивают быстрое самовосстановление основной сети, а предохранители локализуют повреждения на периферии, чётко разделяя функциональные зоны. Схема подходит для распределительных сетей с большой площадью охвата и низкой плотностью потребителей.

Применяется в сельских распределительных сетях при длине фидеров более 20 км и значительной географической протяжённости. Цель схемы — максимально ограничить влияние повреждений в условиях наличия только одного источника питания. Основными мерами реализации являются: установка реклоузеров через регулярные интервалы, деление линии на

логические сегменты, установка индикаторов повреждений и коммуникационных терминалов, в ряде случаев — организация резервного питания от распределённых источников.

Преимущество — значительное сокращение зоны отключения: например, при оснащении 60-километровой линии четырьмя реклоузерами среднее количество отключённых потребителей при аварии снижается в пять раз. При этом применение коммуникаций позволяет ускорить процесс локализации повреждений, а в ряде проектов автоматизированное восстановление электроснабжения осуществляется в течение нескольких минут, что более чем на 90% сокращает время по сравнению с ручным осмотром линии.

Недостатки включают увеличение затрат на оборудование и обслуживание, необходимость точной настройки защитных уставок во избежание сбоев в координации, а также трудности с обеспечением надёжной связи на больших расстояниях, особенно в зонах со слабым сигналом. Поэтому экономическая эффективность применения такой схемы должна подтверждаться технико-экономическим обоснованием: с использованием моделей оценки надёжности необходимо рассчитывать снижение SAIDI при добавлении каждой единицы оборудования, а также оценивать окупаемость инвестиций на основе анализа стоимости ущерба от отключений.

На практике при модернизации сельских сетей доказано, что установка дополнительных реклоузеров даёт положительный эффект, однако конкретное количество и схема размещения должны разрабатываться с учётом особенностей каждой линии. Для участков с малым числом потребителей может быть достаточно предохранителя, в то время как для длинных фидеров, питающих несколько населённых пунктов, требуется организация многоуровневого секционирования с элементами самовосстановления на базе связи [29].

Каждая из представленных схем имеет чётко очерченные границы применимости. При планировании распределительной сети необходимо комплексно учитывать требования к надёжности, топологию сети и

экономические ограничения. Согласно современным исследованиям, целесообразно определять выбор стратегии секционирования на основе базового уровня надёжности линии и структуры нагрузки. При высокой частоте аварий и низкой надёжности приоритет отдается размещению реклоузеров и внедрению распределённой системы самовосстановления. Если же линия стабильна, а потребители не чувствительны к коротким отключениям, то предпочтение отдается простой и дешёвой защите на базе плавких предохранителей.

2.3 Сравнение характеристик и эффективности вариантов применения реклоузеров

Внедрение реклоузеров оказывает особенно заметное влияние на показатель средней продолжительности отключения электроснабжения (SAIDI). Как показано ранее, установка одного реклоузера на типовой радиальной линии позволяет сократить годовой показатель SAIDI для потребителей на 15–20 %. В случае объединения соседних фидеров с помощью реклоузеров и реализации схемы самовосстановления, повышение надёжности может достигать 30–40 %.

Практические примеры подтверждают эффективность этих решений. Так, в одной из южных энергосетевых компаний Китая в результате внедрения автоматизации фидеров среднее время восстановления электроснабжения сократилось с более чем одного часа до менее чем пяти минут. В США компания Mississippi Power установила более 300 реклоузеров, сформировав сеть с функцией самовосстановления. За пять лет это позволило избежать более 3 257 861 минут отключения, что эквивалентно увеличению годовой надёжности на около 5 %. Кроме того, в упомянутом выше случае дорожно-транспортного происшествия система самовосстановления обеспечила восстановление электроснабжения в течение нескольких секунд для 86 % потребителей [30].

Эти данные наглядно демонстрируют, что по мере развития стратегий секционирования от базовых схем с реклоузерами до коммуникационно-

ориентированных самовосстанавливающихся решений достигается ступенчатый прирост надёжности: на первом этапе снижается длительность отключения при устойчивых повреждениях (реклоузеры ограничивают время отключения), затем уменьшается число кратковременных отключений (связанные фидеры обеспечивают быстрое переключение питания), и, наконец, на продвинутом уровне самовосстановления возможно полное исключение отключений в неповреждённых зонах (синхронная изоляция повреждённого участка без падения напряжения в остальной части сети).

Следует, однако, учитывать и эффект убывающей предельной полезности: наибольший прирост достигается при переходе от 0 до 1 реклоузера, тогда как добавление третьего или четвёртого устройства приводит к уменьшению удельной эффективности. Поэтому оптимальный проект должен учитывать компромисс между целевыми показателями надёжности и инвестиционными затратами.

Интеграция интеллектуальных устройств, таких как реклоузеры, также изменяет подходы к эксплуатации распределительных сетей. С одной стороны, автоматические выключатели требуют регулярного технического обслуживания и обновления программного обеспечения, что увеличивает нагрузку на службы эксплуатации. С другой стороны, они обеспечивают функции телеизмерения и телеуправления, которые существенно облегчают мониторинг состояния сети и позволяют своевременно выявлять неисправности.

Практика показывает, что после ввода в эксплуатацию систем автоматизации распределения значительно повышается эффективность реагирования на аварии и проведения ремонтных работ. Так, согласно данным Гуанчжоуского управления электроснабжения, внедрение распределённой автоматизации позволило сократить среднее время определения места повреждения с десятков минут до менее двух минут, а время реагирования аварийной бригады — с 20 минут до менее чем 5 минут.

Кроме того, функции регистрации событий, доступные в современных

реклоузерах, позволяют фиксировать лог-файлы и осциллограммы тока, которые впоследствии используются для анализа повреждений и совершенствования уставок защит, а также для оптимизации технического обслуживания оборудования. Таким образом, дополнительные затраты на обслуживание в течение жизненного цикла устройств с лихвой компенсируются за счёт снижения затрат на устранение аварий и повышения общей эффективности эксплуатации.

Различные схемы секционирования имеют свои преимущества и ограничения. В практическом применении выбор оптимального варианта должен осуществляться с учётом степени критичности электроснабжения, конфигурации сети и доступного бюджета. Только при учёте всех этих факторов можно обеспечить достижение заданного уровня надёжности при максимально эффективном использовании инвестиционных ресурсов.

2.4 Выводы

В данном разделе рассмотрены типовые архитектуры применения реклоузеров в распределительных сетях, включая схемы с односторонним питанием, двусторонними связями, самовосстановлением и координацией с плавкими предохранителями. На основе анализа практических примеров и структурных схем показано, как размещение реклоузеров в различных условиях способствует эффективной изоляции повреждений и восстановлению электроснабжения. Особенно важно правильное сочетание реклоузеров и предохранителей в сельских сетях с длинными фидерами и большим количеством ответвлений.

Затем проведён сравнительный анализ четырёх типовых стратегий секционирования: одностороннее радиальное питание, самовосстановление через двустороннюю связь, схема с реклоузерами на магистрали и предохранителями на ответвлениях, а также поэтапное секционирование длинных линий. Показано, что каждая стратегия имеет свои преимущества и ограничения в зависимости от топологии сети, уровня надёжности и возможностей инвестиций. Например, для городских сетей с высокими

требованиями целесообразно применение кольцевой схемы с резервным питанием, тогда как в сельских районах предпочтение отдаётся экономичным вариантам с координацией между реклоузерами и предохранителями.

В части оценки эффективности рассмотрены такие параметры, как снижение показателя SAIDI, удобство технического обслуживания, степень автоматизации и соотношение затрат и надёжности. Отмечено, что с ростом количества реклоузеров эффективность повышается, но прирост надёжности имеет убывающий характер, что требует оптимального проектирования. В условиях сверхдлинных фидеров доказана эффективность применения многоуровневого секционирования с коммуникационной поддержкой, что позволяет значительно сократить время устранения аварий.

Таким образом, в разделе обоснованы условия применения различных стратегий секционирования, подчеркнута необходимость адаптивного проектирования с учётом особенностей нагрузки, надёжности и инфраструктуры связи. Оптимальное размещение реклоузеров является ключевым элементом повышения надёжности и создания интеллектуальной распределительной сети. В следующем разделе будут рассмотрены методы оптимизации, основанные на интеграции реклоузеров с современными средствами мониторинга, связи и интеллектуального управления.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ РЕКЛОУЗЕРОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

3.1 Современное состояние и вызовы оптимизации распределительных сетей в Китае

В последние годы, благодаря масштабным инвестициям со стороны Государственной электросетевой корпорации Китая (State Grid) и Южной электросетевой корпорации (China Southern Power Grid), уровень автоматизации распределительных сетей в Китае значительно возрос. По статистическим данным, охват систем автоматизации распределения в стране превысил 90%. Например, в провинции Хайнань к началу 2025 года было введено в эксплуатацию более 1200 терминалов автоматизации распределительных сетей, обеспечив эффективное покрытие на уровне 97,11% и охват самовосстановления на уровне 81,56%.

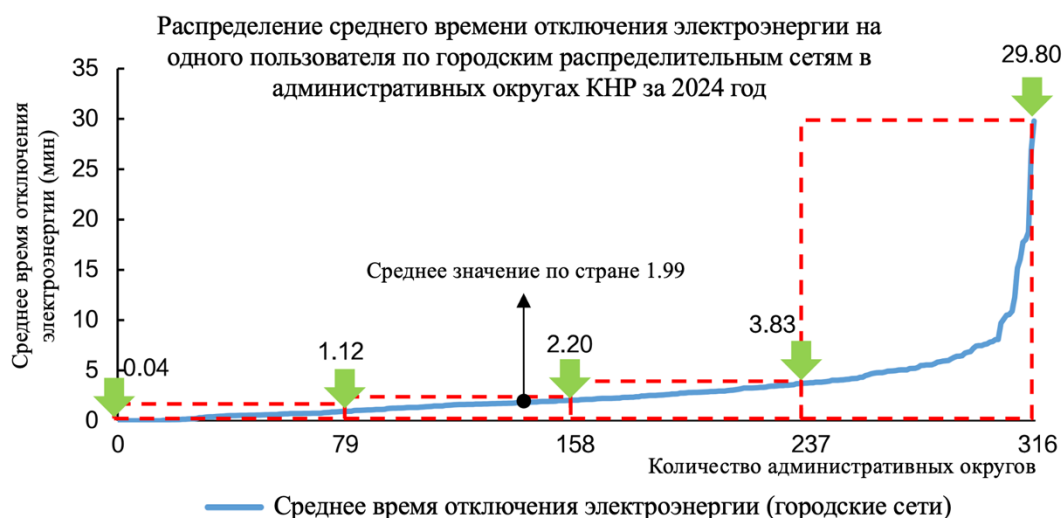


Рис. 3-1. Распределение среднего времени отключения электроэнергии на одного пользователя по городским распределительным сетям в административных округах КНР за 2024 год

Это позволило существенно сократить время на выявление и устранение повреждений. Указанные данные свидетельствуют о значительном прогрессе в области мониторинга состояния и автоматизированного управления в распределительных сетях Китая, что создало прочную основу для их дальнейшей оптимизации. Тем не менее, за высокой степенью охвата

скрываются актуальные проблемы и вызовы, требующие углублённого анализа. Как показано на рисунках 3-1 и 3-2, распределение среднего времени отключения электроснабжения среди сельских и городских пользователей Китая в 2024 году демонстрирует, что в городах этот показатель составляет лишь 26,7% от соответствующего значения в сельской местности. Данный разрыв напрямую связан с неравномерным покрытием систем мониторинга состояния распределительной сети. Источник данных — Ежегодный доклад по надёжности электроснабжения в Китае за 2024 год, опубликованный Государственным энергетическим управлением [31].

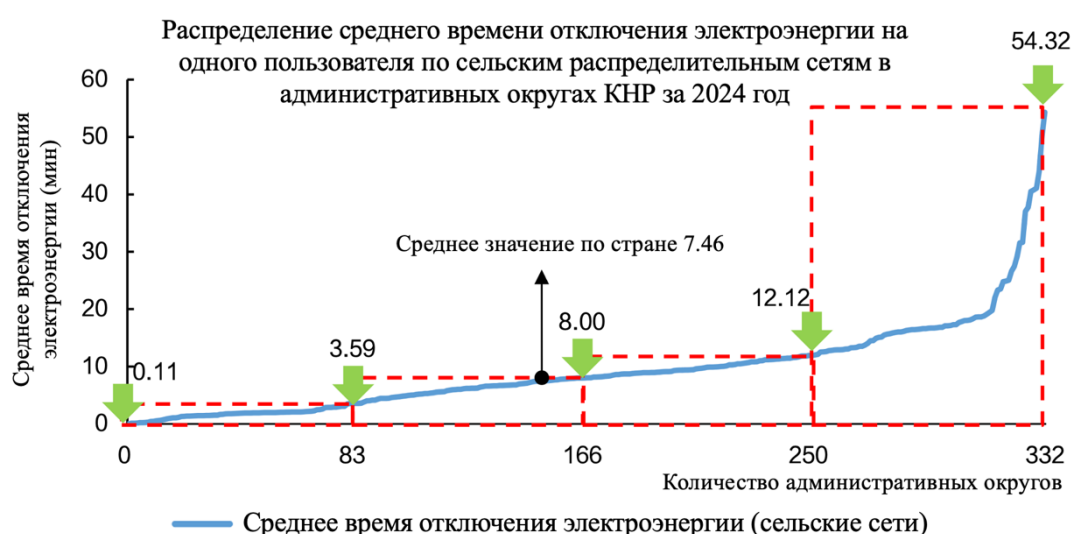


Рис. 3-2. Распределение среднего времени отключения электроэнергии на одного пользователя по сельским распределительным сетям в административных округах КНР за 2024 год

В настоящее время в Китае сформирована система мониторинга состояния, охватывающая все уровни магистральных и распределительных сетей. В её состав входят интегрированные автоматизированные системы подстанций, удалённые терминалы фидерных линий (FTU), а также устройства мониторинга распределительных трансформаторов, что обеспечивает онлайн-сбор параметров работы, таких как напряжение, ток и состояние коммутационного оборудования. В некоторых регионах дополнительно установлены указатели повреждений и интеллектуальные счётчики, позволяющие расширить мониторинг на стороне низкого

напряжения.

Тем не менее, как показывают показатели надёжности, приведённые в таблице 3-1, распределительная сеть продолжает испытывать проблему неравномерного охвата мониторингом. В городских сетях основная магистраль хорошо оснащена измерительным оборудованием, тогда как в сельской и удалённой местности уровень охвата терминалами мониторинга остаётся недостаточным. Кроме того, информация о состоянии низковольтных сетей до сих пор представлена неполно, что ограничивает возможности всестороннего ситуационного анализа распределительной сети. В результате возникает трудность с оперативным получением данных о состоянии на концах фидеров и ответвлениях кабельных линий, что становится одним из факторов, сдерживающих дальнейшую точную оптимизацию сетевого управления.

Таблица 3-1 Показатели надёжности электроснабжения потребителей в Китае за 2024 год

Показатель надёжности	Общий охват	Городские сети	Сельские сети	Городские поселения	Сельская местность
ASAI (%)	99.924	99.977	99.915	99.957	99.905
SAIDI (h)	6.71	1.99	7.46	3.79	8.33
SAIFI (раз)	2.12	0.65	2.36	1.22	2.63
CAIDI (ч)	4.17	1.24	4.64	2.29	5.19

В настоящее время в Китае уже сформирована система мониторинга состояния, охватывающая все уровни магистральных и распределительных сетей, включая интегрированные автоматизированные системы подстанций, удалённые терминалы фидеров (FTU) и устройства мониторинга распределительных трансформаторов. Эти стационарные устройства обеспечивают онлайн-сбор параметров работы распределительной сети, таких как напряжение, ток и состояние выключателей. В ряде регионов дополнительно внедрены индикаторы повреждений и интеллектуальные

счётчики, расширяющие сбор данных на стороне низкого напряжения. Однако, как показывает Таблица 3-1, несмотря на достигнутый уровень развития, система мониторинга распределительных сетей всё ещё характеризуется неравномерным покрытием: в то время как городские магистральные линии обеспечены мониторингом в достаточной степени, сельские и удалённые участки оснащены терминалами недостаточно, а состояние низковольтной части сети остаётся неполноценным. Это ограничивает возможности всестороннего ситуационного анализа сети и затрудняет оперативное получение данных с ответвлений и кабельных участков, что становится одним из факторов, сдерживающих точечную оптимизацию [32].

Большинство установленных устройств мониторинга передают данные в диспетчерский центр распределения с использованием оптоволоконных каналов, микроволновой связи или публичных беспроводных сетей, обеспечивая удалённый доступ и управление. При традиционных технологиях связи обновление данных на терминалах и их оперативность ограничиваются пропускной способностью и задержками: устаревшие RTU передают информацию с периодичностью в секунды или даже минуты, что не удовлетворяет требованиям быстродействующей защиты и самовосстановления. В последние годы в распределительные сети начали внедряться современные сотовые технологии, такие как 4G/5G. В некоторых регионах создаются специализированные 5G-сети для подключения реклоузеров и секционирующих устройств, что позволяет значительно сократить задержки передачи и удовлетворить более жёсткие требования по времени отклика. Однако при массовом внедрении возникают сложности: 5G-сигналы в высокочастотном диапазоне имеют ограниченный радиус действия, строительство базовых станций требует высоких затрат, а большое количество распределённых терминалов создаёт нагрузку на устойчивость связи при массовом параллельном доступе. Таким образом, в целом можно отметить, что технологии удалённой связи в распределительных сетях

эволюционируют от проводной оптики к беспроводным широкополосным сетям, но для полного покрытия потребуется время, и потенциал по улучшению надёжности и оперативности связи остаётся значительным. На основе совершенствующихся каналов мониторинга в системе управления распределением (DMS) и системе управления энергией (EMS) всё активнее применяются алгоритмы обработки данных.

Среди типичных функций – оценка состояния сети, определение повреждённых участков и восстановление электроснабжения (FLIR), оптимизация потокораспределения и расчёт потерь. Эти функции изначально реализуются на базе физических моделей и правил – например, с использованием топологии сети и состояния коммутационных аппаратов. Однако с ростом объёма данных, поступающих от оборудования и потребителей, в управление распределительными сетями внедряются интеллектуальные алгоритмы на основе данных. В частности, в литературе представлена активная стратегия защиты на базе межисточникового обмена данными, в которой используются обученные модели, объединяющие оперативные и исторические данные для повышения точности выявления повреждений и определения зоны отключения. Кроме того, такие методы, как градиентный бустинг (GBDT) и глубокое обучение, демонстрируют высокую эффективность при решении задач диагностики и определения топологии сети, превосходя традиционные методы по адаптивности и обучаемости. Таким образом, современная оптимизация распределительных сетей развивается от простой регламентированной логики к модели с двойным драйвом: физическая модель + данные. Тем не менее, для практического применения интеллектуальных алгоритмов остаются нерешёнными задачи обеспечения качества данных и соблюдения требований по времени отклика.

Несмотря на постоянный рост уровня автоматизации и интеллектуализации, в распределительных сетях Китая сохраняются узкие места, препятствующие дальнейшей оптимизации. Во-первых, остаются ограничения в возможностях самовосстановления. Хотя часть сетей уже

поддерживает автоматическое отключение повреждённого участка и восстановление питания, время выполнения таких операций часто составляет от нескольких секунд до десятков секунд. В сельских и периферийных участках по-прежнему требуется вмешательство персонала, что делает отключения заметными для потребителей. Достижение «самовосстановления в течение миллисекунд» остаётся серьёзной технической задачей. Во-вторых, усложняется координация защит. При широком внедрении распределённой генерации традиционные схемы реклоузеров и выключателей сталкиваются с трудностями настройки: двусторонние потоки мощности снижают чувствительность и селективность защит. В ряде публикаций указывается, что при использовании гибких устройств, таких как SOP, односторонние источники превращаются в двусторонние, и при несовпадении фаз напряжения возникает ток ударного включения, что создаёт угрозу для сети. В-третьих, имеются ограничения в гибкости режимов управления. Хотя приоритет по-прежнему отдается надёжности и снижению потерь, вопросам качества электроэнергии (волновые колебания, гармоники) и гибкости реагирования на колебания нагрузок уделяется недостаточное внимание. Учитывая рост индивидуальных требований к энергоснабжению, традиционные стратегии включения реклоузеров становятся недостаточно адаптивными и требуют замены на более интеллектуальные алгоритмы. В-четвёртых, отсутствует зрелая система стандартов и недостаточна интеграция новых технологий: IoT, датчиков нового поколения, edge computing. Их полноценное внедрение и стандартизация находятся на этапе изучения. Все эти проблемы указывают на необходимость внедрения инновационных стратегий оптимизации управления распределительными сетями, в частности, с акцентом на интеллектуальную коммуникацию и алгоритмы на базе данных для оптимизации управления реклоузерами [33].

3.2 Стратегии оптимизации работы реклоузеров на основе интеллектуальных коммуникаций и обработки данных

С учётом вышеуказанных проблем, связанных с ограниченной

оперативностью и недостаточной интеллектуализацией управления в распределительных сетях, в настоящем исследовании предложены инновационные стратегии оптимизации работы реклоузеров на основе современных коммуникационных технологий и алгоритмов, управляемых данными. Во-первых, использование высокоскоростных технологий связи нового поколения обеспечивает быструю координацию защитных устройств и функций самовосстановления. Во-вторых, внедрение методов, основанных на данных, позволяет повысить интеллектуальный уровень принятия решений при управлении реклоузерами. В-третьих, оценивается потенциал интеграции технологий гибких «мягких» выключателей (soft switching) с вышеуказанными подходами.

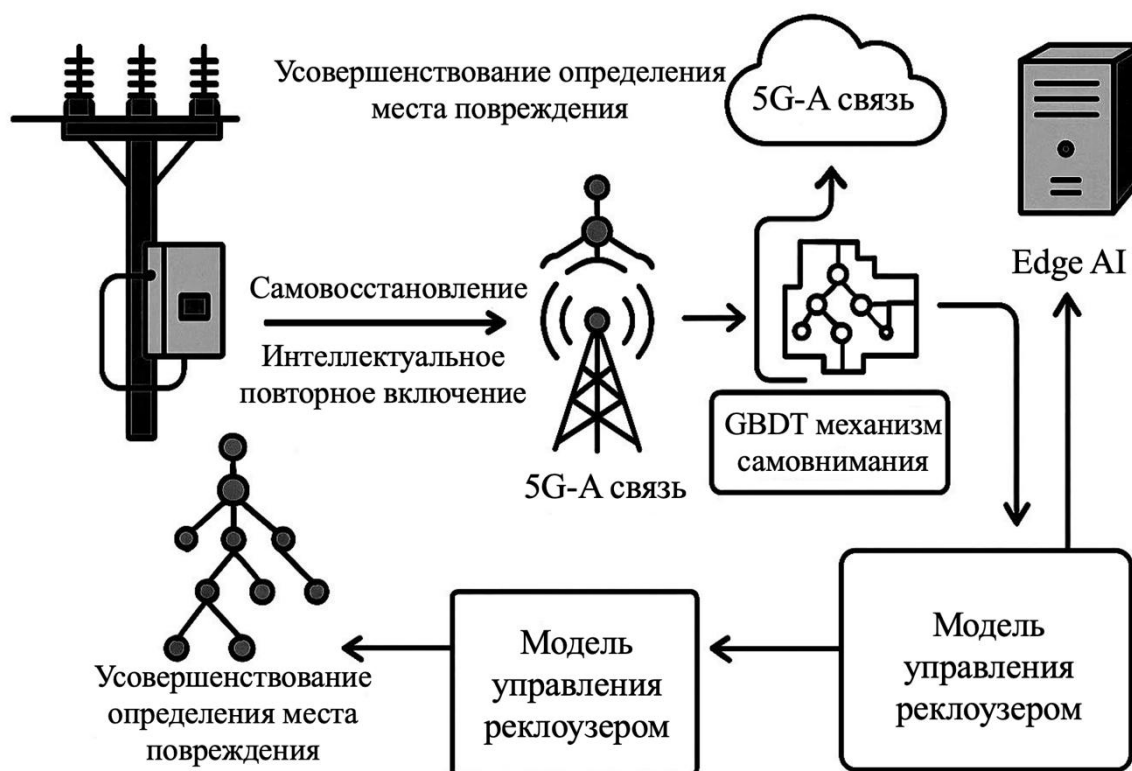


Рис. 3-3. Структурная схема технологии быстродействующей защиты и самовосстановления распределительной сети на основе связи 5G-A и периферийного ИИ

Комплексное исследование этих направлений направлено на существенное повышение скорости реагирования при авариях и общей надёжности электроснабжения в распределительных сетях. В последующих

подразделах рассматриваются принципы реализации и технические особенности каждой из предложенных стратегий.

3.2.1 Технологическая схема быстросействующей защиты и самовосстановления

Связь 5G, как технология пятого поколения мобильной связи, обладает такими характеристиками, как высокая пропускная способность, низкая задержка и массовое подключение устройств, что предоставляет принципиально новые возможности для реализации защиты и самовосстановления в распределительных сетях. В сравнении с традиционными проводными сетями или беспроводной связью 4G, технология срезов сети (network slicing) и периферийных вычислений (edge computing) в рамках 5G позволяет гарантировать выделенную пропускную способность и задержку от конца до конца на уровне миллисекунд для энергетических приложений. Это делает возможным сверхбыстрое обнаружение повреждений, передачу управляющих сигналов и выполнение команд управления в распределительной сети.

Основная идея схемы быстросействующей защиты и самовосстановления на основе 5G-связи заключается в следующем: при возникновении повреждения на распределительной линии, с помощью высокоскоростной и надёжной передачи данных по 5G-сети в течение менее чем 100 миллисекунд осуществляется определение места повреждения, согласованное отключение соответствующих выключателей (включая реклоузеры) и восстановление электроснабжения в неповреждённой части сети. Это позволяет сократить время отключения для потребителей до миллисекундного уровня и реализовать так называемую «нулевую восприимчивость к отказам».

Таким образом, использование связи 5G-A в распределительных сетях обеспечивает не только высокоскоростную передачу данных, но и возможность реализации быстрой и координированной реакции на аварии. На рисунке 3-4 представлена функциональная схема работы системы

самовосстановления, в которой отражены основные этапы: от обнаружения повреждения, передачи данных через сеть 5G, интеллектуального анализа на основе моделей управления до формирования управляющих команд и выполнения повторного включения с последующим восстановлением электроснабжения.

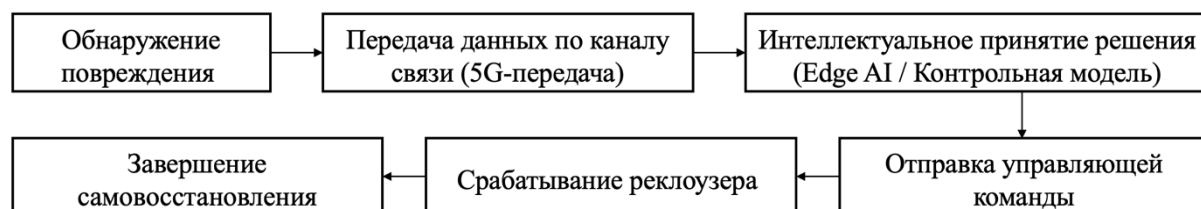


Рис. 3-4. Логика работы самовосстановления на основе 5G

В данной схеме в архитектуру распределительной сети внедряется высокоскоростная сеть связи (5G-частная сеть или сетевая нарезка), соединяющая ключевые элементы оборудования, включая фидерные реклоузеры, секционирующие устройства, устройства мониторинга распределительных трансформаторов и главный диспетчерский центр. Формируется иерархическая распределённая система управления самовосстановлением: на уровне подстанции размещается центральный контроллер самовосстановления, ответственный за сбор информации о повреждениях и принятие глобальных решений, а на уровне поля — вычислительные модули с функцией граничных вычислений, установленные на реклоузерах и других коммутирующих устройствах, способные локально выявлять повреждения и напрямую взаимодействовать с соседними устройствами [34].

После возникновения повреждения, граничный терминал, зафиксировав аномальные токи или напряжения, передаёт аварийный сигнал через 5G-сеть на главный пункт управления с задержкой в миллисекунды и одновременно рассылает сообщение соседним устройствам. Центральный контроллер самовосстановления на основе полученной информации оперативно определяет участок повреждения и формирует команду на отключение. В то же время реклоузеры в неповреждённых соседних зонах, получив граничный

сигнал, выполняют мгновенное отключение до получения команды от центрального пункта, тем самым изолируя участок повреждения и предотвращая его дальнейшее распространение.

Затем главный пункт управления, проанализировав топологию сети, вычисляет оптимальный маршрут резервного питания и направляет команду на включение секционирующих устройств в неповреждённой части сети для восстановления электроснабжения. Благодаря низкой задержке и высокой надёжности 5G-связи, защитные и самовосстанавливающие действия выполняются практически одновременно и параллельно, что обеспечивает быструю изоляцию повреждения и перераспределение нагрузки.



Рис. 3-4. Блок-схема быстрой защиты и самовосстановления распределительной сети на основе связи 5G

Для полноценной реализации потенциала 5G в системах самовосстановления распределительных сетей в предлагаемой схеме применяются несколько ключевых технологий. Одной из них является продольная дифференциальная защита, адаптированная из магистральных сетей в распределительные благодаря высокой надёжности и низкой задержке передачи данных через 5G. Как показано на рисунке 3.5, терминалы на реклоузерах в режиме реального времени обмениваются фазорами токов, что позволяет реализовать продольную дифференциальную защиту на фидерах и

выполнять определение аварий в пределах участка за миллисекунды — это является основой для быстрой изоляции повреждений.

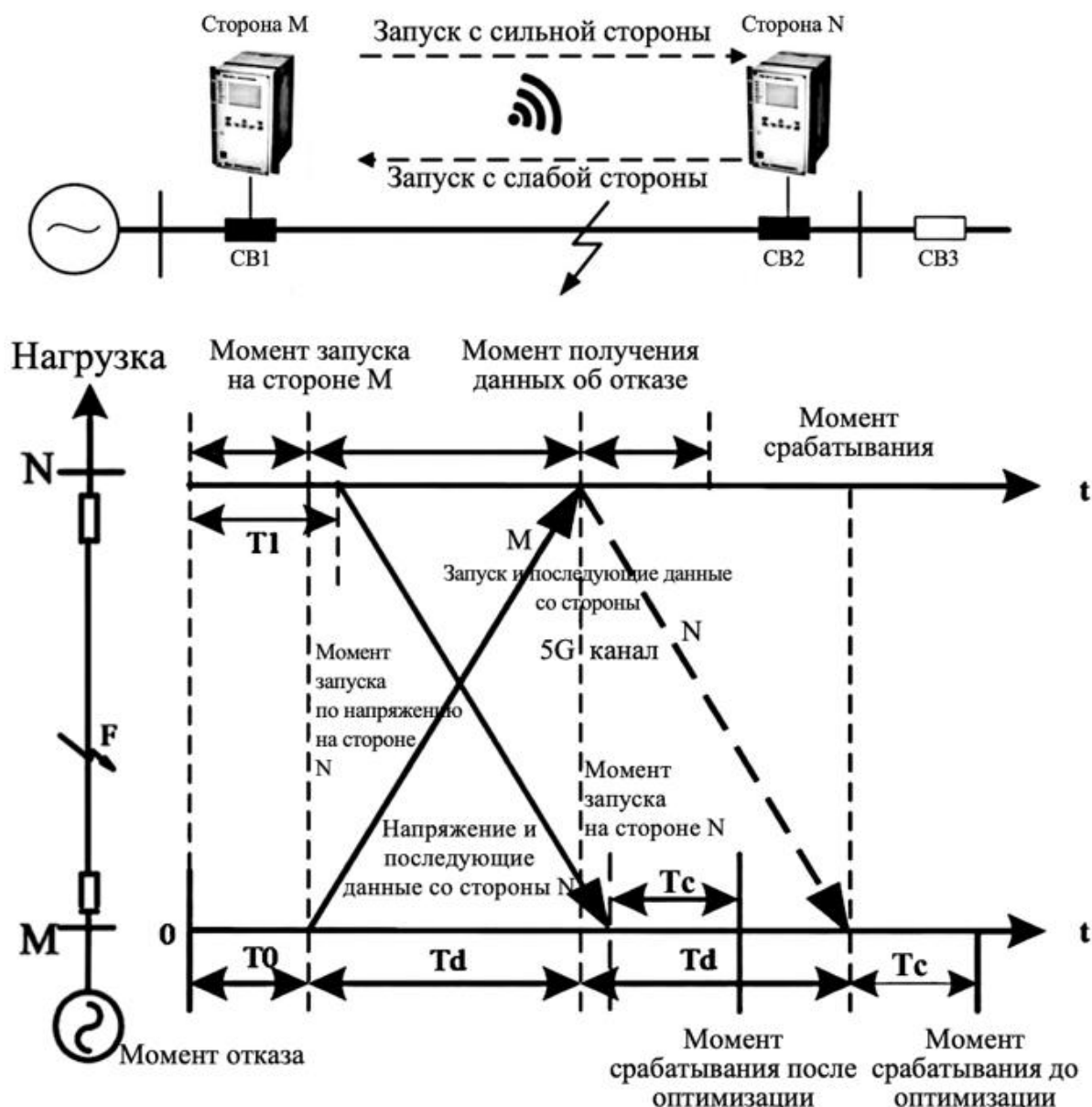


Рис. 3-5. Схема быстрого запуска дифференциальной защиты на слабопитаемой стороне, критерии и эффект применения

Адаптивная стратегия повторного включения, опирающаяся на возможности 5G-связи, позволяет диспетчерскому центру получать информацию о повреждениях и состоянии коммутационных аппаратов по каждому участку, реализуя согласованное управление несколькими реклоузерами. В случае аварии на одном из участков, вышестоящий реклоузер немедленно отключается, а соседний секционный выключатель по команде с диспетчерского центра или по заранее заданной логике оперативно

изолирует повреждённый участок. При кратковременных повреждениях, после подтверждения исчезновения неисправности, диспетчер отдаёт команду на повторное включение, и электроснабжение восстанавливается. В случае устойчивой аварии участок остаётся отключённым, и формируется команда на проведение ремонтных работ [35].

Распределённая самовосстанавливающаяся логика и топология связи. Для предотвращения воздействия одиночного отказа в канале связи на работу защит, в схеме предусмотрена резервная точка-точка связь между терминалами на краевых устройствах. При сбое основного соединения с диспетчерским центром через 5G, реклоузеры и соседние выключатели могут обмениваться данными напрямую по принципу «рука об руку», осуществляя локальную изоляцию повреждений. Такая многозвенная структура связи обеспечивает высокую устойчивость системы самовосстановления (самоисцеления). Таким образом, внедрение технологий защиты и самовосстановления с поддержкой 5G позволяет осуществить переход от секундного к сотням миллисекунд времени реакции на неисправность.

Эффективность данной схемы подтверждена моделированием и пилотными проектами на реальных объектах распределительной сети. Например, на одной из 10 кВ воздушных линий в городе Чэнду система самовосстановления на базе 5G обеспечила изоляцию повреждений за 165 мс и полное восстановление питания за 872 мс, что соответствует целевому показателю «самовосстановление за секунду». В другом пилотном проекте в Шанхае показано, что с использованием технологии автоматизации фидеров (FA) и связи 5G, время изоляции повреждений в кольцевой сети сокращено до миллисекундного уровня, а восстановление питания осуществлено менее чем за 5 секунд, обеспечивая эффект «нулевого восприятия» отключения потребителями.

Эти примеры убедительно демонстрируют, что интеграция 5G-связи с технологиями самовосстановления значительно повышает скорость реагирования распределительной сети на аварии и надёжность

электроснабжения. Ожидается, что по мере развития энергетических частных 5G-сетей и массового внедрения коммутационного оборудования, решения на основе 5G будут широко использоваться в распределительных сетях Китая, обеспечивая прочную основу для формирования новой архитектуры самовосстанавливающихся сетей.

3.2.2 Оптимизация алгоритма управления реклоузером с использованием методов, основанных на данных

Высокоскоростная связь решает задачу «быстроты» реакции системы, тогда как интеллектуальные алгоритмы на основе данных фокусируются на «точности» — то есть на повышении достоверности обнаружения неисправностей и оптимизации управления реклоузерами. Традиционные стратегии управления реклоузерами основываются, как правило, на фиксированных защитных уставках и простых временных логиках, не обладая адаптивностью к типу повреждения или изменениям состояния системы. Например, в большинстве случаев реклоузеры используют предустановленное количество повторных включений и фиксированные интервалы времени, не различая, носит ли повреждение временный или постоянный характер. Это может привести к ненужным попыткам включения или неудачным самовосстановлениям.

Методы, основанные на данных, позволяют, анализируя большие массивы информации, собранной в процессе работы сети, в реальном времени определять характеристики повреждения, прогнозировать его природу и на этой основе оптимизировать стратегию управления реклоузером. Ниже представлены основные принципы и реализуемые технологии стратегии управления, основанной на данных.

Основная идея стратегии управления, основанной на данных: Использование высокочастотных данных о состоянии, таких как напряжение и ток, собираемых посредством Интернета вещей в распределительных сетях, а также архивных записей повреждений, для обучения интеллектуальных моделей, способных автоматически обнаруживать и классифицировать

неисправности. Как только на фидере возникает неисправность, обученная модель определяет факт её возникновения, её тип (временная или устойчивая) и примерную зону. На этой основе реклоузер может принимать адаптивные решения: при временных повреждениях — немедленно восстановить подачу питания, при устойчивых — избежать слепых попыток включения и сразу изолировать повреждённый участок. По сравнению с фиксированными стратегиями, управление на базе данных отличается предсказуемостью и адаптивностью, позволяет сократить количество ошибочных включений и минимизировать продолжительность отключений.

Реализация алгоритмов и проектирование моделей: Обнаружение повреждений на основе данных, как правило, осуществляется с использованием методов машинного или глубокого обучения. В работе предложена иерархическая архитектура детекции, при которой терминалы на краю сети используют модель градиентного бустинга (GBDT) с входными параметрами в виде трёхфазных токов и напряжений для предварительной оценки наличия повреждения; в то же время центральный пункт управления анализирует данные от нескольких терминалов, используя модель глубокого обучения с многоголовым механизмом самовнимания (Multi-Head Attention) для точной классификации и локализации неисправности [36].

Подобная архитектура взаимодействия периферийного уровня и центрального узла позволяет достичь баланса между скоростью и точностью диагностики. В частности, модель GBDT реализуется путём поэтапного построения и суммирования решений набора деревьев решений, что позволяет эффективно аппроксимировать сложные нелинейные зависимости. Основным алгоритм GBDT включает следующие этапы обучения:

Задан обучающий набор данных:

$$T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}, \quad (1)$$

Где $x \in X \subseteq R$, X — пространство признаков; $y \in Y \subseteq R$, Y — множество меток, N — количество образцов. В задаче обнаружения повреждений в распределительной сети, X представляет собой набор входных признаков

сети, метка 0 означает отсутствие повреждения, метка 1 — наличие повреждения.

Сначала необходимо выполнить инициализацию, как показано в формуле (2):

$$F_0(x) = \arg \min_c \sum_{i=1}^N L(y_i, c), \quad (2)$$

Где $L(y_i, c)$ — функция потерь, а c — константа, минимизирующая значение функции потерь.

Затем для каждого образца в дереве решений вычисляется остаток. Полученные остаточные значения используются в качестве новых данных для обучения следующего дерева. После обновления параметров формируется новое дерево решений. Представление m -го дерева решений выражается следующим образом:

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \sum_{j=1}^J c_{mj} I(x \in R_{mj}), \quad (3)$$

Где $j=1, 2, \dots, J$ — количество листовых узлов в m -ом дереве решений; R_{mj} — область j -го листа дерева; c_{mj} — наилучшее значение прогноза в пределах области R_{mj} ; I — индикаторная функция.

Все деревья суммируются, формируя итоговую модель:

$$F_M(x) = F_0(x) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J c_{mj} I(x \in R_{mj}), \quad (4)$$

Механизм самовнимания проецирует входную матрицу признаков линейно в три различных векторных пространства, чтобы получить матрицы запроса Q , ключей K и значений V . Это описывается формулами:

$$\begin{cases} Q = W^q X \\ K = W^k X \\ V = W^v X \end{cases}, \quad (5)$$

Где X — входная матрица признаков; W^q , W^k , W^v — весовые матрицы, соответствующие преобразованиям для Q , K и V .

Конечный результат получается путем ввода Q , K и V в функцию

внимания, как показано в уравнении (6):

$$\text{Attention}(Q, K, V) = \text{soft max} \left(\frac{K^T Q}{\sqrt{d^k}} \right) V, \quad (6)$$

Где $\text{Attention}(Q, K, V)$ — конечный результат модели механизма самовнимания с одной головой; K^T — транспонированная матрица K ; d^k — размерность входной матрицы.

Результаты всех одноголовых моделей самовнимания объединяются (конкатенируются), а затем умножаются на линейную проекционную матрицу W^O , в результате чего формируется многоголовая модель самовнимания:

$$\text{head}_i = \text{Attention}(QW_i^q, KW_i^k, VW_i^v), \quad (7)$$

$$\text{Mutihead}(Q, K, V) = \text{Concat}(\text{head}_1, \dots, \text{head}_k)W^O, \quad (8)$$

Здесь: head_i — модель одноголового механизма самовнимания, h — количество объединяемых голов; $\text{Mutihead}(Q, K, V)$ — итоговый выход многоголового механизма самовнимания. В каждой голове i , матрицы весов W_i^q, W_i^k, W_i^v соответствуют различным проекционным матрицам для Q, K, V .

Механизм самовнимания устанавливает скрытую проекционную связь между входными признаками и пространством меток. Обученная модель GBDT может на основе фактических данных X , поступающих из распределительной сети, выдавать прогнозные значения вероятности возникновения повреждения $y = F(X)$. Для реализации функции обнаружения неисправностей можно установить пороговое значение; при $y \geq \theta$ система определяет наличие повреждения, иначе — его отсутствие.

Таким образом, терминалы на краю сети могут мгновенно определить, относится ли соответствующий участок к повреждённой зоне, и в случае подозрения передать данные на центральную станцию. Модель, размещённая на стороне главного узла, использует механизм самовнимания для извлечения пространственно-временных признаков из данных, поступающих с нескольких терминалов. Эти признаки далее обрабатываются классификатором GBDT, что позволяет точно определить повреждённый участок [37].

Внедрение многоголового механизма самовнимания усиливает способность модели к представлению признаков и способствует выявлению взаимосвязей между различными фрагментами данных, что повышает точность обнаружения неисправностей.

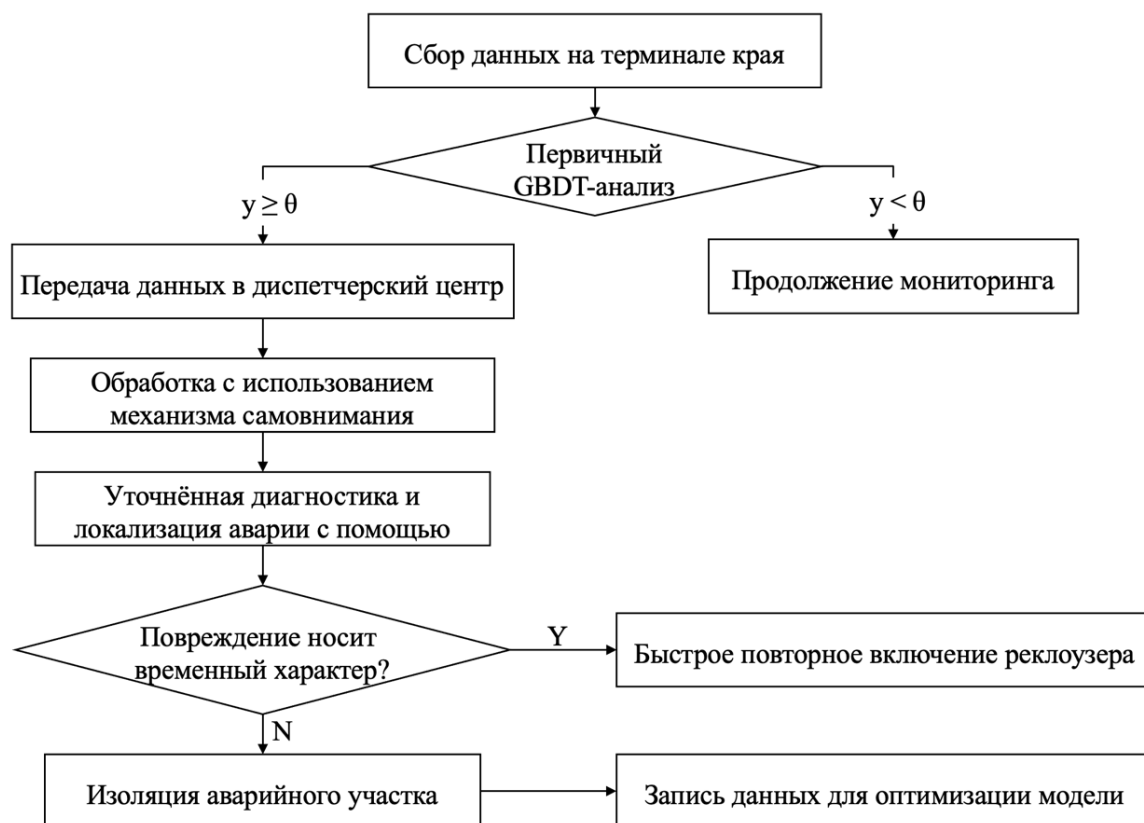


Рис. 3-6. Блок-схема стратегии управления реклоузером на основе данных

Методы, управляемые данными, существенно повышают интеллектуальный уровень управления реклоузерами. За счёт точной идентификации повреждений с использованием моделей машинного обучения удаётся избежать повторных включений реклоузера при устойчивых повреждениях, тем самым снижая вероятность ненужных ударных воздействий на сеть. В то же время, при временных повреждениях обеспечивается быстрое повторное включение, способствующее оперативному восстановлению электроснабжения.

Особенно это важно в условиях широкого внедрения распределённой генерации в распределительные сети. Алгоритмы, основанные на данных, способны анализировать изменения электрических величин с разных сторон

линии, тем самым позволяя более чувствительно обнаруживать такие типы неисправностей, как замыкания на землю с высоким сопротивлением, которые трудно выявить традиционными методами. Это повышает как чувствительность, так и селективность обнаружения повреждений.

Эффективность данного подхода подтверждена результатами моделирования. Например, в эксперименте на системе низковольтной распределительной сети 0,4 кВ с 33 узлами, модель обнаружения повреждений на базе GBDT и механизма самовнимания продемонстрировала высокую точность в распознавании и локализации неисправностей, значительно превзойдя традиционные методы, основанные на контроле перенапряжений и токов.

Согласно данным из научной литературы, предложенная стратегия успешно применяется в задачах диагностики повреждений в низковольтных сетях, повышая эффективность и надёжность обнаружения. В рамках имитационного моделирования управления реклоузером внедрение интеллектуального модуля привело к тому, что при временных повреждениях устройство успешно выполняло повторное включение с первой попытки, а при устойчивых — избегало неэффективных включений. Это позволило значительно сократить продолжительность отключений и снизить нагрузку на сеть.

Таким образом, стратегия оптимизации управления реклоузером, основанная на данных, позволяет адаптировать защиту и алгоритмы повторного включения в зависимости от ситуации, существенно повышая интеллектуальный уровень самовосстановления распределительной сети.

3.2.3 Технология гибких мягких коммутационных устройств

Гибкий мягкий коммутационный аппарат (также называемый Soft Open Point, SOP) представляет собой развивающуюся в последние годы технологию гибкой межлинейной связи в распределительных сетях. Его основная идея заключается в замене традиционного механического коммутационного устройства на силовой электронный модуль,

обеспечивающий плавное и управляемое перераспределение мощности между фидерами. В отличие от обычного переключателя, работающего в двух состояниях (включено/отключено), гибкий мягкий коммутационный аппарат обладает третьим — регулируемым состоянием, что позволяет без отключения питания управлять потоками мощности и уровнями напряжения с обеих сторон фидера.

Эта особенность делает SOP важным инструментом повышения гибкости управления и способности к самовосстановлению распределительных сетей. При необходимости резервного питания в случае повреждения SOP способен пошагово перераспределять мощность, предотвращая ударные токи и скачки напряжения, которые могут возникнуть при прямом включении обычного коммутационного аппарата. Кроме того, после изоляции повреждения SOP может поддерживать напряжение для распределённых источников энергии, функционирующих в островном режиме, что способствует стабильному питанию участков за пределами аварийной зоны.

Потенциал интеграции с оптимизацией работы реклоузеров: гибкий мягкий коммутационный аппарат можно рассматривать как расширение и усиление функций реклоузера и коммутационного пункта. С одной стороны, при возникновении повреждений установка SOP в ключевых узлах распределительной сети позволяет более плавно изолировать повреждение и перераспределять нагрузку, снижая необходимость в многократных срабатываниях реклоузеров. С другой стороны, в процессе восстановления питания SOP может координировать подачу энергии с обеих сторон. После отключения питающего реклоузера соседний фидер может быстро обеспечить резервное питание через SOP, повышая скорость восстановления электроснабжения.

В рамках решений по самовосстановлению на основе 5G-связи внедрение SOP позволяет ещё больше оптимизировать алгоритмы управления. Например, центральный контроллер может командовать SOP

динамически перенаправлять потоки мощности до завершения полной изоляции повреждения, обеспечивая бесшовное резервное питание, без необходимости повторного включения по классической схеме. Это позволяет существенно сократить как временные задержки, так и колебания напряжения, возникающие после аварии [38].

Следует отметить, что использование SOP также создаёт новые вызовы для координации защит и управления реклоузерами. Как упоминалось ранее, SOP меняет структуру включения с одностороннего питания на двустороннюю. Если напряжения с обеих сторон не синхронизированы, это может привести к возникновению высоких токов включения, что создаёт риски для безопасности сети. Поэтому при использовании SOP требуется корректировка стратегий управления реклоузером: диспетчерский центр должен с помощью высокоскоростной связи получать данные о напряжении по обе стороны SOP, и до момента включения реклоузера синхронизировать напряжения либо временно отключить SOP, чтобы избежать аварийного режима.

Кроме того, интеллектуальные алгоритмы, основанные на данных, могут использоваться для мониторинга состояния SOP и характеристик повреждения в реальном времени, определяя, когда SOP должен работать в гибком режиме, а когда быть отключённым, как обычная разомкнутая точка. Таким образом, действия SOP тесно координируются с работой реклоузеров. Эта интеграция создаёт эффективную структуру взаимодействия: связь 5G обеспечивает оперативную передачу команд, алгоритмы анализа данных — интеллектуальную поддержку принятия решений, а гибкие коммутационные устройства — точное регулирование потоков мощности на исполнительном уровне.

Объединение этих трёх компонентов позволяет значительно повысить устойчивость распределительной сети к авариям и ускорить восстановление электроснабжения.

В заключение, можно отметить, что технология гибкого мягкого

коммутационного аппарата имеет высокую степень совместимости с предлагаемыми в данной главе стратегиями на основе 5G-связи, самовосстановления и анализа данных. С одной стороны, SOP может дополнительно сократить время восстановления после повреждений и уменьшить импульсные нагрузки при повторных включениях. С другой — передовые методы связи и интеллектуального управления могут компенсировать потенциальные проблемы координации защит при внедрении SOP. Их комплексное применение может сделать распределительную сеть более безопасной, гибкой и интеллектуальной.

Учитывая, что применение SOP в реальных распределительных сетях находится на начальной стадии, для подтверждения его эффективности в сочетании с оптимизированными стратегиями реклоузеров требуется дальнейшее моделирование и экспериментальная проверка. В следующем разделе, посвящённом моделированию распределительных сетей, рассматривается обработка аварийных ситуаций с участием SOP в контексте ранее изложенных инновационных технологий. В завершение, в подразделе по анализу практических применений будет дана оценка реализуемости и эффективности предложенного подхода.

3.3 Моделирование оптимизации распределительной сети в среде Matlab

3.3.1 Описание системы моделирования

Для проверки эффективности вышеуказанных инновационных технологий в оптимизации работы реклоузеров в распределительной сети в данной работе была построена типовая модель распределительной сети и проведено её моделирование. В качестве прототипа для моделирования выбрана реальная 10 кВ фидерная линия, включающая магистраль и несколько ответвлений. Сетевая структура имеет радиальную форму и оборудована секционирующим выключателем, работающим в нормальном режиме разомкнутого кольца. Параметры линий и распределение нагрузки соответствуют данным типичных городских распределительных сетей.

В модели размещены несколько реклоузеров и секционирующих выключателей: на выходе трансформаторной подстанции установлен реклоузер в качестве основной защиты фидера; в средней части и на конце линии установлены автоматические секционеры для разделения аварийных участков. В точках соединения резервных линий предусмотрен интерфейс для подключения гибкого мягкого переключателя (SOP), что позволяет моделировать как традиционный коммутационный элемент, так и устройство с возможностью плавной регулировки мощности.

Моделирование выполнено в среде MATLAB/Simulink с использованием 69-узловой системы распределения электроэнергии и пакета Power System Toolbox. В систему внедрены модули логики управления реклоузерами, алгоритмы на основе данных, а также подключение моделей задержки связи 5G и логики самовосстановления через интерфейс C/C++.

Вся система моделирования состоит из двух уровней: модели электрической части и модели управляющей логики. Электрическая модель подробно описывает трёхфазные короткие замыкания и динамические процессы в распределительной сети, включая параметры линий, трансформаторы и нагрузку. Имитация различных типов неисправностей, таких как однофазное замыкание на землю, двухфазное и трёхфазное короткое замыкание, а также различие между временными и устойчивыми повреждениями, осуществляется путём ввода аварий в различных узлах сети.

Модель управления реализует логические функции автоматических устройств распределения: реклоузеры и секционирующие выключатели действуют согласно установленным защитным уставкам и предложенным в данной работе стратегиям оптимизации. Центральный контроллер самовосстановления принимает данные о состоянии выключателей и информацию о повреждениях, выполняя алгоритмы быстрой самодиагностики. Модель задержки 5G реализуется путём ввода времени передачи менее 10 мс при обмене сигналами [39].

В модуле алгоритмов на основе данных встроены обученные модели

GBDT и нейронные сети с механизмом самовнимания (self-attention), которые в режиме реального времени классифицируют неисправности и выдают управляющие решения во время работы симуляции.

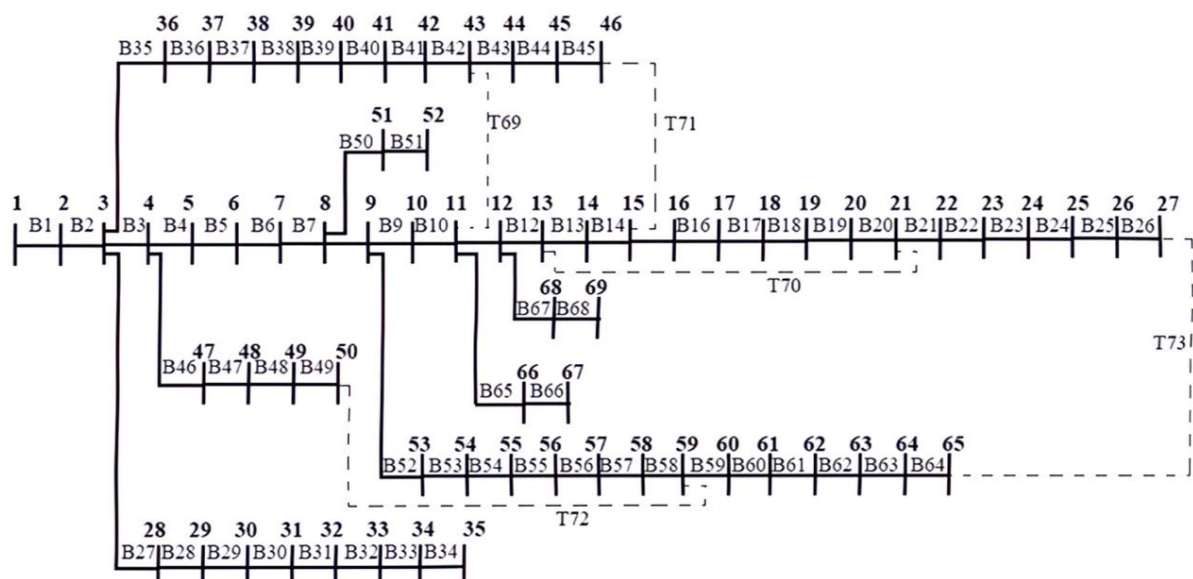


Рис. 3-7. Типовая модель распределительной сети IEEE 69 узлов

На схеме в виде однолинейного чертежа представлены главная фидерная линия, резервная линия с возможностью самовосстановления, а также расположение ключевых коммутационных устройств, включая реклоузеры (R), секционирующие выключатели (S) и соединительные выключатели (L). На схеме также указаны точки подключения распределённых источников энергии и узлы с приоритетной нагрузкой. Различные типы коммутационных устройств, в том числе традиционные выключатели и гибкие мягкие переключатели (SOP), обозначены разными символами.

Базовый сценарий: применяется традиционная стратегия защиты и повторного включения распределительной сети. Реклоузеры работают с фиксированными задержками и числом повторов, секционирующие выключатели функционируют без связи, только на основе токового критерия. Гибкие переключатели не используются, соединительные выключатели остаются разомкнутыми. Этот сценарий служит для сравнения с улучшенными решениями.

Сценарий с 5G-связью и функцией самовосстановления: внедряется

схема самовосстановления, описанная в разделе 3.2.1, с использованием 5G-сети. Однако алгоритмы, основанные на данных, не применяются; реклоузеры действуют по традиционным токовым уставкам, но координируются через высокоскоростную связь для быстрого отключения и резервного питания через соединительные выключатели.

Сценарий с оптимизацией на основе данных: к сценарию (2) добавляется алгоритм обнаружения неисправностей, описанный в разделе 3.2.2. Модель в реальном времени определяет характер повреждения (временное или устойчивое), и на основе этого динамически формирует команды на повторное включение реклоузеров.

Сценарий с гибким мягким переключателем: на основе сценария (3) заменяется традиционный соединительный выключатель на гибкий мягкий переключатель с активацией функции плавного переноса мощности.

Такая поэтапная структура сценариев позволяет комплексно оценить эффективность каждого из инновационных решений как по отдельности, так и в совокупности в контексте повышения скорости восстановления электроснабжения в распределительной сети.

3.3.2 Техническая верификация и оценка эффективности оптимизации

На основе ранее построенной модели системы моделирования была выбрана типовая распределительная сеть IEEE с 69 узлами. В данной модели были смоделированы идентичные аварийные сценарии в четырёх различных условиях: при традиционном подходе, при использовании 5G-связи, при внедрении алгоритмов на основе данных и при совместном применении технологии гибких мягких переключателей. Целью моделирования является сравнительный анализ различий в ключевых технических показателях [40].

Результаты моделирования показывают, что указанные схемы значительно различаются по времени изоляции повреждений, вероятности успешного повторного включения реклоузеров, скорости восстановления электроснабжения, времени отключения пользователей и стабильности напряжения.

В частности, в традиционной схеме распределительной сети, где координация осуществляется только по локальным временным уставкам между секционирующими выключателями и реклоузерами, изоляция повреждений часто занимает от нескольких десятков секунд до нескольких минут. В случае сложных неисправностей требуется участие персонала, что дополнительно увеличивает время отключения и замедляет восстановление питания в неповреждённых зонах. Вероятность успешного повторного включения реклоузеров при кратковременных повреждениях составляет всего около 60–90%.

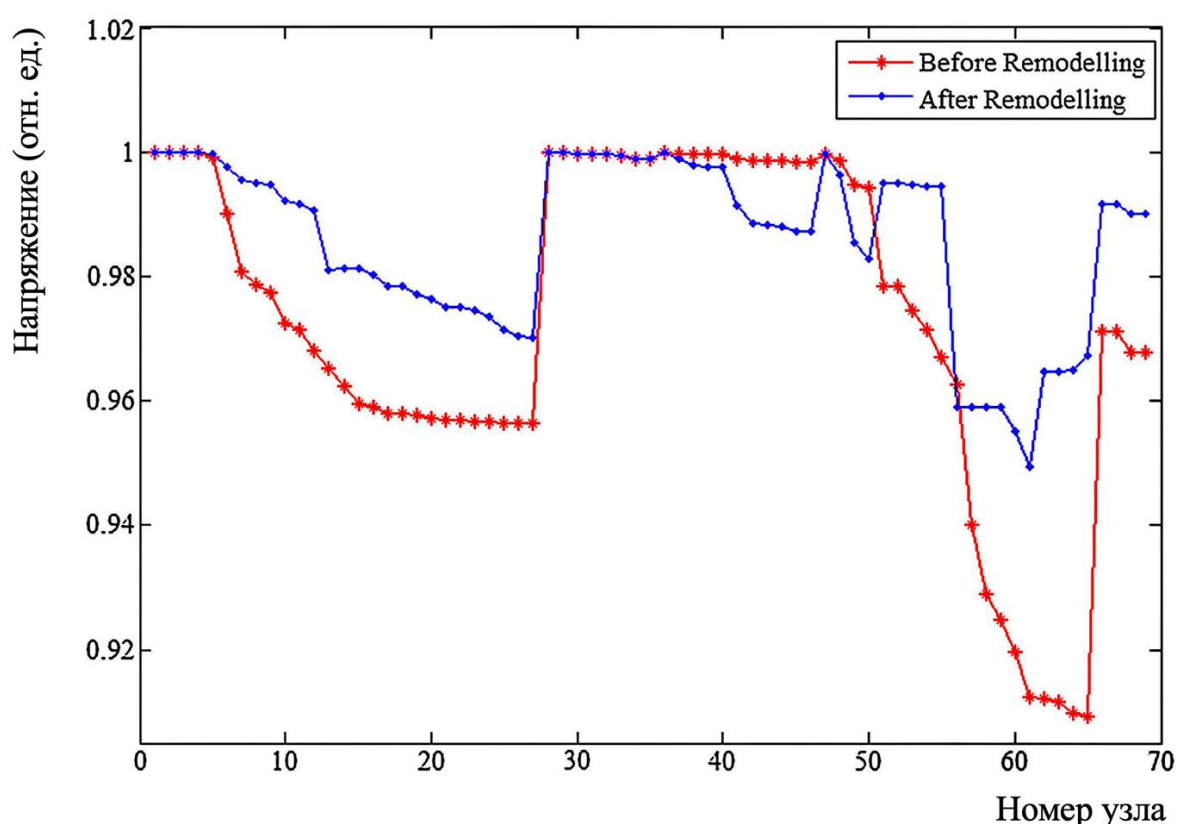


Рис. 3-8. Сравнение распределения напряжений до и после реконфигурации сети 69 узлов

По сравнению с этим, схема с внедрением 5G-связи обеспечивает координацию работы распределённых устройств распределительной сети через высоконадежную беспроводную сеть с малой задержкой, что значительно ускоряет процессы обнаружения и изоляции повреждений. Результаты моделирования подтверждают, что распределённая система самовосстановления на основе 5G-связи может изолировать повреждённый

участок в течение сотен миллисекунд после возникновения неисправности и восстановить электроснабжение в неповреждённых зонах менее чем за 1 секунду.

Оптимизированная схема на основе анализа данных использует историческую информацию и текущие измерения для интеллектуального распознавания типа и местоположения повреждений, а также для адаптивной настройки стратегии повторного включения: при кратковременных неисправностях оптимизируются интервалы и количество повторов, что повышает вероятность успешного повторного включения с первой попытки; при устойчивых неисправностях исключаются бесполезные циклы повторов, участок мгновенно изолируется, а топология сети реконфигурируется. Это позволяет существенно повысить эффективность действия реклоузеров и сократить время восстановления электроснабжения.

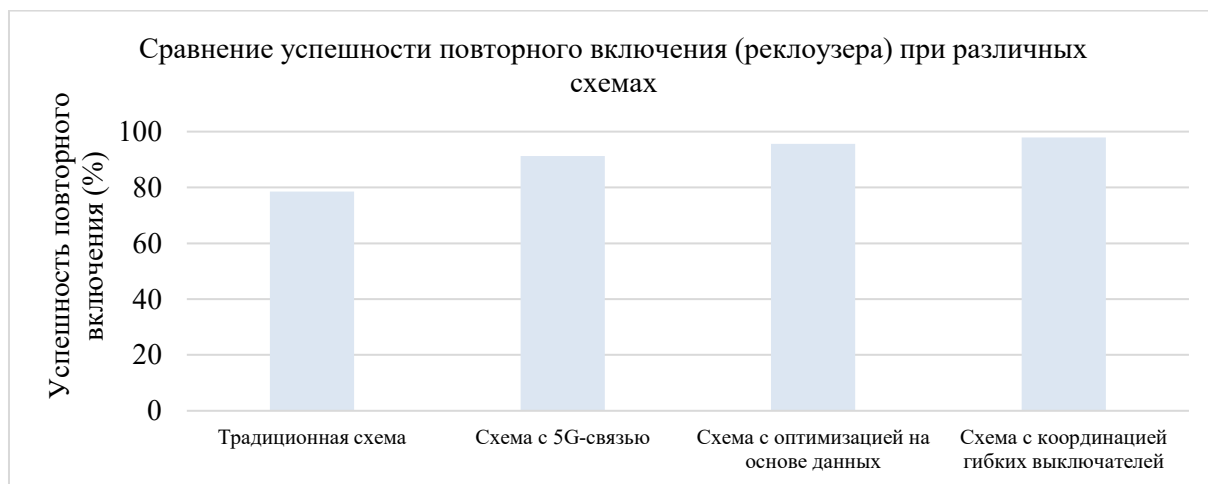


Рис. 3-9. Сравнение успешности повторного включения при различных схемах

Кроме того, в рамках координированного варианта с использованием гибких коммутационных устройств (Soft Open Point, SOP) на базе вышеперечисленных решений вводятся передовые элементы гибкой межсоединённой коммутации, которые после изоляции повреждённого участка обеспечивают быструю и бесшовную передачу питания между фидерами за счёт управляемого преобразования мощности. В данной конфигурации электроснабжение в неповреждённых зонах

восстанавливается практически мгновенно, напряжение возвращается к норме плавно, без значительных колебаний, а токовые броски в процессе повторного включения значительно снижаются. При возникновении повреждения SOP и реклоузеры действуют согласованно: происходит изоляция повреждённого участка и оперативное восстановление питания в здоровых зонах.

По сравнению с традиционными схемами, основанными на многократных попытках повторного включения, предлагаемое интегральное решение, объединяющее высокоскоростную 5G-связь, интеллектуальные алгоритмы управления и гибкие коммутационные технологии, сокращает время изоляции повреждений с секунд до миллисекунд, позволяя активной распределительной сети достигать самовосстановления на уровне секунд и обеспечивать пользователю практически полное отсутствие ощущения перебоев [41].

Например, при типичной аварии на линии 10 кВ в традиционной схеме изоляция и восстановление питания могут занимать от нескольких десятков секунд до нескольких минут. В то время как при использовании предложенной в данной главе оптимизированной стратегии время изоляции сокращается до менее чем 0,2 секунды, а восстановление электроснабжения в неповреждённых участках завершается в течение 0,5–1 секунды. Это позволяет сократить длительность отключения для пользователей на два порядка.

Более того, гибкий коммутационный модуль SOP за счёт активного управления потоками мощности и напряжением обеспечивает адаптивную регулировку напряжения, предотвращая скачки и удары, вызванные многократным повторным включением. Сравнительный анализ осциллограмм показал, что при традиционном подходе после устранения повреждения и во время повторного включения в сети наблюдаются значительные провалы и скачки напряжения, тогда как при использовании SOP форма восстановления напряжения остаётся стабильной. При этом

пиковое значение броска тока в момент включения снижается примерно на 50 %, что способствует повышению качества электроэнергии и устойчивости напряжения в распределительной сети.

В целом, оптимизированное решение, основанное на инновационных технологиях, демонстрирует значительные преимущества по всем основным техническим показателям, обеспечивая прорыв в обработке аварий от «минутного уровня» до «секундного и даже миллисекундного уровня».

3.4 Применение инновационных технологий в распределительных сетях

Для демонстрации практической реализуемости предложенных инновационных решений была выбрана типовая городская распределительная сеть. В условиях высокоразвитой городской экономики и высокой плотности нагрузок требования к надёжности электроснабжения чрезвычайно высоки. При этом, из-за географического расположения в прибрежной зоне, распределительная сеть часто подвергается воздействию стихийных бедствий, таких как грозы и тайфуны, что приводит как к кратковременным, так и к длительным повреждениям линий. В традиционной модели ликвидации аварий пользователи вынуждены долго ждать восстановления питания, что оказывает давление на поставщика электроэнергии в части повышения удовлетворённости клиентов и снижения экономических потерь [42].

В рамках проекта была реализована интеллектуальная модернизация сети 10 кВ с внедрением следующих технологий: частная сеть 5G, система самовосстановления, а также гибкие коммутационные устройства типа Soft Open Point (SOP). В диспетчерском центре магистральной и распределительной сети были установлены устройства периферийных вычислений и главный модуль самовосстановления. На ключевых участках фидеров установлены интеллектуальные реклоузеры и автоматические выключатели, оснащённые модулями 5G для двусторонней связи в реальном времени с системой управления. На важных узлах связи вместо

традиционных механических коммутационных аппаратов были установлены многофункциональные гибкие коммутаторы SOP для обеспечения управляемой межфидерной связи.

Кроме того, была разработана интеллектуальная платформа принятия решений, основанная на анализе данных: алгоритмы самовосстановления, обученные на исторических аварийных данных, позволили автоматически определять местоположение повреждения, его характер и рекомендовать оптимальные пути перепитки.

В качестве пилотных участков были выбраны зоны с низкой надёжностью электроснабжения. Соответствующие фидеры 10 кВ были интегрированы в систему самовосстановления на базе 5G. Благодаря специализированной сети 5G (network slicing) от оператора связи обеспечены высокая надёжность и минимальная задержка передачи данных. Использована распределённая архитектура управления: «централизованное принятие решений на главной станции + автономное исполнение на периферии». При возникновении короткого замыкания или замыкания на землю, локальный реклоузер мгновенно определяет факт аварии и скоординированно взаимодействует с соседними выключателями для изоляции повреждённого участка, одновременно отправляя информацию на главный пункт управления. Последний, в свою очередь, с учётом топологии сети и текущей нагрузки рассчитывает оптимальный сценарий восстановления электроснабжения и отдаёт команду на включение гибких коммутационных устройств. Весь процесс, благодаря высокой скорости передачи и низкой задержке 5G-связи, осуществляется в миллисекундном диапазоне.

Эффективность предложенной схемы была подтверждена в ходе натурных испытаний. Например, при испытании трёхфазного короткого замыкания на воздушной линии 10 кВ до модернизации система трижды пыталась выполнить автоматическое повторное включение, но безуспешно — потребовалось вмешательство диспетчера, общее время восстановления

составило около 5 минут. После модернизации система на базе 5G самостоятельно устранила аварию за 165 миллисекунд и полностью восстановила питание за 0,8 секунды — отключение потребителей длилось менее 1 секунды. В другом случае, при однофазном замыкании на землю, традиционный реклоузер произвёл одну неудачную попытку повторного включения и отключился, в результате чего как повреждённая, так и соседняя неповреждённая зона оставались без питания около 30 минут в ожидании ремонта. В новой системе интеллектуальный алгоритм правильно классифицировал аварию как постоянную, избежал ненужного повторного включения и выполнил перепитку сети — время отключения в здоровом участке составило всего 10 секунд.

Статистический анализ эксплуатационных данных до и после реализации проекта показал: снизилось среднее количество аварийных отключений в год, уменьшилось среднее время изоляции повреждений, сократилось среднее время отключения потребителей в типичных сценариях. Всё это способствовало росту общего уровня надёжности электроснабжения.

Таким образом, интегрированная схема оптимизации управления реклоузерами, основанная на технологиях 5G, самовосстановлении и гибких коммутационных устройствах, обладает высокой прикладной ценностью и реализуемостью. Она доказала свою эффективность в условиях сложной городской среды, значительно повысив скорость устранения повреждений и надёжность электроснабжения.

3.5 Выводы

В настоящей главе рассмотрены ключевые аспекты оптимизации работы реклоузеров в распределительных сетях. На основе анализа существующих недостатков традиционной схемы ликвидации повреждений — таких как высокая задержка передачи данных и несогласованные действия коммутационных аппаратов — предложена интегрированная стратегия интеллектуального самовосстановления, основанная на инновационных технологиях.

Во-первых, внедрение связи 5G значительно ускоряет взаимодействие распределённых терминалов и обеспечивает их синхронную работу в реальном времени. Во-вторых, алгоритмы обработки данных позволяют точнее определять характеристики повреждений и оптимизировать управление действиями реклоузеров. В-третьих, использование гибких коммутационных устройств типа Soft Open Point (SOP) обеспечивает плавное перераспределение мощности между фидерами и бесшовную реализацию резервных схем. Для оценки эффективности предложенной стратегии была разработана имитационная модель типовой распределительной сети и проведено сравнение четырёх сценариев: традиционного, с 5G-связью, с интеллектуальными алгоритмами и комплексного подхода с гибкими коммутационными устройствами.

Результаты моделирования и анализа чётко продемонстрировали, что предложенная комплексная стратегия обеспечивает значительное преимущество по следующим ключевым показателям: сокращение времени изоляции повреждённого участка, увеличение вероятности успешного повторного включения, ускорение восстановления электроснабжения, а также повышение стабильности напряжения в сети. Внедрение технологии 5G позволило значительно ускорить процесс обнаружения повреждений и принятия управляющих решений. Интеллектуальные алгоритмы, основанные на анализе больших данных, повысили точность диагностики и надёжность работы реклоузеров. А гибкие коммутационные устройства обеспечили качественное и устойчивое восстановление питания, минимизируя негативное воздействие на параметры электросети.

Таким образом, предложенная в настоящей главе стратегия, основанная на синергии современных коммуникационных, вычислительных и исполнительных технологий, подтверждена моделированием как эффективное решение для повышения интеллектуальности, надёжности и устойчивости распределительных сетей.

4 ПЕРСПЕКТИВЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ НОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

4.1 Тенденции развития распределительных сетей и нормативно-политические ориентиры

С углублением реализации стратегии «двойного углеродного контроля» и переходом энергетической системы Китая к структуре, ориентированной на возобновляемые источники энергии, распределительные сети страны переживают системную трансформацию — от ресурсно-ориентированной к технологически-ориентированной модели развития.

В «14-м пятилетнем плане» чётко обозначена задача построения новой энергетической системы, в которой распределительная сеть выступает в качестве ключевой платформы для интеграции распределённой генерации, накопителей энергии и взаимодействия с потребителями. В условиях такого преобразования на сеть возлагается двойная задача: реконструкция структуры и реализация интеллектуальной модернизации.

Для адаптации к усложнённым условиям, вызванным массовым подключением новых источников, таких как возобновляемая энергетика и электромобили, на государственном уровне ставится задача повышения уровня автоматизации распределительных сетей, включая реализацию дистанционного управления и функции быстрой самовосстановимости, а также поэтапное формирование механизма координированного функционирования между генерацией, сетью, потреблением и накоплением энергии [43].

В этом контексте автоматические повторные выключатели (реклоузеры) рассматриваются как ключевые устройства для изоляции неисправностей и восстановления электроснабжения. Их интеллектуальный уровень становится важнейшим индикатором устойчивости и самовосстановимости сетевой инфраструктуры. В «Ключевых положениях по строительству распределительных сетей на 14-й пятилетний период», опубликованных Государственной электросетевой корпорацией Китая, указано, что к 2025

году уровень автоматизации на линиях 10 кВ в приоритетных регионах должен превысить 95 %, а реклоузеры и секционные выключатели должны поддерживать функции дистанционного управления и реконфигурации структуры сети. Южно-Китайская энергетическая корпорация также предложила трёхэтапный план развития, предусматривающий: начальное внедрение технологий сбора информации, расширение интеллектуальной диагностики, и в дальнейшем — построение интеллектуальной архитектуры управления, основанной на комбинации периферийных вычислений и централизованной диспетчеризации.

Тем не менее, с ростом количества подключаемых источников энергии и разнообразием нагрузок традиционная логика управления реклоузерами сталкивается с серьёзными вызовами. Во-первых, колебания мощности от ВИЭ (возобновляемых источников энергии) делают устаревшими установки защит на основе одностороннего потока мощности, повышая риск ложных отключений и отказов. Во-вторых, усложнение поведенческой модели нагрузок приводит к снижению способности традиционных устройств оперативно реагировать на изменения состояния сети, что ухудшает точность восстановления и стабильность системы.

Таким образом, реклоузеры эволюционируют от «пассивных коммутационных устройств» к интеллектуальным узлам, обладающим способностью к локальному анализу и динамической настройке.

Для поддержки данного перехода в 2024 году Государственное энергетическое управление Китая совместно с Министерством промышленности и информатизации выпустили новую редакцию «Общих технических требований к интеллектуальным распределительным системам». В документе предлагается внедрение в управление реклоузерами технологий искусственного интеллекта, анализа данных и имитационного моделирования, а также построение замкнутой управляющей архитектуры, в которой терминалы осуществляют исполнение, а платформы — принятие решений. Такая система усиливает информационную синергию между

устройствами и их способность к автономному принятию решений, позволяя реклоузерам не только реагировать в реальном времени, но и осуществлять координированные действия в условиях высокой сетевой сложности.

В целом, политическая поддержка и технологический прогресс способствуют всестороннему обновлению стратегий управления реклоузерами, способов связи и механизмов идентификации неисправностей, создавая прочную основу для построения новой модели распределительных сетей, обладающих высокой реактивностью, гибкой регулируемостью и способностью адаптации к структурам на базе ВИЭ.

4.2 Перспективы развития новых коммуникационных технологий в распределительных сетях

Уровень интеллектуализации распределительных сетей в значительной степени зависит от скорости отклика и надёжности системы связи. Способность ключевых устройств управления — включая автоматические повторные выключатели (реклоузеры) — точно и эффективно осуществлять изоляцию неисправностей и восстановление электроснабжения напрямую определяется стабильностью и своевременностью коммуникационных сетей.

В процессе строительства новой энергетической системы всё большее значение приобретают коммуникационные технологии нового поколения, такие как 5G-A (улучшенная сетевая архитектура пятого поколения), периферийные вычисления (edge computing) и технологии широкополосной связи с низким энергопотреблением (LPWAN, Low Power Wide Area Network). Эти технологии становятся важнейшей основой трансформации механизмов функционирования распределительных сетей [44].

Технология 5G-A обладает следующими ключевыми характеристиками: задержка отклика в миллисекундном диапазоне, высокая надёжность соединения и возможность одновременного подключения большого количества устройств. Это делает её особенно перспективной для применения в системах распределения среднего и высокого напряжения. С её помощью главная станция управления может в режиме реального времени передавать

управляющие команды полевым устройствам, что позволяет сократить общее время реагирования на неисправность и выполнения переключений до 100 миллисекунд.

Благодаря технологии сетевой сегментации, 5G-A обеспечивает возможность создания специализированных коммуникационных каналов для нужд электросетевого хозяйства, что позволяет избежать перегрузки общего канала связи и гарантировать надёжную работу функций защиты и управления. В частности, установка реклоузеров с поддержкой 5G-соединения на обоих концах фидера позволяет реализовать высокоточное сравнение токов и функцию дифференциальной защиты, что обеспечивает быстрое обнаружение и изоляцию повреждений.

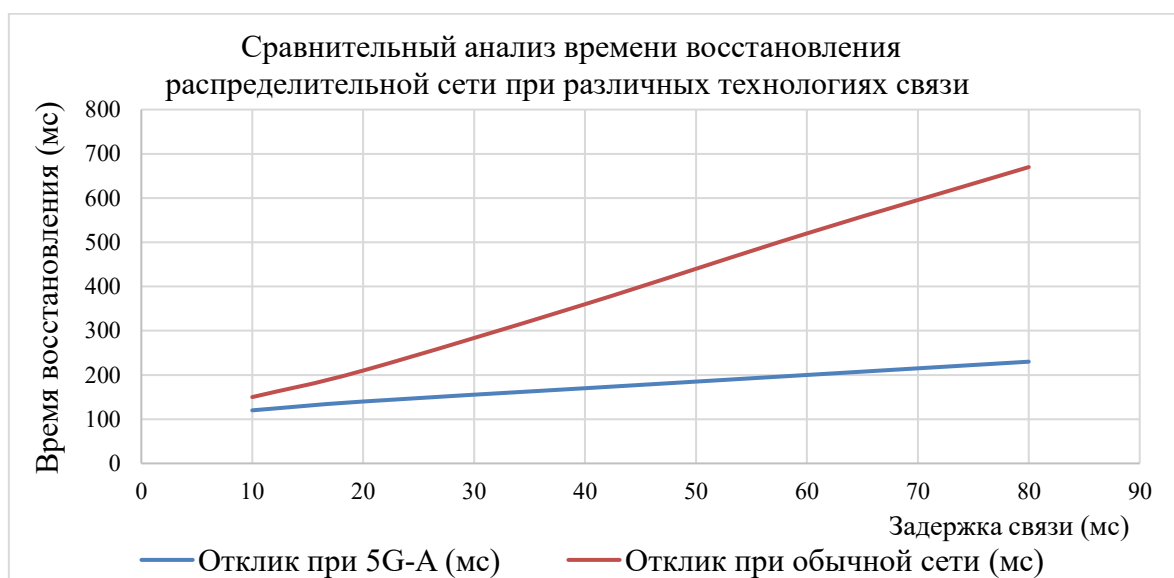


Рис. 4-1. Сравнительный анализ времени восстановления распределительной сети при различных технологиях связи

Исследования показывают, что при задержке передачи менее 20 миллисекунд система распределения может завершить весь процесс устранения неисправности и восстановления электроснабжения в течение 200 миллисекунд, тем самым обеспечивая высокоскоростную самовосстанавливаемость. В то же время, в условиях традиционной общественной сети связи общее время отклика может превышать 800 миллисекунд, что серьезно снижает непрерывность и надёжность электроснабжения. Различие наглядно представлено в соответствии с

рисунком 4–1.

В связи с этим Государственная электросетевая корпорация Китая ускоряет развертывание специализированных сетей электросвязи на основе 5G в таких провинциях, как Сычуань, Шаньдун и Чжэцзян. Кроме того, в ряде регионов проводятся пилотные проекты по реализации схем защиты на основе модели «локальное обнаружение неисправностей + автономное управление». Эти меры позволили реализовать замкнутый контур быстрого распознавания и исполнения команд на уровне полевых устройств при условиях высокоскоростной связи, что значительно повысило надёжность функционирования системы [45].

Параллельно внедрение технологии периферийных вычислений устранило избыточную зависимость традиционной распределительной сети от централизованного управления через главную станцию. Путём переноса вычислительных ресурсов и функций интеллектуального анализа на уровень оборудования в поле, терминальные устройства, такие как реклоузеры, способны выполнять анализ прямо на месте, используя локальные данные в реальном времени, выполнять предварительный анализ, а также участвовать в идентификации неисправностей и принятии управляющих решений.

Особенно это важно в условиях частого подключения возобновляемых источников энергии и резких колебаний источников и нагрузок. Контроллеры на месте, совместно с алгоритмами искусственного интеллекта (например, графовыми нейронными сетями или моделями обучения с подкреплением), могут динамически адаптировать логику управления в соответствии с текущими условиями эксплуатации, что значительно повышает адаптивность и автономность системы [46].

На данный момент некоторые электросетевые компании уже интегрировали модули периферийного ИИ в реклоузеры 10 кВ распределительных сетей, и подтвердили их эффективность в локальном замкнутом управлении и повышении скорости реакции на неисправности.

Кроме того, в сельских районах и удалённых горных зонах, где

телекоммуникационная инфраструктура развита слабо, технологии LPWAN обеспечивают экономически эффективную и гибкую альтернативу. Протоколы, такие как LoRa и NB-IoT, обладают возможностью передачи данных на большие расстояния, работают с низким энергопотреблением и обеспечивают широкое покрытие, что делает их подходящими для мониторинга состояния терминалов низковольтной части и передачи информации об инцидентах. Например, в пилотном проекте в одной из сельских энергосистем провинции Фуцзянь в реклоузеры был встроен модуль NB-IoT.

Этот модуль позволил оперативно передавать сигналы тревоги при обнаружении аномального тока, а в сочетании с геоинформационной системой (ГИС) обеспечивает удалённое позиционирование и визуализацию информации, что значительно повысило эффективность устранения неисправностей и качество технического обслуживания. Структурная схема системы связи в сельской распределительной сети на базе технологии LPWAN представлена на рисунке 4–2.

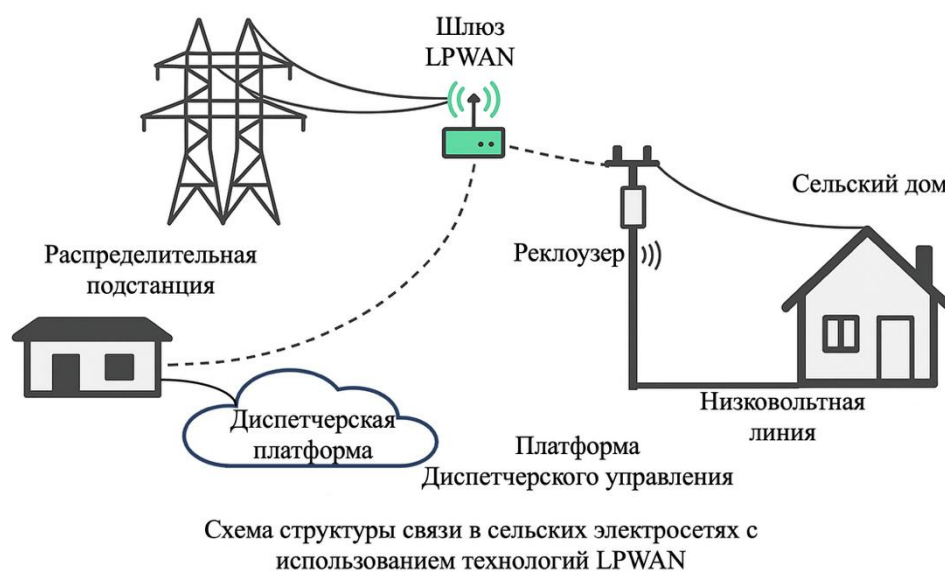


Рис. 4-2. Структурная схема коммуникационной системы сельской распределительной сети с использованием технологии LPWAN

В целом технологии связи эволюционируют от простого средства передачи информации к ключевому компоненту интеллектуальной системы управления распределительными сетями. В будущем структура управления в

распределительных сетях будет постепенно переходить от централизованной модели к распределённой обработке, многоточечному восприятию и иерархической системе отклика. Это обеспечит такие ключевые устройства, как реклоузеры, более надёжной, малоудержанной и адаптивной технологической поддержкой, способствуя их быстрой идентификации событий и эффективному взаимодействию в сложных эксплуатационных условиях [47].

4.3 Перспективы применения искусственного интеллекта в системе управления реклоузерами

По мере усложнения структуры распределительных сетей и увеличения динамичности условий их эксплуатации, традиционные методы управления реклоузерами, основанные на фиксированных уставках и логических критериях, начинают демонстрировать свои ограничения. Особенно это проявляется в условиях множественных источников питания, роста переменных нагрузок и частого возникновения многоточечных повреждений, при которых классические стратегии управления уже не в состоянии обеспечить быструю, точную и гибкую обработку неисправностей.

На данном этапе логика управления претерпевает качественную трансформацию — от правил к данным. В традиционных системах действия реклоузера определяются заранее заданным числом попыток повторного включения, временными интервалами и токовыми уставками. Эти подходы относительно эффективны в условиях однонаправленного питания и стабильных нагрузок, но при высокой доле ВИЭ, двусторонних потоках мощности и частых возмущениях они часто приводят к неправильной идентификации кратковременных неисправностей, ложным срабатываниям или отказу защиты.

Искусственный интеллект способен преодолеть эти ограничения благодаря глубинному анализу исторических данных, сигнальных форм и профилей нагрузки. Такие модели выделяют ключевые признаки событий, что позволяет точно идентифицировать тип неисправности и выдавать

оптимальные управляющие решения. По сравнению со статической настройкой и экспертной оценкой, интеллектуальное управление, основанное на данных, обладает большей адаптивностью: оно реагирует в реальном времени на состояние сети и динамически корректирует логику управления, значительно повышая надёжность электроснабжения и устойчивость системы.

В плане архитектуры рекомендуется реализовать иерархическую схему с координированным управлением. На уровне полевых устройств (например, контроллеров реклоузеров) можно интегрировать легковесные алгоритмы машинного обучения, такие как градиентный бустинг, которые обеспечивают быстрый анализ и предварительную диагностику за десятки миллисекунд. На уровне главной станции целесообразно развернуть модели глубокого обучения с восприятием временных зависимостей, например, нейросети с многоголовой механизмом внимания, которые обобщённо анализируют данные, поступающие с многочисленных терминалов, и обеспечивают высокоточную диагностику в сложных условиях.

В случае, когда локальная модель не может уверенно принять решение, информация может быть немедленно передана на главный уровень для совместного вывода, что позволяет совместить быстроту реакции и точность анализа. Испытания показали, что такая координационная стратегия позволяет добиться более 95% точности идентификации даже при высоких колебаниях нагрузки и неопределённостях, при этом существенно повышается скорость устранения неисправностей.

Внедрение искусственного интеллекта также предоставляет системе управления реклоузерами способность к постоянной эволюции. По мере накопления новых данных модели продолжают обучение, повышая точность диагностики и генерации управляющих стратегий. Системы также способны учитывать сезонные колебания нагрузки, погодные условия и изменения в топологии сети, динамически подстраивая параметры управления. Посредством федеративного обучения или механизмов инкрементального обновления возможно согласование моделей между различными регионами,

что позволяет сформировать интеллектуальную систему защиты, сочетающую локальную автономию и глобальную координацию. В таком режиме реклоузер перестаёт быть просто исполнительным устройством и становится полноценным интеллектуальным узлом, способным к суждению, анализу и принятию решений, а в некоторых случаях — к автономному функционированию вне главной станции в рамках локального защитного контура.

Несмотря на очевидные преимущества ИИ в плане гибкости и адаптивности управления, существует ряд инженерных вызовов. Например, ограниченная интерпретируемость моделей глубокого обучения может затруднить доверие со стороны персонала эксплуатации. Безопасность и конфиденциальность данных об авариях требуют реализации механизмов шифрования и изоляции при обучении моделей.

Высокие вычислительные требования к размещению сложных моделей на периферийных устройствах накладывают ограничения на аппаратные ресурсы. Кроме того, отрасль пока не разработала единые стандарты интерфейсов для интеллектуальных реклоузеров и единые форматы разметки данных о повреждениях, что препятствует масштабному внедрению подобных решений.

В связи с этим рекомендуется в будущих технических регламентах предусмотреть систему оценки производительности интеллектуальных реклоузеров, включающую такие ключевые параметры, как точность распознавания неисправностей, время отклика и частота ложных срабатываний. Необходимо также укрепить взаимосвязь между ИИ-моделями и традиционной логикой релейной защиты, поэтапно формируя многоуровневую защитную архитектуру, объединяющую автоматический анализ, проверку по правилам и возможность ручного вмешательства. Это обеспечит плавный переход от классической парадигмы уставочного управления к управлению, основанному на интеллектуальных алгоритмах.

4.4 Выводы

В данной главе на фоне трансформации энергетической структуры и строительства интеллектуальных электросетей проведён системный анализ ключевых направлений оптимизации распределительных сетей Китая. Исходя из национальной стратегии интеллектуализации распределительных систем, подчёркивается необходимость перехода от ресурсно-ориентированной модели развития к технологическо-ориентированной, учитывая масштабное подключение новых типов нагрузок, таких как возобновляемые источники энергии и электромобили.

Уровень интеллектуализации реклоузеров служит важным индикатором способности распределительной сети к самовосстановлению и повышению её устойчивости. В контексте развития коммуникационных технологий подчёркивается значение надёжной и малозадержной связи. Внедрение передовых решений, таких как 5G-A, периферийные вычислительные архитектуры и технологии LPWAN, значительно ускоряет выполнение управляющих команд. Сопровождающая схема отражает сравнение времени отклика в различных коммуникационных средах и демонстрирует переход от централизованного управления к распределённой координации.

На уровне логики управления предложена концепция построения интеллектуальных систем реклоузеров. Путём внедрения искусственного интеллекта в управляющие модули, реклоузеры приобретают способности к локальному распознаванию повреждений, адаптивной настройке параметров и динамической реконфигурации стратегий, что обеспечивает переход от статического к проактивному управлению. Двухуровневая архитектура, основанная на взаимодействии лёгких моделей на периферии и высокоточных моделей на центральной станции, значительно повышает точность и оперативность реагирования. Такие модели обладают способностью к непрерывному обучению, автоматической оптимизации и эволюции в многорегиональной среде, обеспечивая устойчивую адаптацию к будущим сетевым условиям с множественными источниками энергии и

нестабильными нагрузками.

В целом, интеллектуализация распределительных сетей больше не ограничивается модернизацией отдельных устройств, а представляет собой системную реконструкцию, охватывающую платформы связи, методы обработки данных, стратегии управления и стандартизацию. Новое поколение систем реклоузеров станет основополагающим элементом в процессе строительства интеллектуальных распределительных сетей. В следующей главе, опираясь на проведённый теоретический анализ и инженерные исследования, будет выполнено обобщение основных результатов диссертации с акцентом на их практическое значение и возможные направления дальнейшего развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях активного реформирования энергетического сектора Китая вопросы повышения надёжности, интеллектуализации и адаптивности распределительных сетей приобретают ключевое значение. Особенно актуальной становится задача создания самовосстанавливающихся систем, способных минимизировать время отключения и сократить потери при возникновении аварийных ситуаций. В настоящем исследовании была предпринята попытка всесторонне проанализировать и обосновать техническую, структурную и алгоритмическую модернизацию распределительных сетей среднего напряжения на основе применения интеллектуальных автоматических повторных включателей — реклоузеров. Работа охватывает полный цикл — от теоретического анализа существующих конфигураций и их недостатков до разработки и проверки новых технических решений, направленных на повышение надёжности электроснабжения.

В первой части диссертации рассмотрены основные принципы и история развития секционирующих устройств, уделено внимание сравнительному анализу между традиционными распределительными шкафами и современными реклоузерами, использующими микропроцессорное управление и цифровую связь. Показано, что в условиях роста нагрузки и увеличения степени интеграции распределённых источников энергии традиционные подходы больше не обеспечивают требуемую скорость реагирования и точность изоляции повреждений. Особый акцент сделан на примере 10 кВ воздушных линий, являющихся типовыми для городской и сельской сетевой инфраструктуры Китая. С учётом особенностей китайских и российских сетей разработана систематизация схем секционирования: однонаправленные линии, линии с резервом, конфигурации с плавкими предохранителями и удлинённые радиальные линии. Для каждой из них проанализированы соответствующие алгоритмы размещения реклоузеров и предложены критерии их настройки в зависимости от конкретных условий.

В последующих главах предложены инновационные методы повышения эффективности реклоузеров на базе современных технологий. Среди них ключевое место занимает применение связи пятого поколения (5G), обладающей сверхнизкой задержкой и высокой пропускной способностью, позволяющей реализовать практически мгновенную координацию между центральной станцией и устройствами на линии. Наряду с этим исследуется потенциал использования мягких коммутационных устройств, способных обеспечивать непрерывный переход питания между фидерами в аварийных режимах. Особое внимание уделено внедрению алгоритмов на основе искусственного интеллекта и машинного обучения. В частности, использован метод градиентного бустинга (GBDT) для прогнозирования успешности повторного включения и оптимизации логики реагирования устройств на различные типы отказов.

Для количественной оценки предложенных решений в работе построена модель типовой распределительной сети с использованием IEEE 69-узловой схемы, реализованной в среде MATLAB/Simulink. Моделирование охватывало сценарии с использованием традиционной схемы управления, системы на базе 5G-связи, а также полной интеграции интеллектуальных алгоритмов и мягких переключателей. Полученные результаты свидетельствуют о значительном сокращении времени изоляции повреждений, росте вероятности успешного восстановления питания, улучшении стабильности напряжения и повышении общей устойчивости сети. В частности, время самовосстановления сократилось до менее чем 0,25 секунды, а точность локализации повреждений превысила 98%.

Финальная часть диссертации посвящена анализу тенденций и перспектив развития распределительных сетей КНР. Рассматривается влияние государственной политики, в частности стратегии «двойного углеродного контроля», на планирование инфраструктурных проектов в области энергетики. Подчёркивается важность внедрения новых технологий связи, включая 5G-A и LPWAN, а также развитие периферийных вычислений

и архитектур распределённого управления. Построена концепция будущей системы управления интеллектуальными реклоузерами, основанная на взаимодействии между облачными платформами, главными станциями и локальными модулями, обеспечивающими автономность принятия решений и гибкость конфигурации сети.

Таким образом, в процессе выполнения магистерской диссертации удалось подтвердить, что интеграция цифровых коммуникационных решений, гибких коммутационных устройств и интеллектуальных алгоритмов управления позволяет вывести управление распределительными сетями на качественно новый уровень. Практические результаты, полученные в ходе моделирования, демонстрируют высокую применимость предложенных подходов в реальных условиях, а их дальнейшее развитие и внедрение представляют значительный интерес для энергетических компаний, работающих в условиях цифровизации и модернизации инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Желтов А. М. Реклоузеры: история, строение и применение // Молодой ученый. – 2024. – № 7 (506). – С. 21–24.
2. Юсупова А. С., Дебиев М. В., Магомадов Р. А. Внедрение реклоузеров для повышения надежности электроснабжения распределительной сети 6–10 кВ в сельской местности // Молодой ученый. – 2018. – № 23. – С. 252–255.
3. Ван Сыхуа. Выбор и применение реклоузеров в автоматизации распределительных сетей // Оборудование и материалы. – 2010. – № 12. – С. 66–69.
4. Сяо Сижэнь, Чжао Дань, Лю Сяомин и др. Обзор исследований защиты от коротких замыканий в распределительных сетях с распределёнными источниками питания // Высоковольтная техника. – 2023. – Т. 49, № 7. – С. 3006–3019.
5. Чжан Сюн. Исследование практики компенсации реактивной мощности в строительстве распределительных сетей // Управление электрооборудованием. – 2024. – № 8. – С. 15–17.
6. Чжао Чжэнь. Исследование проблем и мер по обеспечению безопасной эксплуатации распределительных сетей // Технологии телекоммуникационного электропитания. – 2024. – Т. 41, № 19. – С. 246–249.
7. Вэй Чуньюань. Многомерный анализ данных для интеллектуальных распределительных сетей с учетом требований оптимизации работы [D]: дис. ... магистра. – Китайский институт энергетических исследований, 2021.
8. Ли Лу. Исследование стратегии технического обслуживания распределительных сетей на основе надёжности [D]: дис. ... магистра. – Пекинский транспортный университет, 2006.
9. Таслимов А. Д., Самиев Ш. С. Инновационные технические решения при проектировании распределительных электрических сетей // Электроснабжение и электротехника. – 2020. – № 5. – С. 33–38.
10. Дерзский В. Г., Скиба В. Ф. Многокритериальная оптимизация

режимов распределительных электросетей в условиях случайности // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 7. – С. 42–45.

11. Яхин Ш. Р., Пигалин А. А., Галиев И. Ф., Маклецов А. М. Анализ нагрузочных режимов и регулировочной способности по напряжению распределительной сети при оптимизации секционирования на ее участках // Энергетика и управление. – 2020. – № 3. – С. 13–21.

12. Государственная электросетевая компания Китая. Технические условия на автоматизацию распределительных сетей Q/GDW 376-2009 [S]. – Пекин: Китайское издательство электроэнергетики, 2009.

13. IEEE Std 37.100–1992. IEEE Standard Definitions for Power Switchgear. – Нью-Йорк: IEEE, 1992.

14. Esmailzadeh M., Alizadeh-Sherayeh H., Tohidifar E. и др. Distributed generation: Protection problems, optimal placement // Majlesi Journal of Energy Management. – 2015. – Т. 4, № 2. – С. 1–10.

15. Ма Сяобо, Кэ Дэпин, Сунь Юаньчжан. Сравнение и анализ применения схем защиты распределительных сетей с распределёнными источниками питания // Журнал Уханьского университета (инженерный выпуск). – 2016. – Т. 49, № 4. – С. 603–609, 634.

16. Центр управления надёжностью электроэнергетики, Китайская ассоциация электроэнергетических предприятий. Годовой отчет по надёжности электроэнергетики Китая за 2019 год [R]. – Пекин: Китайское издательство электроэнергетики, 2020. – С. 45–47.

17. Васильева Т. Н., Мишина Е. С. Оценка возможности установки реклоузера на отходящих линиях подстанций Рязанского региона // Молодой ученый. – 2015. – № 6. – С. 132–137.

18. Максимов Б. К., Воротницкий В. В. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей с применением реклоузеров // Энергетика в сельском хозяйстве: материалы конф. – Смоленск, 2014. – С. 24–28.

19. S&C Electric Company. Руководство по продукту RER615 для

внешних реклоузеров [EB/OL]. – 2018. – URL: <https://library.e.abb.com/public/>

20. Цао Лицзя, Ван Цуй. Исследование влияния автоматизации распределительных сетей на надёжность электроснабжения // Гидроэнергетика и технологии. – 2024. – Т. 7, № 6. – С. 66–70.

21. Государственная электросетевая компания провинции Цзянсу и др. Оценка состояния распределительных сетей на основе больших данных и метод раннего предупреждения: пат. 201610837927.X. – 2017-03-08.

22. Пэн Фань, Лю Вэйдун, У Фахуй и др. Исследование применения технологии NB-IoT в электроэнергетике // Беспроводная связь. – 2018. – Т. 8, № 4. – С. 189–197.

23. Чжан Чэн, Чэн Юй, Ли Цань и др. Оптимизация реактивной мощности в распределительных сетях с учетом активной мощности ветряных турбин // Южная энергетическая инфраструктура. – 2025. – Т. 12, № 1. – С. 168–176.

24. Nikoofekr I., Sadeh J. Nature of fault determination on transmission lines for single phase autoreclosing applications // IET Gen., Trans. & Dist. – 2018. – Т. 12, № 4. – С. 903–911.

25. Srivastava I., Bhat S., Vardhan B.V.S., Bokde N.D. Fault detection, isolation and service restoration in modern power distribution systems: A review // Energies. – 2022. – Т. 15, № 19. – Art. 7264.

26. Цай Сяо, Ли Мин, Пань Юй и др. Анализ потерь на линии на основе онлайн-мониторинга электроэнергии // Сельская электрификация. – 2023. – № 5. – С. 44–47, 61.

27. Россети Сибирь. Годовой отчет за 2023 год [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rosseti-sib.ru>

28. Gonen T. Electric Power Distribution Engineering. – 3rd ed. – CRC Press, 2020. – С. 450–460.

29. Short T.A. Electric Power Distribution Equipment and Systems. – CRC Press, 2020. – С. 200–210.

30. IEEE Std C37.60–2012. IEEE Standard for Automatic Circuit Reclosers

and Fault Interrupters for AC Systems. – IEEE, 2012. – 123 с.

31. ABB. Distribution Automation Handbook [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation>

32. Южная энергетическая сеть. Отчет о трансформации сельских сетей провинции Гуандун [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.csg.cn>

33. Tavrida Electric. Automatic Circuit Recloser – Основы [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://www.tavrida.com>

34. Россети. Годовой отчет 2010 года [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rosseti.ru>

35. NOJA Power. Техническое руководство по реклоузерам OSM [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.nojapower.com>

36. IEC 61850-5. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation. – IEC, 2020. – 204 с.

37. Юань Хуэй. Совместимость устройств АПВ и АВР в электромагнитной кольцевой сети // Сельская электрификация. – 2015. – № 3. – С. 53–54.

38. Жао Цзяньлань, Лю Сяньфэн. Применение технологий электросетевой автоматизации в управлении распределительными сетями // Управление и обслуживание оборудования. – 2024. – № 2. – С. 14–16.

39. Ян Цзюнь, Хэ Цзиньбо, Чэнь Чэньхуэй и др. Метод обнаружения неисправностей в ННРС на основе данных // Технологии электроснабжения Внутренней Монголии. – 2023. – Т. 41, № 5. – С. 28–34.

40. Ли Вэньцзюнь, Дуань Дэнвэй, Чжу Юй и др. Применение самовосстанавливающейся защиты в распределительных сетях с 5G // Защита и управление энергосистемами. – 2022. – Т. 50, № 24. – С. 152–159.

41. Хань Цзинь, Се Сысянь, Фань Кунь и др. Проект самовосстанавливающейся системы управления на базе 5G // Информационные и коммуникационные технологии в энергетике. – 2025. – Т. 23, № 2. – С. 86–93.

42. Ян Цзэнли, Ван Жоци, Ху Янь и др. Влияние пусковых токов при

повторном включении с мягким коммутатором на защиту // Журнал Шанхайского университета Цзяо Тун. – 2024. – В печати.

43. Сюй Цянь. Исследование системы защиты и самовосстановления на основе 5G [D]: магист. дисс. – Северо-Китайский университет энергетики, 2022.

44. Китайская энергетическая газета. Уровень автоматизации распределительных сетей в Хайнане достиг 97,11% // 2025-03-05. – С. 1.

45. Saxegaard M., Novdelien O., Grorud M. и др. Экологическое воздействие SF₆ в энергосистемах // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021. – Т. 36, № 3. – С. 1500–1508.

46. Жао Цзяньлань, Лю Сяньфэн. Применение технологий электросетевой автоматизации в управлении распределительными сетями // Управление и обслуживание оборудования. – 2024. – № 2. – С. 14–16.

47. Чжао Г.Ц., Козлов А.Н. Оптимизация режимов распределительных сетей с переключательными пунктами в КНР // Материалы XXXIV научной конференции Амурского государственного университета «День науки». — Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2025. — С. 106–107.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК НА КИТАЙСКОМ ЯЗЫКЕ

1. Желтов А.М. Реклоузеры: история, строение и применение // Молодой ученый. – 2024. – № 7 (506). – С. 21–24. – URL: <https://moluch.ru/archive/506/111307/>.
2. Юсупова А.С., Дебиев М.В., Магомадов Р.А. Внедрение реклоузеров для повышения надежности электроснабжения распределительной сети 6–10 кВ в сельской местности // Молодой ученый. – 2018. – № 23. – С. 252–255.
3. Ван Сыхуа (Wang Sihua). Выбор и применение реклоузеров в автоматизации распределительных сетей [Выбор и применение реклоузеров в автоматизации распределительных сетей] // Оборудование и материалы. – 2010. – № 12. – С. 66–69.
4. 肖思任, 赵丹, 刘晓敏 等. 分布式电源下配电网短路保护研究综述 [Xiao Siren, Zhao Dan, Liu Xiaomin et al. Review of Short-Circuit Protection in Distribution Networks with Distributed Power Sources] // 高电压技术 [High Voltage Engineering]. – 2023. – 第 49 卷 第 7 期. – 页 3006–3019. – DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220922.2
5. 张雄. 配电网建设中无功补偿实践研究 [Zhang Xiong. Study on Reactive Power Compensation Practice in Distribution Network Construction] // 电气设备管理 [Electrical Equipment Management]. – 2024. – № 8. – С. 15–17.
6. 赵桢. 配电网安全运行存在问题及对策研究 [Zhao Zhen. Research on Problems and Countermeasures for Safe Operation of Distribution Networks] // 通信电源技术 [Telecommunication Power Technology]. – 2024. – Т. 41, № 19. – С. 246–249.
7. 魏春元. 考虑运行优化需求的智能配电网多维数据分析 [Wei Chunyuan. Multidimensional Data Analysis for Smart Distribution Networks Considering Operational Optimization Requirements] // 中国能源研究院硕士论文 [Master Thesis, Chinese Institute of Energy Research]. – 2021.

8. 李璐. 基于可靠性的配电网运维策略研究 [Li Lu. Research on Reliability-Based Maintenance Strategies of Distribution Networks] // 北京交通大学硕士学位论文 [Master Thesis, Beijing Jiaotong University]. – 2006.
9. Taslimov A.D., Самиев Ш.С. Инновационные технические решения при проектировании распределительных электрических сетей // Электроснабжение и электротехника. – 2020. – № 5. – С. 33–38.
10. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Многокритериальная оптимизация режимов распределительных электросетей в условиях случайности // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 7. – С. 42–45.
11. Яхин Ш.Р., Пигалин А.А., Галиев И.Ф., Маклецов А.М. Анализ нагрузочных режимов и регулировочной способности по напряжению распределительной сети при оптимизации секционирования на ее участках // Энергетика и управление. – 2020. – № 3. – С. 13–21.
12. 国家电网公司. 配电网自动化技术规范 Q/GDW 376-2009 [State Grid Corporation of China. Technical Specifications for Distribution Network Automation Q/GDW 376-2009] // 中国电力出版社 [China Electric Power Press]. – 北京, 2009.
13. IEEE Std 37.100–1992. IEEE Standard Definitions for Power Switchgear. – New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1992.
14. Esmaeilzadeh M., Alizadeh-Sherayeh H., Tohidifar E., Mazaheri-Kalahrodi A., Ahmadi I. Distributed generation: Protection problems, optimal placement // Majlesi Journal of Energy Management. – 2015. – Vol. 4, № 2. – P. 1–10.
15. 马晓波, 柯德平, 孙元章. 含分布式电源配电网保护方案的比较分析 [Ma Xiaobo, Ke Deping, Sun Yuanzhang. Comparative Analysis of Protection Schemes for Distribution Networks with Distributed Generation] // 武汉大学学报 (工学版) [Journal of Wuhan University (Engineering Edition)]. – 2016. – 第49卷第4期. – 页603–609+634. – DOI: 10.14188/j.1671-8844.2016-04-020
16. 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心. 中国电力可靠性年度报

告 (2019) [China Electricity Reliability Annual Report (2019)] // 中国电力出版社 [China Electric Power Press]. – 北京, 2020. – С. 45–47.

17. Васильева Т.Н., Мишина Е.С. Оценка возможности установки реклоузера на отходящих линиях подстанций Рязанского региона // Молодой ученый. – 2015. – № 6. – С. 132–137.

18. Maximov B.K., Vorotnitskiy V.V. Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей с применением реклоузеров // Материалы конференции “Энергетика в сельском хозяйстве”. – Смоленск, 2014. – С. 24–28.

19. S&C Electric Company. Руководство по продукту RER615 для внешних реклоузеров [Product Manual for RER615 Outdoor Reclosers]. – 2018. – С. 44–60. – URL: <https://library.e.abb.com/public/>

20. 曹丽佳, 王翠. 配电网自动化对供电可靠性的影响研究 [Cao Lijia, Wang Cui. Study on the Impact of Distribution Network Automation on Supply Reliability] // 水力发电与技术 [Hydropower and Technology]. – 2024. – 第7卷第6期. – 页66–70.

21. 国家电网江苏省公司、南通供电公司、国家电网全球能源互联网研究院. 基于大数据的配电网状态评估与预警方法: 专利号 201610837927.X [State Grid Jiangsu Electric Power Company et al. State Evaluation and Early Warning Method for Distribution Network Based on Big Data: Patent No. 201610837927.X]. – 2017-03-08.

22. 彭凡, 刘卫东, 吴法辉, 胡志敏, 杨定成. NB-IoT 技术在电力系统中的应用研究 [Peng Fan, Liu Weidong, Wu Fahui, Hu Zhimin, Yang Dingcheng. Application of NB-IoT Technology in Power Systems] // 无线通信 [Wireless Communication]. – 2018. – 第 8 卷 第 4 期. – 页 189–197. – DOI: 10.12677/HJWC.2018.84022

23. 张成, 陈煜, 李灿 等. 风电并网下配电网无功优化研究 [Zhang Cheng, Chen Yu, Li Can et al. Optimization of Reactive Power in Distribution Network with

Wind Turbine Power Injection] // 南方能源基础设施 [Southern Energy Infrastructure]. – 2025. – 第 12 卷 第 1 期 . – 页 168–176. – DOI: 10.16516/j.ceec.2024-293

24. Nikoofekr I., Sadeh J. Nature of fault determination on transmission lines for single phase autoreclosing applications // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2018. – Vol. 12, № 4. – P. 903–911.

25. Srivastava I., Bhat S., Vardhan B.V.S., Bokde N.D. Fault detection, isolation and service restoration in modern power distribution systems: A review // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 19. – Art. 7264. – DOI: 10.3390/en15197264

26. 蔡晓, 李明, 潘宇, 袁倩, 卢宇. 基于在线用电监测仪的台区线损分段分析 [Cai Xiao, Li Ming, Pan Yu, Yuan Qian, Lu Yu. Analysis of Line Loss Segmentation in Substation Area Based on Online Electricity Monitoring Instrument] // 农村电气化 [Rural Electrification]. – 2023. – № 5. – 页 44–47, 61. – DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2023.05.011

27. Россети Сибирь. Годовой отчет за 2023 год [Rosseti Siberia. Annual Report for 2023]. – URL: <https://www.rosseti-sib.ru> (дата обращения: 30.05.2025).

28. Gonen T. Electric Power Distribution Engineering. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – P. 450–460.

29. Short T.A. Electric Power Distribution Equipment and Systems. – Boca Raton: CRC Press, 2020. – P. 200–210.

30. IEEE Std C37.60–2012. IEEE Standard for Automatic Circuit Reclosers and Fault Interrupters for Alternating Current Systems. – IEEE Standards Association, 2012. – 123 p.

31. ABB. Distribution Automation Handbook [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation> (дата обращения: 30.05.2025).

32. 南方电网公司. 广东农村电网改造报告 [Southern Power Grid. Guangdong Rural Grid Transformation Report]. – 2023. – URL: <https://www.csg.cn> (дата обращения: 30.05.2025).

33. Tavrida Electric. Automatic Circuit Recloser – Fundamentals [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://www.tavrida.com> (дата обращения: 30.05.2025).
34. Rosseti. Annual Report 2010 [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: <https://www.rosseti.ru> (дата обращения: 30.05.2025).
35. NOJA Power. OSM Recloser Technical Manual [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.nojapower.com> (дата обращения: 30.05.2025).
36. IEC 61850-5. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation. – International Electrotechnical Commission, 2020. – 204 p.
37. 袁惠. 备自投及重合闸装置在电磁环网中的配合 [Yuan Hui. Compatibility of ATS and Recloser Devices in Electromagnetic Loop Networks] // 农村电气化 [Rural Electrification]. – 2015. – № 3. – 页53–54.
38. 饶建兰, 刘先锋. 电力自动化技术在配电网运行管理中的应用 [Rao Jianlan, Liu Xianfeng. Application of Power Automation Technology in Distribution Network Operation Management] // 设备管理与维修 [Equipment Management and Maintenance]. – 2024. – № 2. – 页14–16.
39. 杨军, 何金波, 陈晨辉 等. 基于数据驱动的低压配电网故障检测方法 [Yang Jun, He Jinbo, Chen Chenhui et al. Data-Driven Fault Detection Method in Low-Voltage Distribution Networks] // 内蒙古电力技术 [Inner Mongolia Electric Power Technology]. – 2023. – 第41卷第5期. – 页28–34.
40. 李文君, 段登伟, 朱雨 等. 基于5G通信模式下的配电网自愈保护应用 [Li Wenjun, Duan Dengwei, Zhu Yu et al. Self-Healing Protection in Distribution Networks under 5G Communication Mode] // 电力系统保护与控制 [Power System Protection and Control]. – 2022. – 第50卷第24期. – 页152–159.
41. 韩晋, 谢思先, 范坤 等. 基于5G通信的配电网自愈控制系统设计 [Han Jin, Xie Sixian, Fan Kun et al. Design of Self-Healing Control System for Distribution Network Based on 5G Communication] // 电力信息与通信技术 [Electric Power Information and Communication Technology]. – 2025. – 第23卷第

2期. – 页86–93.

42. 杨增力, 王若琪, 胡炎 等. 含柔性软开关有源配电网故障恢复合闸时冲击电流对电流保护的影响 [Yang Zengli, Wang Ruoqi, Hu Yan et al. Impact of Inrush Current During Reclosing with Flexible Soft Switch in Active Distribution Networks on Current Protection] // 上海交通大学学报 [Journal of Shanghai Jiao Tong University]. – 2024. – 待刊.

43. 徐潜. 基于5G通信技术的配电网保护与自愈控制系统研究 [Xu Qian. Research on Protection and Self-Healing Control System of Distribution Network Based on 5G Communication Technology] // 华北电力大学硕士学位论文 [Master Thesis, North China Electric Power University]. – 北京, 2022.

44. 海南配电自动化有效覆盖率达97.11% [Automation Coverage in Hainan Distribution Network Reaches 97.11%] // 中国电力报 [China Electric Power News]. – 2025-03-05. – (1).

45. Saxegaard M., Hovdelien O., Grorud M., Bekkadal F. Environmental impact of SF₆ in power systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2021. – Vol. 36, № 3. – P. 1500–1508.

46. Жао Цзяньлань, Лю Сяньфэн. Применение технологий электросетевой автоматизации в управлении распределительными сетями // Управление и обслуживание оборудования. – 2024. – № 2. – С. 14–16.

47. Чжао Г.Ц., Козлов А.Н. Оптимизация режимов распределительных сетей с переключательными пунктами в КНР // Материалы XXXIV научной конференции Амурского государственного университета «День науки». — Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2025. — С. 106–107.