

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Абу Ршид Аисар



ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, ПАРАМЕТРОВ И АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ
ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Устинов Д.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ.....	11
1.1 Отличительные особенности систем распределенной генерации	11
1.2 Влияние распределенной генерации на релейную защиту электротехнических комплексов.....	14
1.3 Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты электротехнических комплексов	16
1.4 Анализ применения дистанционной защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией	20
1.5 Выводы к Главе 1	31
ГЛАВА 2 СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ	33
2.1 Анализ алгоритмов работы защиты в системе с распределенной генерацией. 33	
2.1.1 Первый метод (с учетом поправочного коэффициента K , учитывающего подпитывающий эффект от дополнительных источников).....	33
2.1.2 Второй метод (с учетом выявленных зависимостей расстояния до точки повреждения от сопротивления с учетом подпитывающего эффекта)	35
2.1.3 Третий метод (основанный на эквивалентном преобразовании расчетной схемы методом Тевенина).....	36
2.1.4 Четвертый метод (основанный на преобразовании Стоквелла (Fast Discrete Stockwell Transform).....	38
2.2 Разработка алгоритма действия дистанционной защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей.....	44
2.3 Выводы к Главе 2	51
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ.....	52

3.1 Влияние нагрузки и источника питания на эффективность дистанционной защиты в сетях распределенной генерации.....	52
3.2 Создание модели исследования действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией и сбор данных для обучения и тестирования	58
3.2.1 Сбор данных для обучения и тестирования	59
3.2.2 Обучение нейронной сети в структуре защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией.....	65
3.3 Тестирование нейронной сети в составе защиты электротехнических комплексов.....	67
3.4 Экспериментальные исследования.....	72
3.5 Выводы к Главе 3	75
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ.....	76
4.1 Разработка структуры устройства защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией.....	76
4.2 Оценка показателей надежности защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией.....	85
4.3 Оценка чувствительности действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией.....	88
4.4 Аппаратная реализация дистанционной защиты в распределенной генерации.....	95
4.4.1 Стратегии аппаратной реализации защиты в системе с распределенной генерации.....	95
4.4.2 Беспроводные реле дистанционной защиты	98
4.5 Экономическое обоснование разработки систем электрозащиты, дистанционной защиты в системах распределенной генерации.....	100
4.6 Выводы к Главе 4	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	109

ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ В Статистические данные	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Схема Южного сектора Республики Сирия	1343

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одной из особенностей развития систем электроснабжения электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевого комплекса при применении принципов распределенной генерации является реализация электроснабжения от нескольких источников энергии разных типов и характеристик (фотоэлектрические элементы, ветряные электростанции, микротурбинные установки, дизельные электростанции), максимальное приближение источников питания к электрическим нагрузкам, использование накопителей энергии. Наличие таких установок вблизи потребителей снижает количественное потребление энергии за счет минимизации потерь электроэнергии в распределительных сетях. Однако, наличие разнотипных источников питания, потребителей электроэнергии с соизмеримой мощностью с источниками, большой разветвленностью распределительных сетей, может привести к некорректной работе систем релейной защиты: ложным срабатываниям, недостаточной чувствительности, неселективному действию [1-5]. Дистанционные защиты, которые в основном используются для защиты систем передачи, все чаще представляются как решение для обеспечения безопасности и повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов с сильным проникновением распределенной генерации [6]. Однако, из-за «эффекта подпитки от распределенных источников питания», из-за которого сопротивление, видимое дистанционным реле, отличается от фактического сопротивления прямой последовательности линии между местом повреждения и местом расположения реле, возникают сложности с настройкой и функционированием систем дистанционной защиты. Это обстоятельство требует разработки новых алгоритмов и схем защиты для обеспечения селективности и повышения чувствительности релейной защиты [7].

Степень разработанности темы исследования

Темам повышения селективности и чувствительности действия релейной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией

посвящены работы ученых: Абрамовича Б.Н., Александрова А.М., Аржанникова Е.А., Беякова Ю.С., Гондурова С.А, Небрата И.Л., Илюхина Е.В., Обабкова В.К., Шабада М.А., Шалина А.И., Сапункова М.Л., М. Abu Hamad Avenue, Duaa Khalil Ibrahim, Issam Abu al-Zahab, Ahmad F. Zobaa, Michael O'Donovan, Noel Barry, Joe Connell, Yuen Koy, Chung Hoon Lee, Woo-hyun Kim, Hak Joo Lee, Jun Oh Kim, Woo Kyu-chi and others. Scientists Gondourov S.A, Nebrat I.L., Shabad M.A., Fahad Hariri, Marisa Crowe, Varret Dzhezesov, H. Ali внесли значительный вклад в разработку алгоритмов дистанционных защит электротехнических комплексов в сетях с распределенной генерацией.

Однако в этих работах не рассмотрены особенности функционирования дистанционной защиты в сетях с распределенной генерацией и возможность обмена информацией между блоками электротехнических комплексов для повышения селективности и чувствительности действия защиты, не учтена возможность применения нейронных сетей, отсутствуют требования к линиям связи для обмена информацией между блоками электротехнических комплексов с дистанционной защитой для оценки расстояния до места повреждения [8].

Объект исследования – дистанционная защита электротехнических комплексов с распределенной генерацией.

Предмет исследования – структура и алгоритмы действия дистанционной защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией.

Цель работы – повышение чувствительности и селективности действия дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией.

Идея работы - повышение чувствительности и селективности действия дистанционной защиты на основе нейронных сетей в условиях вариации параметров электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией.

Поставленная в диссертации цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Провести анализ состояния и тенденций развития релейной защиты в системе с распределенной генерацией.

2. Установить влияние изменения параметров защищаемых присоединений в условиях вариации параметров электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией на эффективность действия дистанционной защиты.

3. Разработать метод функционирования дистанционной защиты, реагирующей на изменение параметров электротехнических комплексов и топологии сети с распределенной генерацией.

4. Разработать алгоритм действия дистанционной защиты электротехнических комплексов с применением нейронных сетей в системе с распределенной генерацией с обеспечением требуемой чувствительности и селективности действия.

5. Определить требования к линиям связи для обмена информацией между блоками электротехнических комплексов с дистанционной защитой для оценки расстояния до места повреждения.

6. Выполнить экономическое обоснование разработки систем дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией.

Научная новизна работы:

1. Выявлены зависимости влияния изменения параметров электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией на эффективность действия дистанционной защиты на основе нейронных сетей.

2. Разработан метод определения зон чувствительности для дистанционной защиты, реагирующей на изменение параметров электротехнических комплексов и топологии сети с распределенной генерацией.

3. Разработана структура нейронной сети для функционирования дистанционной защиты в составе электротехнического комплекса в системе с распределенной генерацией.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам:

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

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

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

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм действия дистанционной защиты в системе с распределенной генерацией с обеспечением требуемой чувствительности и селективности действия с помощью ИНС.

2. Предложено устройство дистанционной защиты в системе с распределенной генерацией на основе нейронных сетей, позволяющее обеспечить отстроенность от нагрузочных режимов.

3. Разработана структура и реализация аппаратно-программной системы защиты электротехнических комплексов в сети с распределенной генерацией на основе нейронных сетей.

4. Результаты диссертации подтверждены свидетельством о государственной регистрации патента на изобретение № 2821418 «Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией» от 24.06.2024 г. (Приложение А).

5. Результаты диссертации использованы в производственной деятельности ООО «Академия КЭТ» (акт внедрения от №03-А от 12.02.2024 г., Приложение Б) для повышения чувствительности и селективности дистанционных защит в сетях с распределенной генерацией за счет точного определения места повреждения.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы имитационного моделирования в системе Matlab Simulink, а также экспериментальные исследования посредством физического моделирования в лабораторных условиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение нейронных сетей в дистанционных защитах электротехнических комплексов позволяет повысить чувствительность и селективность защит, работающих в системе распределенной генерации.

2. Разработанная структура дистанционной защиты электротехнических комплексов позволяет снизить погрешность определения места повреждения и повысить надёжность функционирования дистанционной защиты к коротким замыканиям.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается использованием математических методов обработки статистических данных, применением лицензионного программного обеспечения для проведения расчетов, а также данными экспериментальных исследований, направленных на определение параметров электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией на эффективность действия дистанционной защиты на основе нейронных сетей.

Апробация результатов. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

1. XVII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (25-29.11.2024 г., г. Томск).

2. I Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики» (23 марта 2023 г., г. Севастополь).

3. Всероссийская научно-практическая конференция «ЭЛЭТ-2022: Электроэнергетика и электротехника» (21-23 декабря 2022 г., г. Саратов).

4. Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (1 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург).

5. 2-я Международная конференция по возобновляемым источникам энергии ICRE-24 Университет Алеппо – Сирия (27-28.08.2024 г., г. Алеппо).

Личный вклад автора включает анализ зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, разработке алгоритмов действия дистанционной защиты в сети с распределенной генерацией с обеспечением требуемой чувствительности и селективности с помощью ИНС, оценке влияния изменения параметров электрической нагрузки на эффективность защиты, разработка метода интеграции технологии нейронных сетей в системы дистанционной защиты для повышения чувствительности и селективности, проведении теоретических и экспериментальных исследований, в результате которых продемонстрировано повышение эффективности дистанционной защиты и снижение погрешности определения места повреждения.

Публикации. Результаты диссертации достаточной степени освещены в 5 печатных работах (пункты списка литературы № 52-55,73), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (Приложение А).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 11 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

1.1 Отличительные особенности систем распределенной генерации

Распределенная генерация (РГ) – это производство электроэнергии вблизи мест потребления, а не в централизованных электростанциях. РГ включает в себя широкий спектр источников энергии, таких как: солнечные фотоэлектрические системы, ветровые турбины, биоэнергетические установки, геотермальные электростанции, малые гидроэлектростанции, дизельные генераторы [9-11]. На рисунке 1 и в таблице 1 показаны новые мощности объектов распределенной генерации до 2032 г.

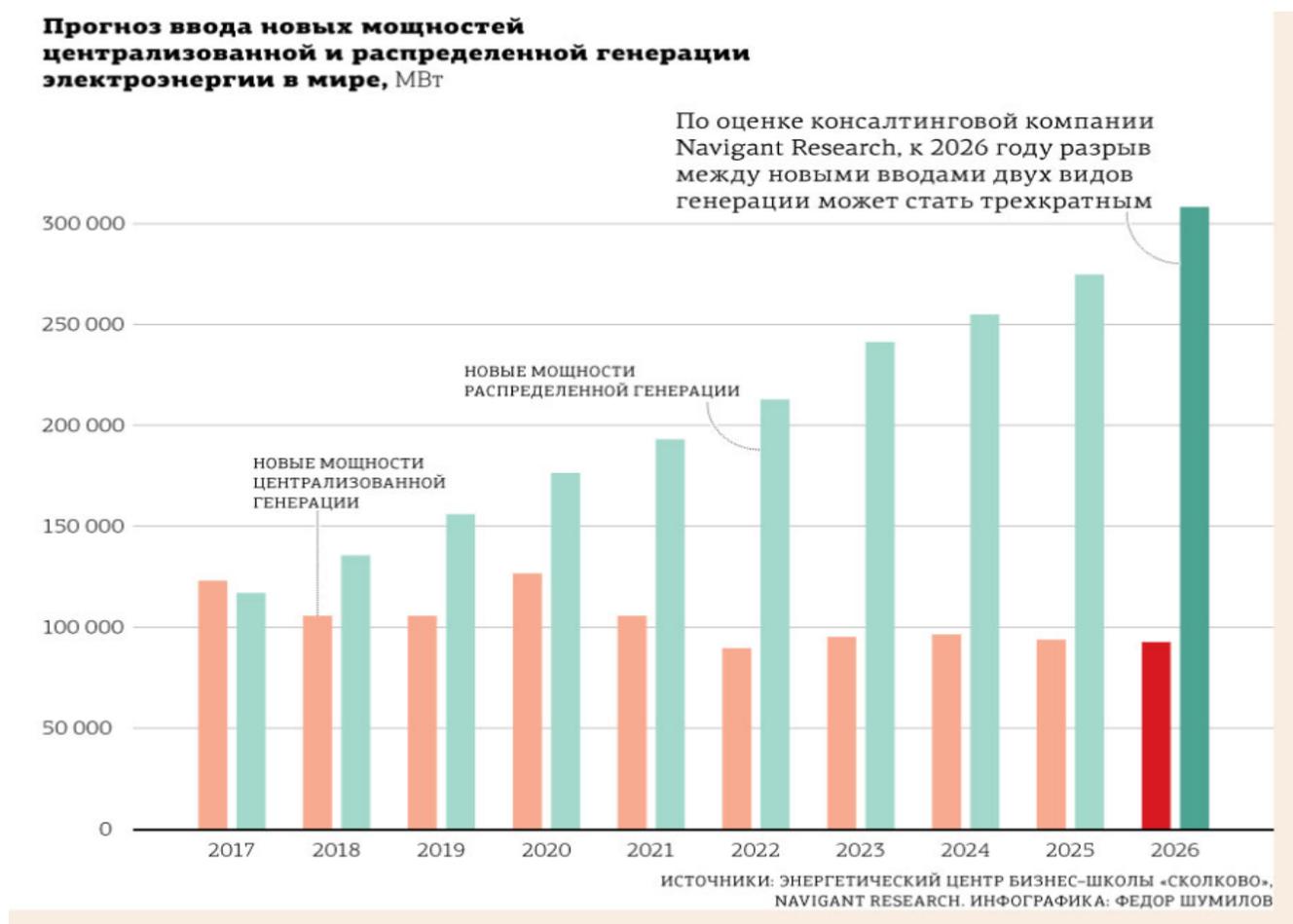


Рисунок 1 - Новые мощности объектов распределенной генерации [12]

Таблица 1 - Расширение распределенной генерации до 2032 года [13]

Отчет о покрытии	Подробности
Размер рынка в 2023 г.	297,79 млрд долл. США
Размер рынка к 2032 г	916,16 млрд долл. США

Продолжение таблицы 1.1

Отчет о покрытии	Подробности
Темпы роста с 2023 по 2032 гг.	13,3%
Охваченные регионы	Северная Америка Европа Азиатско-Тихоокеанский регион Латинская Америка Ближний Восток и Африка

Из статистических данных, представленных на рисунке 1 и в таблице 1, можно отметить, что в мире наблюдается значительное расширение использования технологий распределенной генерации, поэтому важно сосредоточиться на получаемых технических эффектах.

Расширение использования распределенной генерации (РГ) имеет решающее значение для развивающихся стран. Оно предлагает многогранный подход к решению энергетических проблем и содействию устойчивому развитию. Ниже приводится подробное объяснение его важности:

1. Решение проблемы доступа к энергии.

Распределенная генерация, особенно солнечные домашние системы и мини-сети, может охватить отдаленные и недостаточно обслуживаемые населенные пункты, где расширение центральной сети экономически затратно или технически сложно. Это обеспечивает доступ к электроэнергии для домохозяйств, школ и предприятий, улучшая жизнь и средства к существованию.

2. Повышение энергетической безопасности и надежности.

Распределенная генерация (РГ) снижает зависимость от централизованных электростанций и протяженных линий электропередачи, которые часто уязвимы из-за отключений в результате стихийных бедствий, сбоев в работе сетей или геополитических факторов. Это обеспечивает более гибкое и безопасное электроснабжение.

Распределенная генерация (РГ) может улучшить стабильность напряжения и качество электроэнергии в районах со слабыми или ненадежными сетями, что приведет к более эффективной работе приборов и оборудования и снижению потерь.

3. Содействие экономическому развитию и созданию рабочих мест.

Проекты распределенной генерации (РГ) могут принадлежать и эксплуатироваться на местном уровне, создавая местные рабочие места в сфере производства, монтажа, обслуживания и эксплуатации. Это стимулирует местную экономику и предпринимательство.

Надежная и доступная электроэнергия имеет решающее значение для экономического роста. Распределенная генерация может обеспечивать электроэнергией промышленные предприятия, поддерживать орошение и переработку сельскохозяйственной продукции, а также способствовать развитию новых проектов.

4. Содействие экологической устойчивости и борьба с изменением климата.

Распределенная генерация часто использует возобновляемые источники энергии, такие как солнечная энергия, энергия ветра, биомасса и гидроэнергия, что снижает зависимость от ископаемого топлива и сокращает выбросы парниковых газов. Это способствует достижению национальных и глобальных целей в области изменения климата.

Распределенная генерация с использованием биомассы или биогаза может способствовать внедрению устойчивых методов ведения сельского хозяйства и сокращению отходов за счет их преобразования в энергию.

5. Улучшение инфраструктуры.

Распределенная генерация устраняет необходимость в дорогостоящей и трудоемкой модернизации инфраструктуры передачи и распределения, особенно в быстрорастущих городских районах.

6. Содействие инновациям и технологическому прогрессу.

Распределенная генерация может стимулировать разработку и внедрение инновационных технологий, расширяя местное производство и опыт в области возобновляемых источников энергии и хранения энергии.

Распределенная генерация стимулирует децентрализованное планирование энергетики и участие сообщества, что приводит к более индивидуальным решениям, которые отвечают конкретным местным потребностям и приоритетам.

Несмотря на огромный потенциал, расширение распределенной генерации в развивающихся странах сталкивается с рядом проблем.

1. Получение доступного финансирования для проектов распределенной генерации может оказаться непростой задачей, особенно для небольших инициатив.

2. Для стимулирования инвестиций и упрощения процедур выдачи разрешений необходимы четкие и благоприятные нормативные базы.

3. Развитие местных технических знаний и опыта в области монтажа, эксплуатации и обслуживания имеет решающее значение для долгосрочной устойчивости проектов распределенной генерации.

4. Управление изменчивостью возобновляемых источников энергии, таких как солнечная и ветровая энергия, требует решений по хранению энергии или стратегий интеграции в сеть.

1.2 Влияние распределенной генерации на релейную защиту электротехнических комплексов

Растущая интеграция объектов распределенной генерации (РГ) радикально меняет структуру современных электротехнических систем. Её влияние на системы защиты, принятые для распределительных систем, создает серьезные проблемы. Такие проблемы, как двунаправленный поток мощности, низкие уровни тока короткого замыкания, возникают в результате интеграции распределенной генерации [14].

Традиционные системы защиты основаны на предположении, что ток короткого замыкания течет от подстанции к месту короткого замыкания. Внедрение технологии распределенной генерации нарушает этот однонаправленный поток, что может привести к низким уровням тока короткого замыкания, обратному потоку мощности и помехам в работе защитных устройств. Эти проблемы могут повлиять на селективность, чувствительность и скорость

работы существующих систем защиты, что приведет к перебоям в подаче электроэнергии и повреждению оборудования.

Поэтому необходим комплексный обзор проблем, связанных с системами защиты электротехнических комплексов при интеграции объектов распределенной генерации.

Эти проблемы можно в целом классифицировать следующим образом:

1. Двухнаправленный поток электроэнергии. Обычные распределительные сети рассчитаны на однонаправленный поток электроэнергии от подстанции к нагрузке. Распределенная система создает двухнаправленный поток мощности, что может снизить эффективность систем защиты от сверхтоков. Ток короткого замыкания в системе с распределенной генерацией может протекать вверх по цепи, что может привести к неселективному срабатыванию вышестоящих защитных устройств [15,16].

2. Низкие уровни тока короткого замыкания. Вклад тока короткого замыкания распределенных генераторных установок, особенно инверторно-аккумуляторных, таких как солнечные фотоэлектрические установки, обычно ограничен из-за ограничения тока инвертора. Это может привести к низким уровням тока короткого замыкания, что затруднит быстрое и эффективное обнаружение и устранение неисправностей с помощью обычных реле максимального тока. Низкий ток короткого замыкания также может привести к задержке или невозможности отключения питания при удаленных неисправностях [17].

3. Ложное отключение. Прерывистый характер работы некоторых источников распределенной генерации, таких как солнечные фотоэлектрические системы и ветроэнергетика, может вызывать колебания напряжения и тока, что может привести к ложному отключению защитных устройств [18,19].

4. Проблемы регулирования напряжения. Распределенная система генерации может влиять на уровни напряжения в распределительной сети, особенно в периоды высокой выходной мощности. Это может повлиять на настройки и работу устройств защиты, зависящих от напряжения.

5. Проблемы координации защиты. Наличие объектов распределенной генерации может нарушить координацию устройств защиты, что приведет к проблемам селективности и потенциальной несогласованности [20].

1.3 Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты электротехнических комплексов

Влияние объектов распределенной генерации на системы защиты электротехнических комплексов зависит от нескольких факторов, включая их тип, параметры источников питания, местоположение в сети, характеристики тока короткого замыкания. Синхронные генераторы обеспечивают высокий вклад тока короткого замыкания, в то время как вклад тока короткого замыкания распределенных генераторных источников на основе инверторов обычно ограничен. Ветровые турбины могут иметь сложные характеристики тока короткого замыкания в зависимости от их типа и системы управления [21].

Проблемы переменных токов короткого замыкания в ветряных турбинах заключаются в следующем. В отличие от обычных синхронных генераторов, которые обеспечивают предсказуемый вклад в ток короткого замыкания, ветряные турбины демонстрируют широкий спектр поведения тока короткого замыкания. Это различие обусловлено двумя основными факторами: технология ветровых турбин и системой управления ветряными электростанциями. Различные типы турбин, такие как асинхронные генераторы с двойным питанием (DFIG) и турбины с преобразователем, имеют различные электрические характеристики и системы управления.

Современные ветряные электростанции используют системы управления для повышения производительности, поддержания устойчивости работы электротехнических комплексов и соблюдения нормативных требований по уровню напряжения и частоты. Эти системы управления, разработанные для нормальной работы, могут существенно оказывать влияние на режимы работы ветряных электростанций, в том числе изменять вклад тока короткого замыкания:

- активное управление мощностью: снижение выходной мощности для поддержания устойчивости системы или предотвращения перегрузки;

- управление реактивной мощностью: обеспечение поддержки реактивной мощности во время отклонения напряжения для повышения устойчивости сети, особенно во время регистрации неисправностей;

- отказоустойчивый переходный процесс: поддержание связности сети во время падений напряжения путем подачи реактивного тока для поддержки напряжения сети;

- стратегии ограничения тока: ограничение влияния токов короткого замыкания для защиты силовых электронных компонентов турбины.

Сложность режимов токов короткого замыкания в ветряных турбинах создает ряд проблем для традиционных систем электрической защиты, таких как ложное отключение: защитные реле, разработанные для синхронных генераторов, могут неправильно интерпретировать влияние изменяющихся токов короткого замыкания от ветряных турбин, что приводит к ненужным отключениям. Низкий ток короткого замыкания от ветряных турбин может замедлить время устранения неисправности, увеличивая риск повреждения оборудования и нестабильности системы. Влияние различных токов короткого замыкания от разных ветряных турбин на электростанции может затруднить точное определение источника неисправности, что снижает эффективность технического обслуживания и ремонта и, в частности, влияет на работу защит. Координация защитных реле в сети с высоким уровнем проникновения ветровой энергии становится значительно сложнее из-за динамичного и непредсказуемого характера токов короткого замыкания ветряных турбин. Традиционные схемы координации, основанные на фиксированных уровнях тока короткого замыкания, могут оказаться недостаточными.

Для эффективной интеграции ветроэнергетики в энергосистему необходимо понимать и решать проблемы, связанные с характеристиками тока короткого замыкания ветряных турбин. Для этого необходимо:

- точные модели ветряных турбин и их систем управления для моделирования поведения неисправностей и анализа их влияния на защиту сети;

- разработка систем защиты, способных адаптироваться к динамическому поведению токов короткого замыкания ветряных турбин. Это может включать использование интеллектуальных реле с усовершенствованными алгоритмами, которые могут различать нормальные и неисправные состояния при наличии изменяющихся сигналов.

Параметры объектов распределенной генерации напрямую влияют на величину тока короткого замыкания, который они вносят в систему. Более крупные распределенные генераторные установки могут оказывать большее влияние на эффективность системы защиты. Расположение распределенного генераторного блока в сети влияет на распределение тока короткого замыкания и режим напряжения.

Уровень проникновения систем распределенной генерации определяется как отношение мощности объектов распределенной генерации к общей нагрузке и оказывает значительное влияние на систему защиты. По мере увеличения уровня проникновения возрастают и проблемы, с которыми сталкивается система защиты [22,23].

Предположим, что радиальный распределительный фидер защищен реле максимального тока, действующей на выключатель QF1 (рисунок 2).

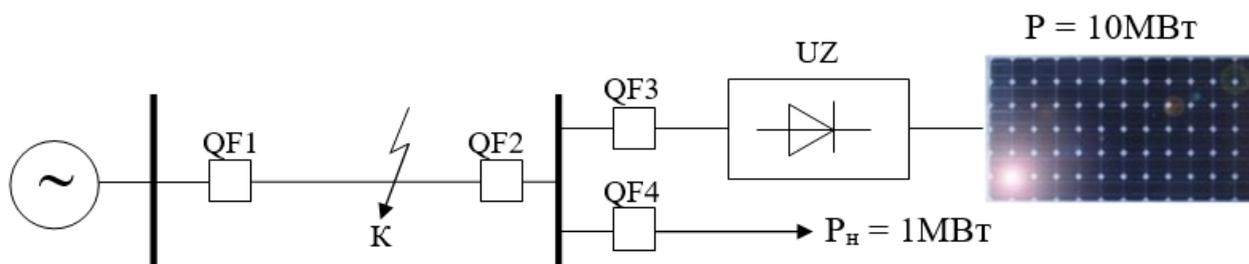


Рисунок 2 - Схема подключения солнечной электростанции к общественной сети [24] (составлено автором)

СЭС обеспечивает нагрузку 1 МВт. К шинам, к которым подключена нагрузка, также подключена фотоэлектрическая батарея мощностью 10 МВт.

Авторы в [24,25] рассмотрели два сценария работы этой схемы.

Сценарий 1. Без фотоэлектрических панелей. При возникновении короткого замыкания в точке К реле максимального тока обнаружит ток короткого

замыкания, текущий от подстанции, и подаст сигнал на отключение выключателя QF1. Подстанция в первую очередь влияет на величину тока короткого замыкания.

Сценарий 2. Включение в работу фотоэлектрических панелей будет способствовать увеличению тока короткого замыкания. Кроме того, ток короткого замыкания от фотоэлектрических панелей может течь в обратном направлении, что может привести к срабатыванию устройств защиты, воздействующий на QF3. Поскольку инверторы фотоэлектрических систем имеют ограничение по току, общий ток короткого замыкания может быть ниже тока короткого замыкания, ожидаемого от сети, что затрудняет эффективное обнаружение и устранение неисправностей. Подобные случаи повторялись и в южном секторе Сирии, когда вблизи промышленных горнодобывающих комплексов была введена в эксплуатацию станция мощностью 10 МВт. Поэтому системы защиты должны разрабатываться с учетом изменений в структуре сети.

Характеристики нагрузки существенно влияют на производительность и работу систем релейной защиты, особенно, дистанционной защиты. Игнорирование этого требования может привести к неисправности.

Вот объяснение того, почему нагрузка важна для дистанционной защиты. Дистанционные реле работают, измеряя сопротивление в месте расположения реле и сравнивают его с заданной настройкой. Эта настройка (диапазон) зависит от сопротивления защищаемой линии. Однако ток нагрузки, протекающий по линии, также вносит свой вклад в измеряемое сопротивление. В условиях большой нагрузки видимое сопротивление реле может быть значительно снижено. Если реле настроено без учета нагрузки, измеренное сопротивление при большой нагрузке может попасть в зону срабатывания реле, даже, если нет неисправности. Это называется перерегулированием и приводит к ложным срабатываниям во время нормальной работы [26,27].

В некоторых случаях, особенно при длинных линиях или высокоомных неисправностях вблизи дальнего конца, ток нагрузки может увеличить сопротивление, обнаруживаемое реле, из-за сложного взаимодействия с

индуктивностью и емкостью линии. Это повышенное сопротивление может вывести измеренное сопротивление за пределы области срабатывания реле даже при наличии неисправности. Это может привести к тому, что реле не срабатывает при возникновении неисправности в защищаемой зоне.

Внезапные изменения нагрузки или выработки электроэнергии могут вызвать колебания мощности. Во время колебаний мощности сопротивление, определяемое реле, может выходить за пределы его рабочих характеристик, что может привести к нежелательному срабатыванию.

Тип нагрузки также оказывает влияние на режим работы систем защиты. Резистивные нагрузки обычно оказывают более предсказуемое влияние на импеданс, чем двигательные нагрузки, которые могут вносить реактивные компоненты и быстро меняться [28].

Таким образом, настройки диапазона необходимо тщательно рассчитывать, принимая во внимание максимальный ожидаемый ток нагрузки и сопротивление линии. Зачастую для этого используются статические характеристики нагрузки и моделирование для определения областей эксплуатации реле.

Характеристики M_{ho} (тип характеристики дистанционного реле) можно регулировать для уменьшения влияния нагрузки. Это может включать компенсацию цепи M_{ho} или использование четырехугольных характеристик, которые менее восприимчивы к изменениям нагрузки.

Логика обхода нагрузки является распространенной техникой. Это подразумевает мониторинг тока и напряжения нагрузки и использование этой информации для регулировки чувствительности реле или его полного отключения, когда нагрузка слишком велика [29,30].

1.4 Анализ применения дистанционной защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией

Помимо некоторых исследований, направленных на поиск решений, в настоящее время изучается несколько передовых технологий защиты для решения проблем интеграции систем распределенной генерации электроэнергии, наиболее важными из которых являются [31].

Защита на основе искусственного интеллекта: алгоритмы искусственного интеллекта, такие как машинное обучение и глубокое обучение, можно обучить анализировать данные с датчиков и сетей связи для обнаружения и классификации неисправностей [32,33]. Удаленная защита на основе искусственного интеллекта способна адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, повышая точность и надежность систем защиты. Именно это и рассматривается в данном исследовании. Необходимо проанализировать традиционные методы дистанционной защиты и продемонстрировать необходимость разработки алгоритмов для достижения требуемого уровня чувствительности. Выбор подходящего решения по защите зависит от конкретных характеристик распределительной сети, системы распределенной генерации, режима нагрузки, параметров неисправности и других факторов. Моделирование электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией необходимо для анализа влияния данной системы на систему защиты и проверки эффективности различных решений.

Концепция защитного реле - это искусство управления работой реле, чтобы гарантировать надежность и безопасность его работы. Дистанционные реле являются наиболее подходящими защитными устройствами для линий электропередачи по всему миру [34]

Дистанционная защита основана на оценке полного сопротивления линии путем сравнения тока, проходящего через реле, и напряжения в точке установки реле. Длина защищаемого участка обычно делится на три зоны или более. Каждая зона покрывает часть защищаемого участка, основного или резервируемого. Например, зона 1 обычно покрывает около 85% длины линии от шины А до шины В. Зона 2 охватывает всю длину линии, соединяющей шину А и шину В, плюс часть длины следующей линии и так далее для оставшейся зоны, как показано на рисунке 3 [35].

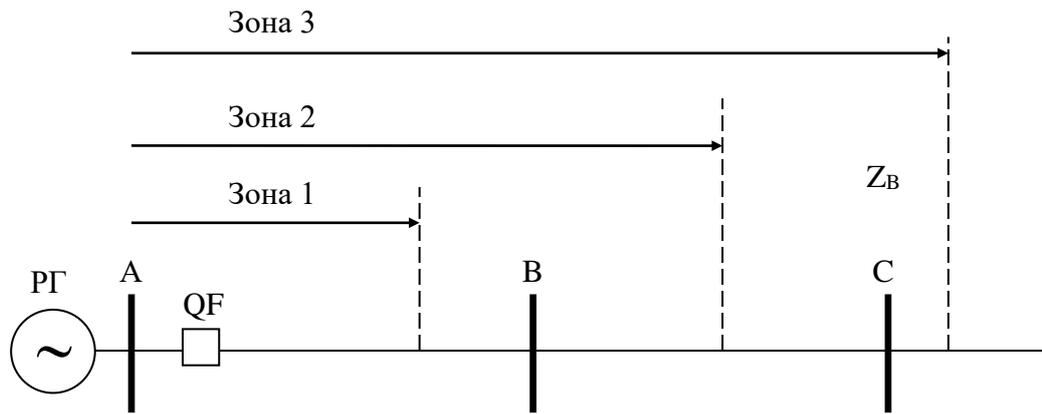


Рисунок 3 - Дистанционные зоны релейной защиты для радиальной системы [32]

Дистанционное реле, расположенное на шине А, измеряет напряжение (V) и ток (I) на базовой частоте через трансформатор напряжения (ТВ) и трансформатор тока (ТА), управляющие работой дистанционной защиты. Полное сопротивление реле составляет (1,2):

$$Z_R = \frac{V_R}{I_R} \quad (1)$$

$$V_R = I_R \cdot \alpha \cdot Z_{line} \quad (2)$$

где V_R и I_R - значения напряжения и тока, измеренные реле, представляют расстояние между точкой реле и точкой повреждения,

Z_{line} - полное сопротивление защищаемой линии,

$\alpha = 0 \dots 1$ - математический коэффициент, показывающий изменение сопротивления линии от ее начала до конца ($\alpha = 0, Z_{line} = 0$, соответствует началу линии), ($\alpha = 1, Z_{line} = Z_{line}$, - концу линии).

Значение полного сопротивления Z_R для короткого замыкания на F1 равно (3):

$$Z_R = \alpha \cdot Z_{lineAB} \quad (3)$$

а при коротком замыкании F2 (формула 4):

$$Z_R = Z_{lineAB} + \alpha \cdot Z_{lineBC} \quad (4)$$

Эффект питания приводит к тому, что полное сопротивление, воспринимаемое реле, оказывается больше, чем фактический импеданс прямой последовательности между реле и точкой повреждения, что может привести к

снижению чувствительности действия защиты. На рисунке 4 приведена характеристика срабатывания дистанционной защиты.

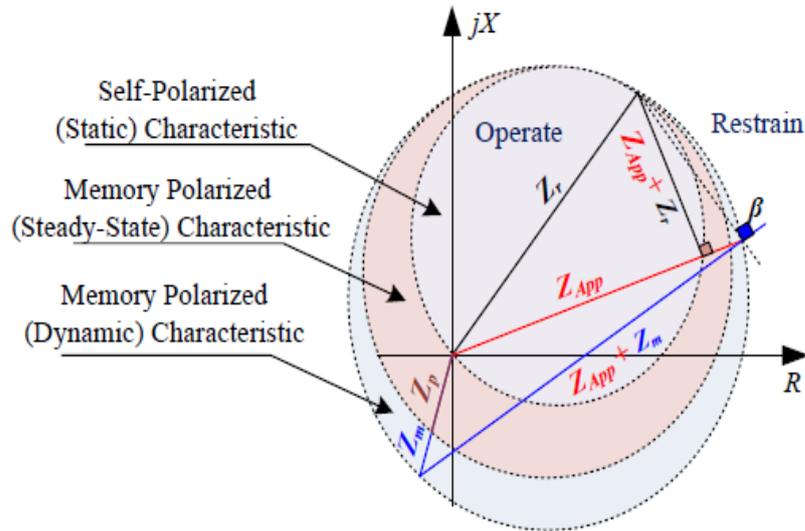


Рисунок 4 - Характеристики Mho [36]

Рассмотрим радиальный распределительный фидер с источником генерации на шине В (рисунок 5). Трехфазное короткое замыкание происходит на шине С. Дистанционная защита расположена на шине А. Рассмотрим показания реле при питании точки КЗ с одним дополнительным источником (рисунок 5а) и с несколькими дополнительными источниками (рисунок 5б). На рисунке 5б к одной шине подключено более одной линии РГ.

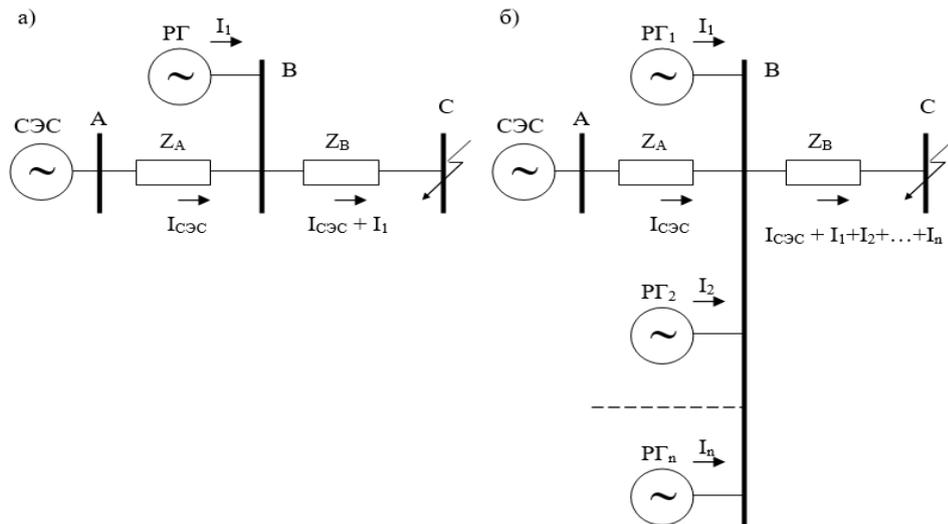


Рисунок 5 - Влияние объектов РГ питания на дистанционную защиту [32]:

- а) с одним объектом РГ, подключенным к шине В; б) с несколькими объектами РГ, подключенными к шине В

В случае трехфазного короткого замыкания на шине С измеренное напряжение ДЗ на шине А составляет (5):

$$V_A = I_{\text{СЭС}}Z_A + (I_{\text{СЭС}} + I_1)Z_B \quad (5)$$

Полное сопротивление прямой последовательности до места повреждения, измеренное ДЗ, составляет (6):

$$\begin{aligned} Z_{\text{ДЗ}} &= Z_A + \left(1 + \frac{I_1}{I_{\text{СЭС}}}\right)Z_B, \\ Z_{\text{ДЗ}} &= Z_A + Z_B + K \cdot Z_B \end{aligned} \quad (6)$$

где K определяется как постоянная питания ($K = \frac{I_1}{I_{\text{СЭС}}}$).

Основываясь на уравнении 6, ДЗ при шине А измеряет импеданс, превышающий фактический импеданс между шиной А и точкой повреждения. Дополнительный импеданс $K \cdot Z_B$ влияет на работу ДЗ, снижая чувствительность, (формула 7).

$$V_A = I_S Z_A + (I_{\text{СЭС}} + I_1 + I_2 + \dots + I_n) \quad (7)$$

Импеданс прямой последовательности линии до точки повреждения, измеренный ДЗ, (формула 8):

$$Z_{\text{ДЗ}} = Z_A + \left(1 + \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{I_{\text{СЭС}}}\right)Z_B = Z_A + Z_B + K_n \cdot Z_B, \quad (8)$$

где K_n - постоянная питания $\left(\frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{I_{\text{СЭС}}}\right)$,

n - количество РГ, подключенных к шине В.

Полное сопротивление линии для системы на рисунке 6 показано, как функция расстояния. Понятно, что эффект питания изменяет измеренный импеданс ДЗ на шине А. Если в системе нет РГ, импеданс, измеренный ДЗ, равен фактическому импедансу линии, который пропорционален наклону отрезка $A'B'$. Интеграция РГ в систему изменяет импеданс, измеренный ДЗ, который пропорционален наклону отрезка линии $B'C'$ (рисунок 6).

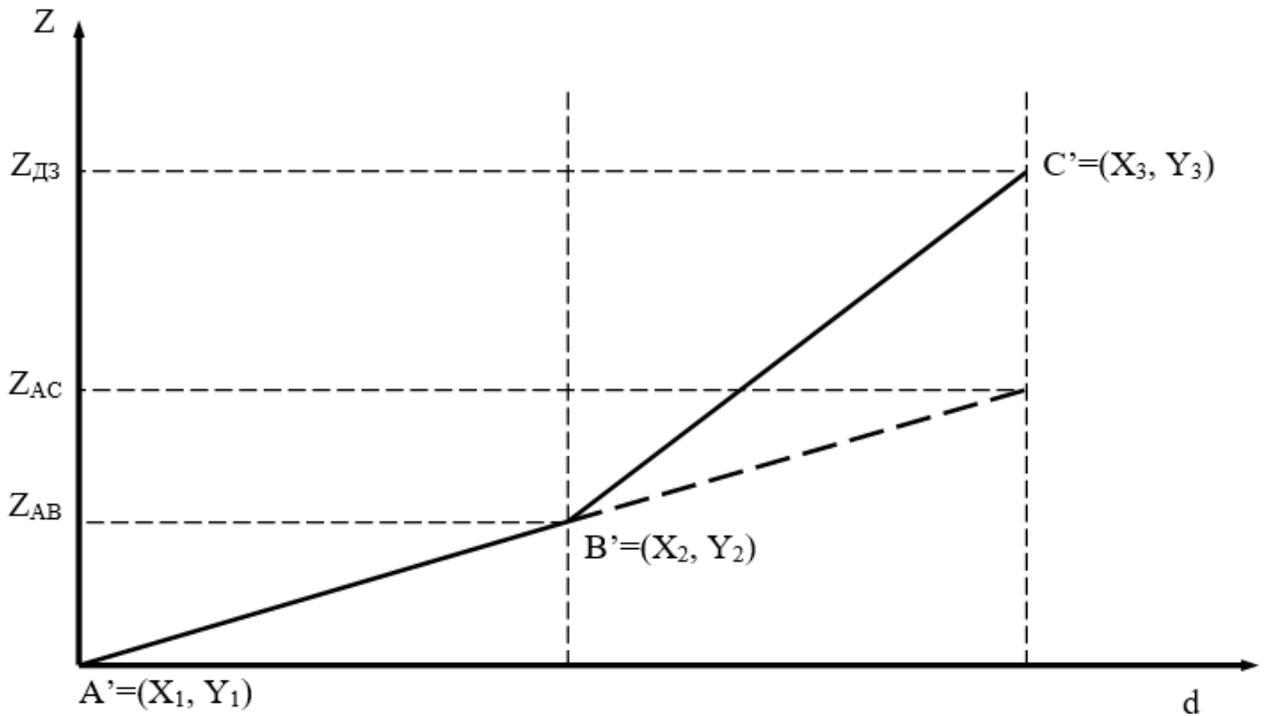


Рисунок 6 - Влияние объектов РГ на дистанционную защиту [21]

Уравнения (9) и (10) представляют импеданс, измеренный ДЗ на основе наклона отрезков линии:

$$Z_{ДЗ,AB} = m_{AB} \cdot d = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot d, \quad (9)$$

где $Z_{ДЗ,AB}$ - измеренный импеданс ДЗ, если короткое замыкание происходит в линии АВ и m_{AB} - наклон линии $A'B'$;

d - расстояние от места расположения реле до точки повреждения.

Если в линии ВС возникает неисправность, импеданс, видимый ДЗ, может быть рассчитан, как (10):

$$Z_{ДЗ,BC} = m_{BC} \cdot d = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \cdot d \quad (10)$$

где $Z_{ДЗ,BC}$ - измеренное полное сопротивление линии, которое видит ДЗ на шине А из-за неисправности на линии ВС;

m_{BC} - это наклон линии ВС.

Рассмотрим радиальный распределительный фидер с двумя источниками питания на шинах В и С (рисунок 7 а). В случае трехфазного на шине D, прямая последовательность полного сопротивления линии до точки повреждения, измеренное ДЗ на шине А, будет (11,12):

$$V_A = I_{CЭС} \cdot Z_A + (I_{CЭС} + I_2) Z_B + (I_{CЭС} + I_2 + I_3) Z_C \quad (11)$$

$$Z_{ДЗ} = Z_A + (1 + K_1)Z_B + (1 + K_2)Z_C \quad (12)$$

где K_1 - поправочный коэффициент ($K_1 = \frac{I_1}{I_{СЭС}}$) линии BC,

K_2 - поправочный коэффициент ($K_2 = \frac{I_1+I_2}{I_{СЭС}}$) линии CD.

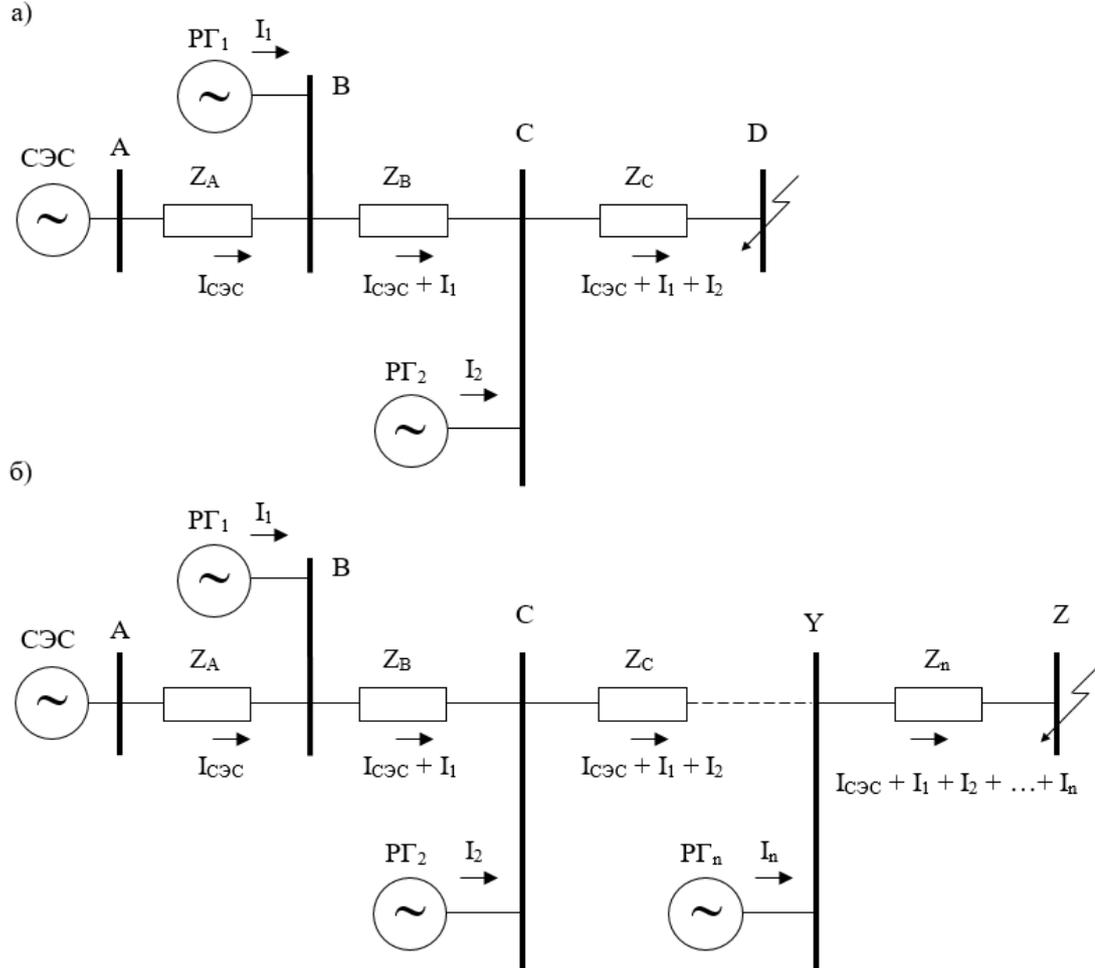


Рисунок 7 - Влияние объектов РГ на дистанционную защиту [32]:

а) с объектами РГ, подключенными к шинам В и С; б) с объектами РГ, подключенными к шинам (обобщенный случай)

Если в фидере имеется n РГ, как показано на рисунке 7 полное сопротивление линии прямой последовательности до места повреждения, видимое ДЗ на шине А, равно (13,14):

$$V_A = I_{СЭС} \cdot Z_A + (I_{СЭС} + I_2)Z_B + (I_{СЭС} + I_2 + I_3)Z_C + \dots + (I_{СЭС} + I_2 + I_3 + \dots + I_n)Z_Z \quad (13)$$

$$Z_{ДЗ} = Z_A + (1 + K_1)Z_B + (1 + K_2)Z_C + \dots + (1 + K_n)Z_Z \quad (14)$$

Таким образом, показано, что влияние системы распределенной генерации вызывает изменение значения полного сопротивления, рассчитанного дистанционными защитами, и поэтому алгоритмы работы этих защит должны быть усовершенствованы.

Существует несколько исследований, в которых представлены математические методы коррекции значения импеданса для дистанционной защиты [32-40].

Однако в этих работах не рассмотрены особенности функционирования дистанционной защиты в сетях с распределенной генерацией, не учитывалась возможность применения нейронных сетей, не рассматривалась возможность обмена информацией между блоками электротехнических комплексов для повышения селективности и чувствительности действия защиты, отсутствуют требования к линиям связи для обмена информацией между блоками электротехнических комплексов для оценки расстояния до места повреждения.

Поэтому необходимо на основе исследований сформировать научную основу для разработки нового алгоритма работы дистанционной защиты электротехнических комплексов в сетях с распределенной генерацией на основе искусственной нейронной сети. Нейронные сети могут использоваться для динамической настройки системы дистанционной защиты в соответствии с изменяющимися параметрами электрических комплексов, обеспечивая большую эффективность. Предыдущие исследования не фокусировались на влиянии огромного количества данных, которые требуются нейронным сетям для обучения, на точность результатов, и это может представлять собой проблему в таких областях, как дистанционная защита. Сложно собрать реальные данные о случаях быстрых, кратковременных неисправностей.

Несмотря на технические проблемы, нейронные сети представляют собой многообещающий подход к дистанционной защите и предлагают ряд преимуществ по сравнению с традиционными системами. Ожидается, что благодаря постоянному развитию в области искусственного интеллекта эта технология станет более эффективной и точной, что сделает ее идеальным

решением для улучшения систем защиты электрических комплексов в сетях с распределенной генерацией.

Для реализации идеи применения технологии искусственного интеллекта для дистанционных защит электротехнических комплексов с распределенной генерацией необходимо обеспечение информационных данных о режимах работы источников питания, нагрузки с разных точек распределительной сети. Выполним анализ устройств дистанционных защит электротехнических комплексов на предмет возможности обмена данными.

Известны устройства токовых защит линий электропередачи с ответвлениями [41] которые содержат реле тока, реле направления мощности, выходы которых соединены с логическими элементами, подающие сигналы на реле времени и исполнительные органы.

Недостатком указанных устройств является низкая чувствительность при коротких замыканиях за трансформатором ответвлений.

Недостатком устройств токовых защит является наличие реле тока только в месте установки защиты, что не позволяет учесть влияние дополнительных источников питания, наличие ответвлений и обеспечивает низкую чувствительность при коротких замыканиях за трансформаторами ответвлений.

Известно устройство дистанционной защиты линий электропередачи с ответвлениями [42], которое состоит из измерительного органа сопротивления, токовый вход которого соединен с трансформатором тока в месте установки защиты, а вход напряжения - с трансформатором напряжения системы шин в месте установки защиты. Выход измерительного органа сопротивления связан с входом органа выдержки времени, выход которого соединен с входом исполнительного органа. Выход исполнительного органа является выходом устройства в целом.

Недостатком является наличие измерительного органа сопротивления, получающего сигналы от трансформатора тока и трансформатора напряжения системы шин только в месте установки защиты, с одного конца линии.

Известно устройство дистанционной защиты линии электропередачи от повреждения [43], которое содержит измерительные трансформаторы тока и напряжения и дистанционный измерительный орган с одним входом по току и одним входом по напряжению, на выходе которого включен исполнительный орган, также дополнительно введены фильтры аварийной составляющей тока и напряжения, включенные соответственно между выходами указанных измерительных трансформаторов тока и напряжения и входами дистанционного измерительного органа.

Недостатком является наличие измерительного органа сопротивления, получающего сигналы от трансформатора тока и трансформатора напряжения системы шин в месте установки защиты, с одного конца линии.

Известно устройство дистанционной [44], которое содержит датчики тока и напряжения, блок управления выключателем, блок отсчета времени срабатывания, модель защищаемой сети, блок настройки, выход которого подключен к первому входу модели защищаемой сети, первый выход модели защищаемой сети соединен с входом блока отсчета времени, второй выход модели защищаемой сети соединен с первым входом блока настройки, выход блока отсчета времени соединен с входом блока управления выключателем, также дополнительно введен блок регистрации, первый вход которого соединен с выходами датчиков тока, второй вход блока регистрации соединен с выходами датчиков напряжения, первый выход блока регистрации соединен со вторым входом блока настройки, второй выход блока регистрации соединен со вторым входом модели защищаемой сети.

Недостатком является наличие измерительного органа сопротивления, получающего сигналы от трансформатора тока и трансформатора напряжения системы шин только в месте установки защиты, с одного конца линии.

Известно устройство дистанционной защиты [45], которое содержит датчики тока и напряжения, блок управления выключателем, первый и второй блоки моделирования короткого замыкания, блок сравнения, первый вход которого соединен с выходом первой модели короткого замыкания, второй вход

блока сравнения соединен с выходом второй модели короткого замыкания, а также снабжено блоком регистрации, дистанционным органом, блоком отсчета выдержки времени и блоком индикации, первый вход блока регистрации соединен с выходом датчика тока, второй вход блока регистрации соединен с выходом датчика напряжения, выход блока регистрации соединен со входами первого и второго блоков моделирования короткого замыкания, вход дистанционного органа соединен с выходом блока сравнения, первый выход дистанционного органа подключен ко входу блока отсчета выдержки времени, второй выход подключен ко входу блока индикации, выход блока отсчета выдержки времени подключен ко входу блока управления выключателем.

Недостатком является наличие измерительного органа сопротивления, получающего сигналы от трансформатора тока и трансформатора напряжения системы шин только в месте установки защиты, с одного конца линии.

Известно устройство для дистанционной защиты линии электропередачи с ответвлением [46], содержит измерительный орган сопротивления, выход которого подключен к входу органа выдержки времени, соединенного с входом исполнительного органа, выход которого является выходом устройства. Дополнительно содержит канал связи между подстанциями по концам линии, устройство передачи сигналов по каналу связи, устройство приема сигналов от канала связи, два сумматора, причем второй вход второго сумматора является инвертирующим, и преобразователь тока в напряжение. Вход устройства передачи сигналов подключен к трансформатору тока противоположного конца линии, а выход связан с входом канала связи, выход которого связан с входом устройства приема сигналов, соединенного выходом со вторым входом первого сумматора, первый вход которого подключен к трансформатору тока линии в месте установки защиты, к которому также подключен вход преобразователя тока в напряжение, выход которого связан со вторым входом второго сумматора, первый вход которого подключен к трансформатору напряжения системы шин в месте установки защиты, выход первого сумматора подключен к токовому входу

измерительного органа сопротивления, а выход второго сумматора подключен к входу напряжения измерительного органа сопротивления.

Недостатком является наличие входного сигнала с противоположного конца защищаемой линии в измерительный орган сопротивления только от трансформатора тока.

Таким образом, необходимо разработать структуру устройства дистанционной защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией, в котором имеется возможность обмена данными о режимах работы источников питания и нагрузки.

1.5 Выводы к Главе 1

1. Выполнен анализ систем релейной защиты электроустановок в сетях распределенной генерации. Установлено, что при проектировании систем релейной защиты необходимо учитывать конфигурацию распределительных сетей, параметры источников питания и режимы работы нагрузок.

2. Традиционные типы систем релейной защиты показывают, что их применение для электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией может быть сопряжено с трудностями обеспечения требуемой чувствительности и селективности.

3. Выполнен анализ устройств дистанционных защит электротехнических комплексов с распределенной генерацией. Показано, что для реализации идеи применения технологии искусственного интеллекта для дистанционных защит электротехнических комплексов с распределенной генерацией необходимо обеспечение информационных данных о режимах работы источников питания и нагрузки.

4. Дистанционные защиты, которые в основном используются для защиты систем передачи, все чаще представляются как решение для обеспечения безопасности и повышения эффективности функционирования распределительных систем с сильным проникновением распределенной генерации. Однако, из-за «эффекта источника питания от распределенных генераторов», из-за которого импеданс, видимый дистанционным реле,

превышает фактическое сопротивление прямой последовательности линии между местом повреждения и местом расположения реле, возникают сложности с настройкой и функционированием систем дистанционной защиты. Это обстоятельство требует разработки новых алгоритмов и схем защиты для обеспечения селективности и повышения чувствительности релейной защиты. Поэтому предлагается построить систему релейной защиты на базе дистанционной защиты с использованием нейронных сетей.

ГЛАВА 2 СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

2.1 Анализ алгоритмов работы защиты в системе с распределенной генерацией

Традиционная дистанционная защита основана на измерении импеданса (напряжение/ток) в месте расположения реле для определения расстояния до неисправности. Реле работает в зонах, каждая из которых соответствует определенной длине защищаемой линии. Ранее было показано, что наличие блоков распределенной генерации оказывает влияние на работу дистанционной защиты. Выполним анализ способов повышения чувствительности действия дистанционной защиты и сравним их по критериям стоимости реализации, точности реализации, количества необходимых входных данных.

2.1.1 Первый метод (с учетом поправочного коэффициента K , учитывающего подпитывающий эффект от дополнительных источников)

Для этого способа требуются следующие данные: (1) значение измеренного сопротивления в месте расположения реле; (2) знание мест расположения объектов РГ; (3) параметры линий электропередач [32].

В первом случае линия электропередачи содержит один источник питания, как показано на рисунке 5а. Уравнение сопротивления линии можно записать, как функцию от расстояния (15) и (16):

$$Z_{DR} = m \cdot d, \quad (15)$$

где m – наклон линии $A'B'$;

d - расстояние от места расположения реле до точки повреждения, $d = \frac{Z_{DR}}{m}$.

Схема с дополнительным генерирующим источником РГ, подключенным к шинам 2, представлена на рисунке 8. Предполагается, что координаты подстанции составляют $(x_1, y_1) = (0, 0)$, поскольку ДЗ находится на шине 1. Местоположение координаты РГ1 составляют (x_2, y_2) , где x_2 представляет расстояние от

местоположения ДЗ до шин 2 с объектом РГ1, а y_2 представляет фактическое полное сопротивление прямой последовательности линии от шин 1 с ДЗ до шин 2.

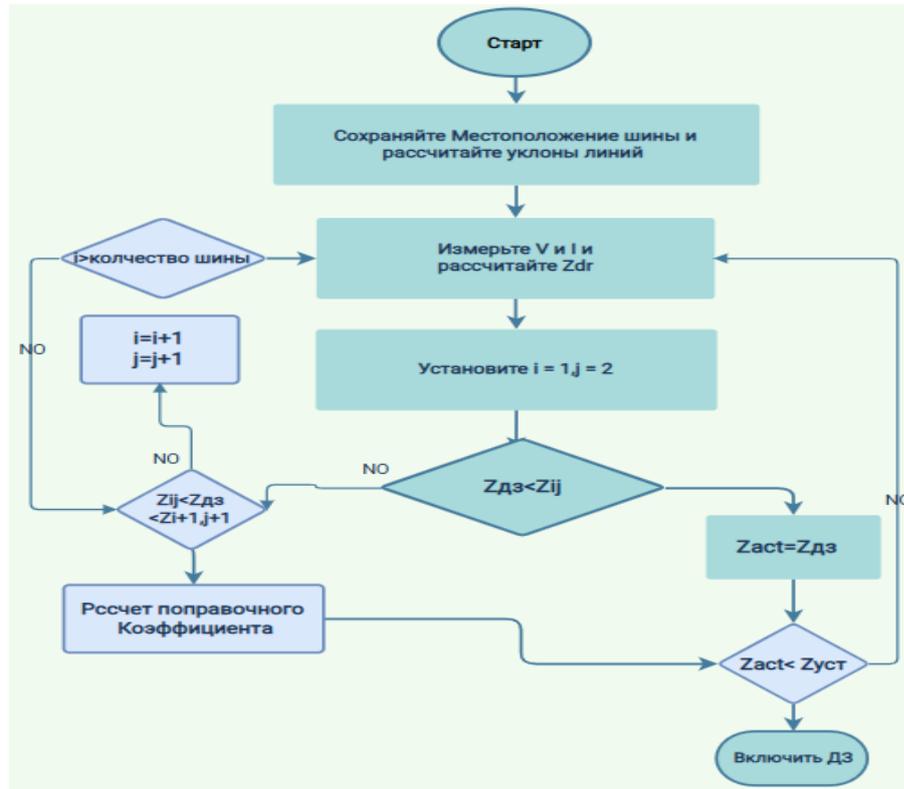


Рисунок 8 - Алгоритм с учетом поправочного коэффициента K , учитывающего подпитывающий эффект от дополнительных источников [32]

Расстояние x_3 от места ДЗ до шины 3 известно, но из-за эффекта питания полное сопротивление y_3 не равно сопротивлению прямой последовательности до шины 3. Следовательно, полное сопротивление y_3 может быть определено с использованием следующего уравнения (16):

$$y_3 = Z_{DR} = Z_{12} + Z_{23} + KZ_{23}, \quad (16)$$

где Z_{12} и Z_{23} – фактические сопротивления линии прямой последовательности,

K – постоянная питания ($K = \frac{I_1}{I_S}$).

Шаги для корректировки истинного значения сопротивления Z_{DR} будут следующими:

шаг 1 - расчет сопротивления в месте короткого замыкания, для данной системы.

шаг 2 - расчет тока короткого замыкания.

шаг 3 - расчет вкладов от каждого источника в значение тока короткого замыкания.

шаг 4 - фактическое сопротивление линии может быть найдено с помощью уравнения линии с учетом конфигурации схемы и наличия объектов РГ [33].

2.1.2 Второй метод (с учетом выявленных зависимостей расстояния до точки повреждения от сопротивления с учетом подпитывающего эффекта)

Способ 2 основан на построении двух зависимостей сопротивления от расстояния (ID Impedance Distance), аналогичной зависимости, показанной на рисунке 9.

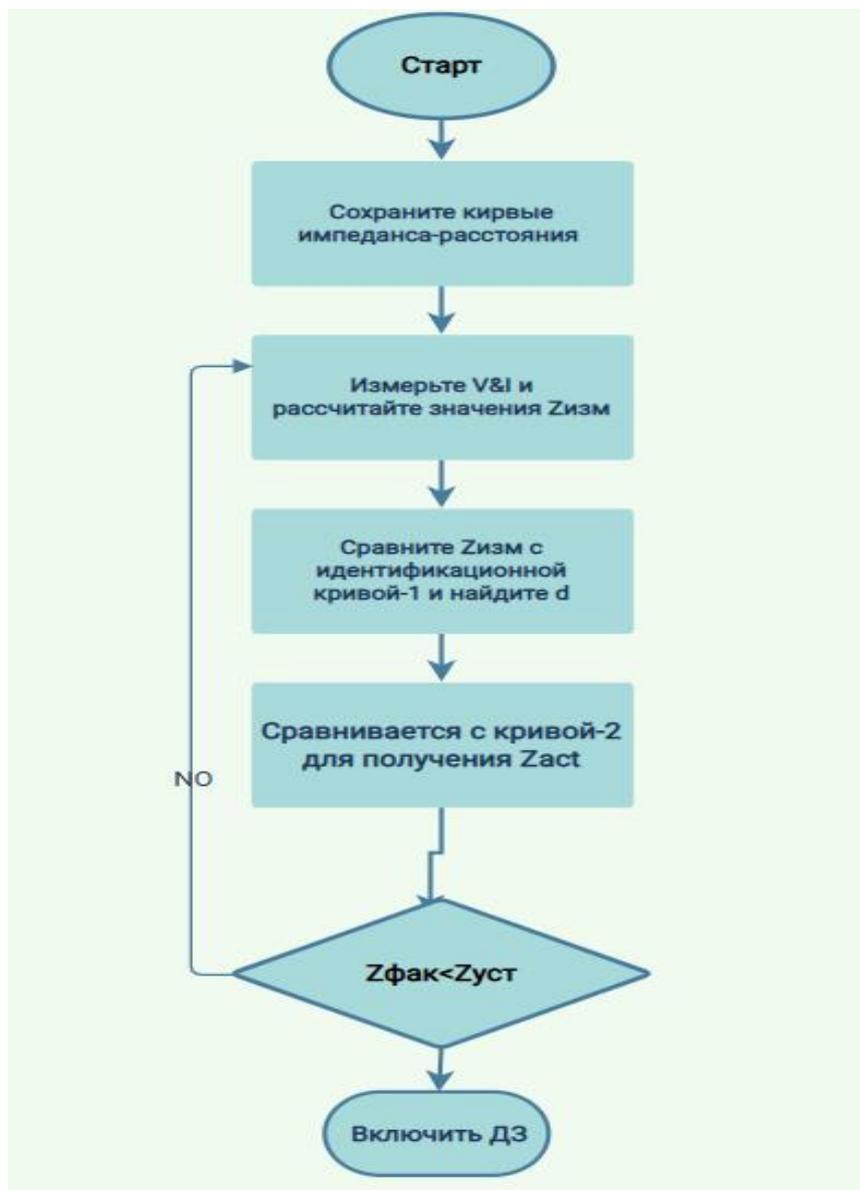


Рисунок 9 - Алгоритм с учетом выявленных зависимостей расстояния до точки повреждения от сопротивления с учетом подпитывающего эффекта [32]

Первая ID-кривая представляет соотношение между сопротивлением и расстоянием между шиной 1, на которой установлена ДЗ, и точкой КЗ с учетом влияния объектов РГ, а вторая ID-кривая представляет собой аналогичную первой зависимость, но без учета влияния объектов РГ. Зависимости сопротивления от расстояния должны быть сгенерированы в автономном режиме и сохранены в ДЗ. Хранение данных и автономных учетных записей (даже онлайн-учетных записей, если необходимо) несложно на современных реле с большой памятью. Чтобы найти фактическое сопротивление линии Z_{act} , нужно измеренное значение сопротивления Z_{meas} сравнить с ID кривой 1, чтобы найти значение, соответствующее расстоянию. Затем значение расстояния сравнивается с ID кривой 2, чтобы получить Z_{act} [32].

2.1.3 Третий метод (основанный на эквивалентном преобразовании расчетной схемы методом Тевенина)

Преимущество этого способа в том, что он не требует каких-либо автономных вычислений и основан только на локальных измерениях. Также требуется знание местоположения источника питания и его параметров. Эти данные вместе с параметрами линии, которые обычно известны и хранятся в РЗ как «входные данные», используются для иллюстрации принципа этого метода. На рисунке 10 показаны расчетная сеть и эквивалентная ей схема [47].

Система состоит из двух источников на шинах 1 и 2. Основным источником, SA, подключенный к шине 1, и вторым источником, SB, подключенный к шине 2. Мощность источника SB может быть соизмерима с мощностью источника SA либо отличаться, как в большую, так и в меньшую сторону [47].

Токи замыкания от источников SA и SB вносят вклад в общий ток замыкания, и, поскольку замыкание симметрично, каждый ток замыкания является током прямой последовательности.

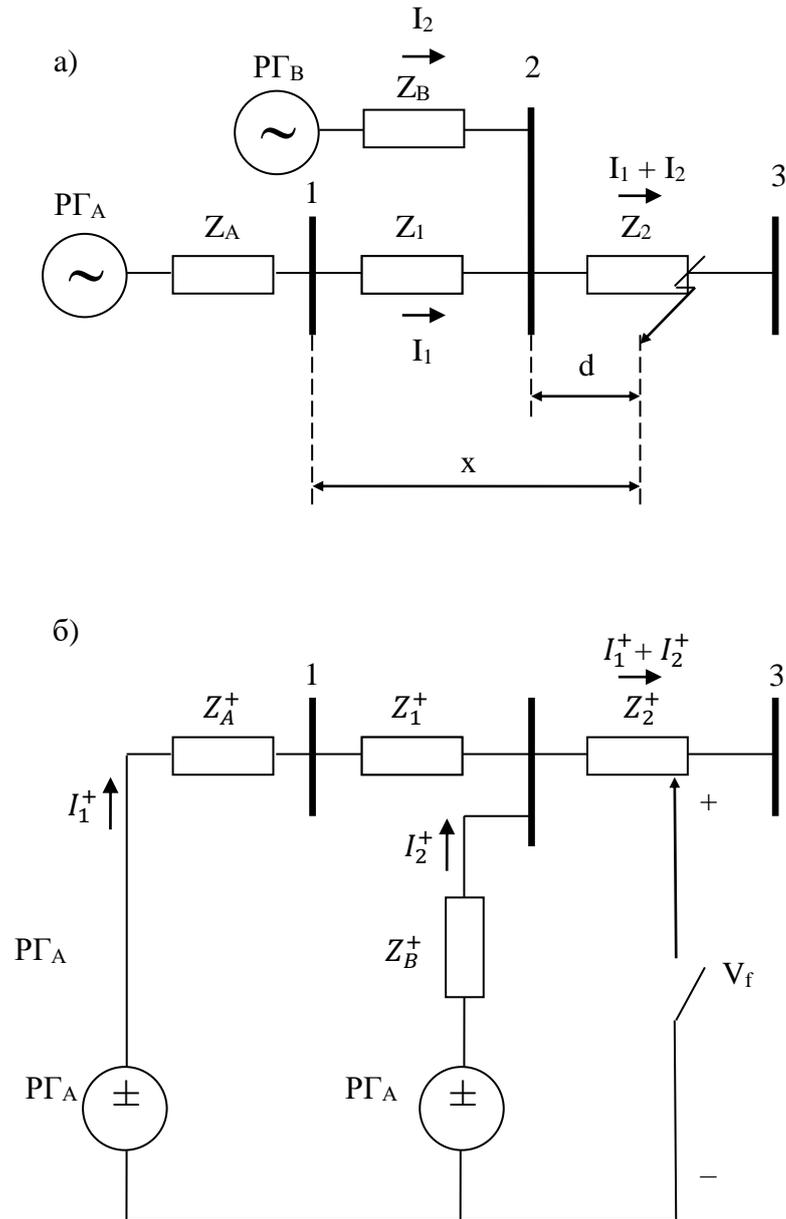


Рисунок 10 - Расчетная схема (а), эквивалентная схема (б) [47]

Этапы способа можно описать следующим образом:

1. Преобразование расчетной схемы: заменяем реальные источники питания идеальными источниками с ЭДС E_{SA} и E_{SB} и внутренним сопротивлением Z_A^+ и Z_B^+ .
2. Определение тока трехфазного короткого замыкания.
3. Определение фактического сопротивления до точки короткого замыкания (17):

$$Z_{DR,act} = x * (Z_1^+ + Z_2^+), \quad (17)$$

где x расстояние до места повреждения,

Z_1^+ и Z_2^+ – реальное сопротивление.

На рисунке 11 отражен алгоритм, основанный на эквивалентном преобразовании расчетной схемы методом Тевенина.

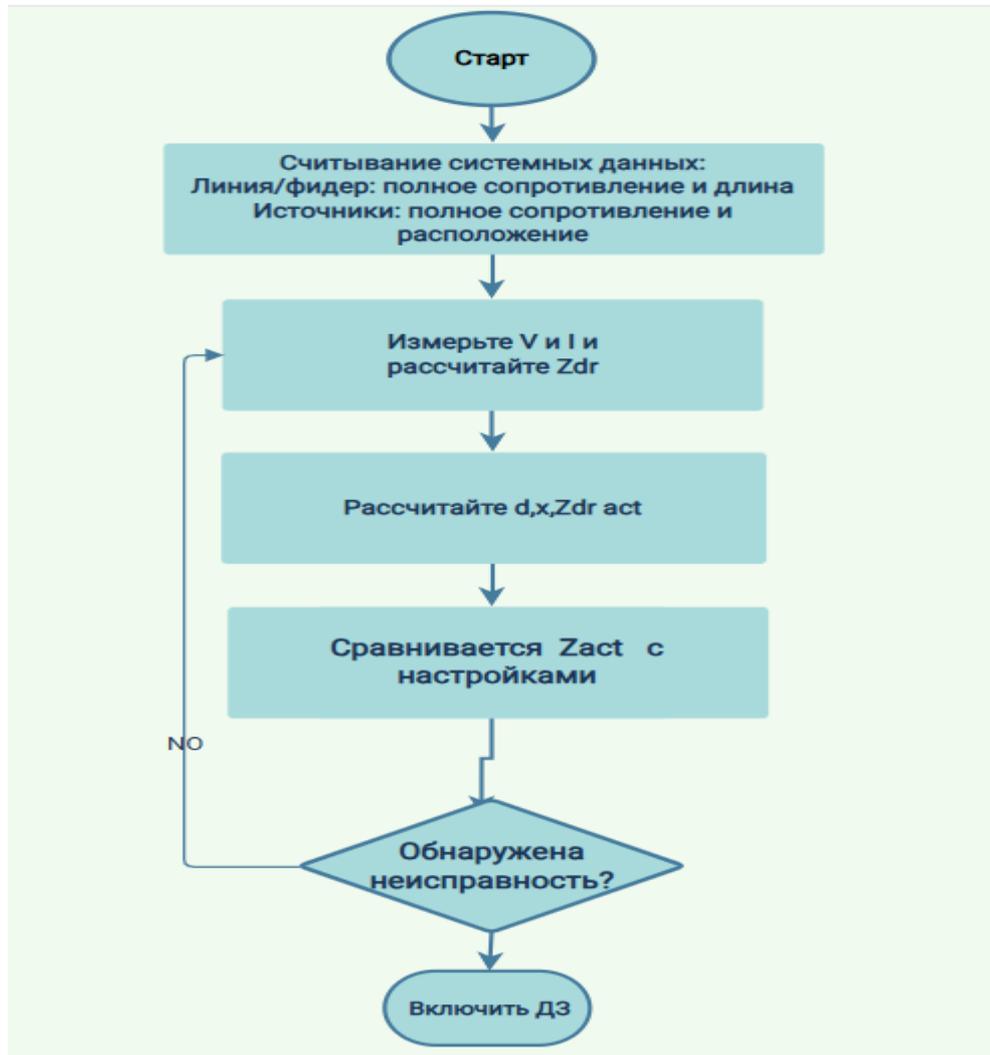


Рисунок 11 - Алгоритм, основанный на эквивалентном преобразовании расчетной схемы методом Тевенина [32]

2.1.4 Четвертый метод (основанный на преобразовании Стоквелла (Fast Discrete Stockwell Transform))

Алгоритм обнаружения неисправности основан на быстром дискретном преобразовании Стоквелла **FDST (Fast Discrete Stockwell Transform)**, что позволяет улучшить функции дистанционной токовой защиты и устранить недостатки при отказе в системах с распределенной генерацией [48].

Дискретное быстрое преобразование Стоквелла (FDST) — это метод анализа сигналов во времени и частоте. Это эволюция кратковременного преобразования Фурье (STFT) и непрерывного преобразования Стоквелла (S-

преобразования). Это преобразование направлено на улучшение кратковременного преобразования Фурье (STFT), сохраняя при этом некоторую его эффективность.

Объяснение FDST:

Анализ времени и частоты: FDST, как и STFT и другие методы анализа времени и частоты, раскладывает сигнал на его частотные компоненты по мере его изменения с течением времени. Это критически важно для анализа нестационарных сигналов, требуемых дистанционной защитой в топологически сложных сетях. То есть он работает с выборочными данными, а не с непрерывным сигналом.

FDST также имеет вычислительную эффективность. Он пытается ускорить вычисление исходного S-преобразования, что делает его более практичным для приложений реального времени или приложений, требующих интенсивных вычислений, таких как защита в сети распределенной генерации.

Параметры для обнаружения неисправности задаются с помощью уравнений, связанных с быстрым дискретным преобразованием Стоквелла, частотно-временного сигнала модулей дистанционной защиты, таких как обнаружение направления, выбор фазы и расчет сопротивления, что важно для селективности защиты.

Главное преимущество заключается в том, что преобразование FDST применяет оптимизированные алгоритмы (такие как преобразование FFT) для сокращения времени вычислений по сравнению с простым S-преобразованием. Это имеет решающее значение для приложений реального времени или обработки больших наборов данных.

Быстрое дискретное преобразование Стоквелла FDST дискретного временного ряда $x[kT]$, $k = 1, \dots, N$, соответствующего текущего сигнала $x(t)$, где интервал дискретизации равен T , может быть выражено в виде (18):

$$S_{(JT, n/nT)} = \sum_{m=1}^n [H^\circ W] \cdot e^{i2\pi m j/n} \quad (18)$$

где $n = 1, \dots, n-1$ и $m = 1, \dots, (n/2)$ представляют время и индексы частотных точек данного цикла.

Матрица H представляет собой повернутую матрицу, полученную в результате FFT (Fast Fourier Transform, быстрое преобразование Фурье), примененного к $x[kT]$. Матрица разбита на N локализованных векторов в виде (19):

$$H_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_2 & \cdots & x_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M+1} & \cdots & x_M \end{bmatrix} \quad (19)$$

где M равно $n/2$.

Член W в (20) представляет собой модифицированное двумерное (2D) окно Гаусса, приобретающее локализацию в частотной и временной областях. Окно 2D Gaussian определяется как (20):

$$W_{(m,n)} = e^{T_1} + e^{T_2} \quad (20)$$

где (21, 22):

$$T_1 = -\frac{2\pi^2(n-1)^2F}{(a+bm^c)^2}, \quad (21)$$

$$T_2 = -\frac{2\pi^2(N-n+1)^2F}{(a+bm^c)^2}. \quad (22)$$

В приведенном выше уравнении F коэффициент окна, b коэффициент масштабирования, который управляет числом колебаний в окне, a и c являются положительными константами. Значение параметра c , которое варьируется от 0 до 1, способствует захвату затухающих скрытых частот. N -смещенное гауссово окно используется в качестве фильтра для уменьшения вычислительной нагрузки дискретного S -преобразования путем фильтрации нежелательной частотной информации [48]. Чтобы получить оконную частотно-временную информацию, составная матрица H умножается на 2D гауссовский матричный элемент окна. Итак, G – это произведение матрицы H и W (23):

$$G = H \circ W \quad (23)$$

FDST, определенный по формуле 24, можно рассматривать как обратную быструю функцию Фурье. Преобразование (IFFT) каждого временного шага для каждой строки G (24):

$$S_{(JT,n/NT)} = IFFT[G] = \sum_{m=1}^N G \cdot e^{i2\pi mj/N} \quad (24)$$

Энергия быстрого дискретного преобразования Стоквелла S-энергия может быть вычислена матрицей FDST (25):

$$S_{Energy(t)} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S^{\wedge 2}_{(m,n)}| \quad (25)$$

В установившихся условиях S-энергия (S_{Energy}) представляет собой почти постоянный сигнал; однако она резко возрастает в переходных условиях. S-энергия является подходящим индикатором различных нарушений, включая отказы. На рисунке 12 показан алгоритм, основанный на преобразовании Стоквелла.

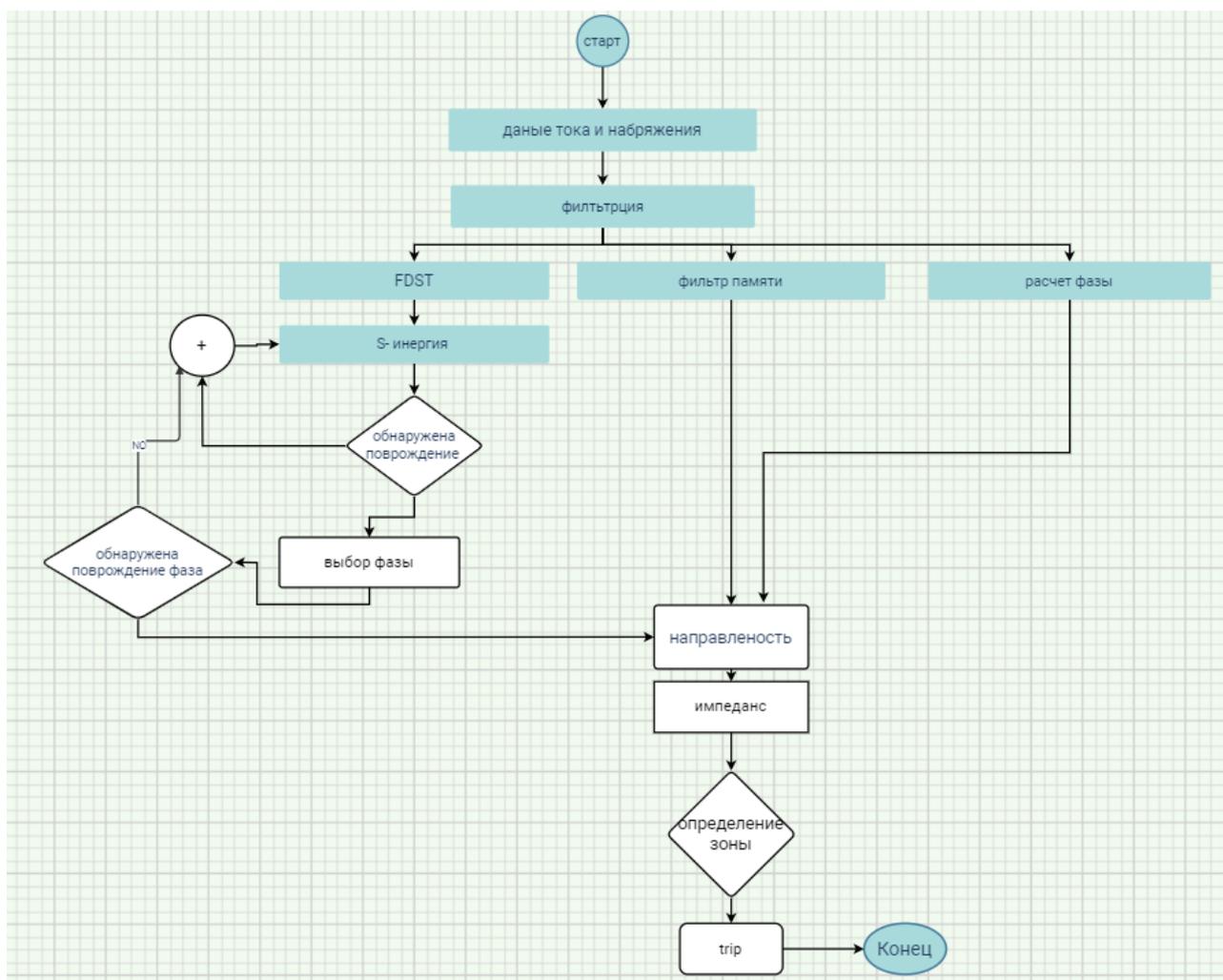


Рисунок 12 - Алгоритм, основанный на преобразовании Стоквелла [48]

Каждый из рассмотренных способов имеет свои достоинства и недостатки. Для выяснения различий выполнено их сравнение, сопоставлены различные особенности, включая совокупность необходимых расчетных данных, сложность расчета, стоимость реализации и точность результатов.

1. Необходимые данные и расчеты: все четыре способа требуют локальных измерений и системных данных для определения места повреждения. В дополнение к системным данным и локальным измерениям первый и второй способы требуют результатов автономных расчетов для определения места неисправности. Первый способ требует вычисления текущих значений в составе данных, которые должны храниться в ДЗ. Точно так же второй способ требует учета неподключенных источников питания для построения кривых (расстояние - сопротивление). Третий способ отличается от других тем, что не требует каких-либо офлайн-расчетов, а его функция полностью зависит от локальных измерений, четвертый способ требует локальных измерений и системных данных, но характеризуется вычислительной сложностью, несмотря на точность результатов.

2. Стоимость: рассмотренные способы не требуют добавления каких-либо измерительных или коммуникационных устройств, и, следовательно, не требуют дополнительных затрат на устройства.

3. Точность результатов: одним из наиболее важных показателей любого способа является его точность. Рассмотренные способы выполнения ДЗ были реализованы с использованием программы моделирования Matlab. Результаты подтвердили способность способов локализовать дефекты с высокой точностью при наличии эффекта питания. Третий способ оказался наименее точен, так как полностью зависит от онлайн-измерений, но снижение точности может быть компенсировано другими его преимуществами.

Исследование выполнено для четырёх рассмотренных способов. Были определены показания реле ДЗ при возникновении трехфазного короткого замыкания в разных зонах действия защиты [47].

Результаты исследований обобщены в таблицах 2, 3. Сопротивление приведено в относительных единицах (r_u) на основе величины положительного последовательного сопротивления, Z_c – измеренное сопротивление, Z_{act} – фактическое сопротивление, схема в рис 7, Z_{m1} , Z_{m2} и Z_{m3} – сопротивления, измеренные по рассмотренным способам 1-3, соответственно.

Таблица 2 - Сравнение предложенных способов (составлено автором)

Предлагаемые способы	Необходимые данные и расчеты	Стоимость	Точность результатов
Способ 1	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Очень низкая	Очень высокая
Способ 2	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Очень низкая	Очень высокая
Способ 3	Местные измерения Системные данные	Очень низкая	Высокая
Способ 4	Местные измерения Системные данные Офлайн-расчеты	Низкая	Очень высокая

Таблица 3 - Рабочие характеристики дистанционных реле (составлено автором)

Тип повреждения	Зона защиты	Z_{act} (pu)	Z_c	Z_{m1}	Z_{m2}	Z_{m3}
1	2	3	4	5	6	7
3L	1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
3L	1	0.7	2.39	0.7	0.7	0.7
3L	2	1.0	5.26	1.0	1.0	1.0
3L	вне зон	1.4	9.09	1.4	1.4	1.4

Увеличение количества источников возобновляемой генерации в системе распределения привело к увеличению тока питания, что, в результате, создало новые проблемы для системы электрозащиты. В этой главе выполнено сравнение четырех различных способов для устранения неправильной работы дистанционных реле. Предыдущие способы обеспечения селективности, повышения чувствительности дистанционных защит при наличии объектов распределенной генерации, были либо дорогими, либо малонадежными. Рассмотренные способы применимы к дистанционным реле, как в радиальных распределительных сетях, так и магистральных. Эти способы не требуют для работы каких-либо периферийных устройств или каналов связи и, таким образом, являются более экономичными по сравнению с другими решениями.

2.2 Разработка алгоритма действия дистанционной защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей

RBFN (Radial Basis Function Network) - сеть на основе радиальных базисных функций) – это нейронная сеть с прямой связью, которая имеет топологию трех слоев, а именно: входной слой с размерностью p_i , скрытый слой с размерностью a_i и выходной слой с размерностью p_0 [49]. Скрытый слой имеет переменное количество нейронов. В исследовании рассмотрен алгоритм обучения методом наискорейшего спуска для улучшения процесса обучения RBFN с меньшим количеством циклов. Архитектура сети с p_i входными и a_i скрытыми нейронами изображена на рисунке 13.

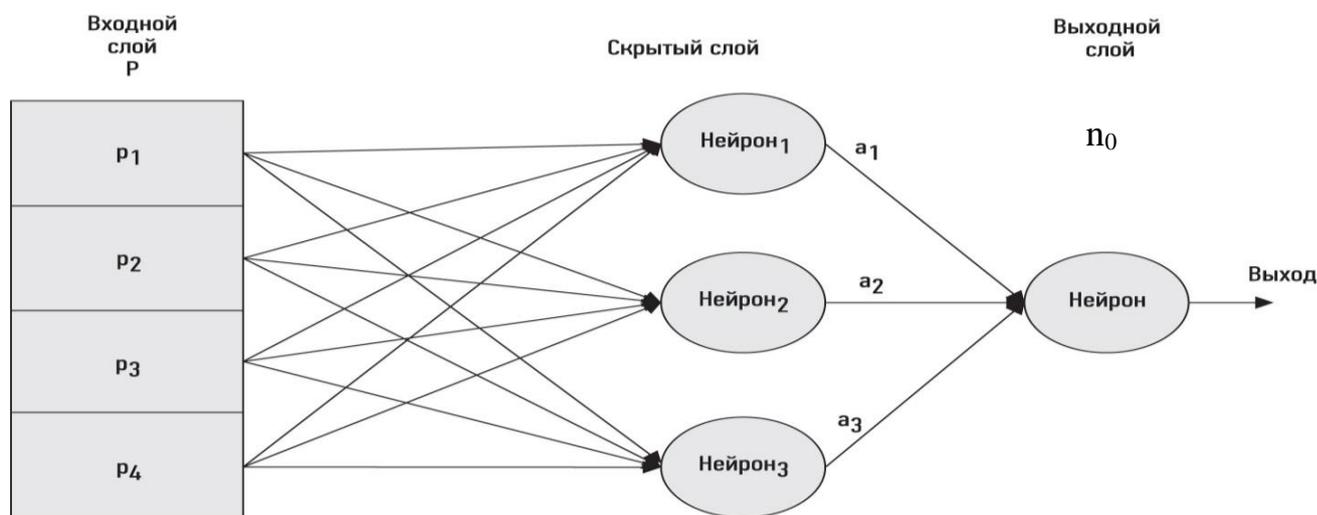


Рисунок 13 - Общая архитектура RBFN [49]

Классификация нейронных сетей и некоторые из их основных приложений. Нейронные сети можно классифицировать несколькими способами, наиболее важными из которых являются:

Архитектура: расположение слоев и соединений.

Модель обучения: как сеть обучается (контролируемая, неконтролируемая и т. д.).

Функция/применение: для чего предназначена сеть (классификация, регрессия, генерация и т.д.).

1. Классификация по архитектуре:

Это один из наиболее распространенных способов классификации нейронных сетей.

А. Нейронные сети прямого распространения (FFNN):

Описание: информация течет в одном направлении: вход \rightarrow скрытые слои \rightarrow выход. Нет циклов или петель. Это самый простой тип.

Типы:

Однослойный персептрон: самый простой, только с входным слоем и выходным слоем. Ограничен в том, чему он может научиться.

Многослойный персептрон (MLP): содержит один или несколько скрытых слоев между входным и выходным слоями. Позволяет изучать более сложные отношения. Функции активации, такие как ReLU, сигмоида или tanh, часто используются в скрытых слоях. Это тип, используемый в исследовании.

Для обучения нейронной сети типа RBFN и рассмотрения k -мерного входного вектора X вычисленные скалярные значения могут быть выражены, как (26):

$$Y = f(X) = W_0 + \sum_{i=1}^m W_i \varphi(D_i) \quad (26)$$

где W_0 – смещение,

W_i – весовой параметр,

m – количество нейронов в скрытом слое,

$\varphi(D_i)$ – радиальная базовая функция RBF (Radial Basis Function).

Теоретические исследования показали [49], что нелинейность $\varphi(D_i)$ не оказывает существенного влияния на точную форму и производительность RBFNN. По этой причине в данном исследовании была выбрана функция Гаусса в качестве базисной функции RBF (27):

$$\varphi(D_i) = \exp\left(\frac{-D_i^2}{\sigma^2}\right), \quad (27)$$

где σ – радиус кластера, представленный центральным узлом и обычно называемый шириной,

D_i – расстояние между входным вектором X и всеми центрами данных.

Расстояние D_i определяется выражением (28):

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^k (X - C_{ji})^2}, \quad (28)$$

где C_{ji} – центр кластера для любого из заданных нейронов в скрытом слое.

В RBFN предполагаемый выходной вектор Y может быть выражен как (29):

$$Y = [y_i] = W\Phi^T, \quad (29)$$

где $i = 1 \dots, n$,

T – время.

Следовательно, вектор ошибки E и его соответствующая сумма квадратичной ошибки J , которая должна быть минимизирована за счет обучения процесса, определяется как (30):

$$E = Y_d - Y = Y_d - W\Phi^T \quad (30)$$

$$J = \frac{1}{2}EE^T.$$

Следует отметить, что при использовании алгоритма наискрутейшего спуска, новые веса с использованием квадратичной ошибки J вычисляются как (уравнения 31-33):

$$\frac{\partial J}{\partial W} = \frac{\partial \left(\frac{1}{2}EE^T \right)}{\partial W} = (Y_d - Y) \frac{\partial Y}{\partial W} = E \frac{\partial (W\Phi^T)}{\partial W} = E\Phi, \quad (31)$$

$$\Delta W = \partial J = E\Phi, \quad (32)$$

$$W_{new} = W_{old} + \lambda \cdot \Delta W, \quad (33)$$

где λ – номинальная скорость обучения, которая остается постоянной в процессе обучения.

Оптимальная ориентация вектора дельта-веса в содержимом оценки первого порядка определяется по формуле 34:

$$J = \frac{1}{2} (Y_d - (W + \lambda \cdot \Delta W)\Phi^T)(Y_d - (W + \lambda \cdot \Delta W)\Phi^T)^T = \frac{1}{2} (E - \lambda \cdot \Delta W \cdot \Phi^T)(E - \lambda \cdot \Delta W \cdot \Phi^T)^T = \frac{1}{2} EE^T - \lambda \cdot E \cdot \Phi \cdot \Delta W^T + \frac{1}{2} \lambda^2 \cdot \Delta W \cdot \Phi^T \Phi \cdot \Delta W^T = A + B\lambda + C\lambda^2, \quad (34)$$

где $A = \frac{1}{2} EE^T$, $B = -E \cdot \Phi \cdot \Delta W^T$, $C = \frac{1}{2} \Delta W \cdot \Phi^T$;

Φ , ΔW , T – скалярные константы.

Таким образом, $J(W + \lambda \cdot \Delta W)$ является квадратичной функцией от скорости обучения λ с постоянными коэффициентами A , B и C . Следовательно, $J(\lambda)$ определяет квадратичную функцию от Φ с положительными коэффициентами при члене второго порядка. $J(\lambda)$ можно минимизировать, взяв его вывод, как (35,36):

$$\frac{\partial J}{\partial \lambda} = \frac{\partial(A+B\lambda+C\lambda^2)}{\partial \lambda} = B + 2\lambda C = 0, \quad (35)$$

$$\lambda_{min} = -\frac{B}{2C} \frac{(E\Phi)(E\Phi)^T}{(E\Phi\Phi^T)(E\Phi\Phi^T)^T}. \quad (36)$$

Эта скорость обучения минимизирует $J(\lambda)$, поэтому оптимальная скорость обучения λ_{opt} может быть выражена как (37):

$$\lambda_{opt} = (E\Phi) \left(\frac{(E\Phi)^T}{(E\Phi\Phi^T)(E\Phi\Phi^T)^T} \right) \geq 0. \quad (37)$$

Используя приведенное выше уравнение, оптимальный вектор дельта-веса можно определить, как (38):

$$\Delta W_{opt} = \lambda_{opt} \Delta W = \frac{(E\Phi)(E\Phi)^T E\Phi}{(E\Phi\Phi^T)(E\Phi\Phi^T)^T}. \quad (38)$$

Следовательно (39):

$$W_{new} = W_{opt} + \frac{(E\Phi)(E\Phi)^T E\Phi}{(E\Phi\Phi^T)(E\Phi\Phi^T)^T}. \quad (39)$$

После математического введения в рабочий механизм используемых нейронных сетей мы представляем алгоритм, который вводит подход к обучению нейронных сетей на основе базисной функции (RBF), для определения сопротивления срабатывания дистанционной защиты, с учетом типов источников электроснабжения (центральные или децентрализованные) в режиме реального времени.

Предлагаемый метод представляет собой трехэтапный алгоритм работы, который позволяет улучшить характеристики дистанционной защиты для достижения большей точности в определении точки короткого замыкания: ввод и обработка эталонных данных сети, определение типа повреждения; определение расстояния между местом повреждения и источниками генерации.

Ввод и обработка эталонных данных сети

Для реализации рассматриваемого алгоритма необходимо обеспечить сбор и обработку информации в точке установки защиты, а именно: токов и напряжений в местах установки защиты при различных режимах работы источников питания и нагрузки.

Для реализации отключения нагрузки (с целью изоляции нагрузок для изучения влияния нагрузки на систему защиты электротехнических комплексов) автоматические выключатели должны быть снабжены независимым механизмом отключения, способным осуществлять дистанционное управление, с возможностью подключения к главному реле [50].

Определение вида повреждения

Предлагаемый в данном исследовании метод состоит из следующих частей: распознавания вида повреждения и определения ее местоположения затем структуры сети.

А. Распознавание вида повреждения

Для определения вида повреждения используется только трехфазный ток основного источника. На данный момент нет необходимости в нейронной сети, и его можно определить нормированием 3-х фазного выходного тока питающей подстанции. Для нормирования указанных токов используется следующее уравнение 40:

$$I_{normal} = \frac{I}{I_{max}}, \quad (40)$$

где I - фазный ток,

I_{max} - максимальный фазный ток.

Тип повреждения можно определить с помощью (40) и таблицы 4.

Таблица 4 - Нормируемый вектор тока главного источника для различных типов неисправностей [51]

Тип повреждения		I_a	I_b	I_c
Двухфазное замыкание	AB	1	-1	0
	AC	1	0	-1
	BC	0	1	-1
Трехфазное замыкание	ABC	1	1	1

В. Определение места повреждения

После распознавания вида повреждения необходимо определить его местонахождение. В этом исследовании нейронная сеть используется для определения точного местоположения повреждения. После распознавания вида повреждения соответствующим ему блоком, обученная нейронная сеть этого вида

повреждения активируется и получает входные данные, полученные программой подготовки входных данных. Выходом нейронной сети будет расстояние до точки повреждения от всех объектов РГ и основного источника. В таблице 4 показан нормируемый вектор тока главного источника для различных типов неисправностей

Определение расстояния между местом повреждения и источниками генерации

Основной проблемой локализации повреждений в распределительных сетях является определение полного сопротивления повреждения. В целях минимизации влияния импеданса повреждения на выход нейронной сети необходимо определить соответствующие характеристики нейронной сети. Ток короткого замыкания каждого РГ можно рассчитать с помощью [52,53] по формуле 41:

$$I_f = \frac{U}{Z_{TH}}, \quad (41)$$

где U – напряжение на клеммах источника питания,

Z_{TH} – эквивалентный импеданс сети.

Например, в сети изображенном на рисунке 16, при нулевом сопротивлении короткого замыкания в точке А эквивалентное сопротивление РГ и сети составляет:

$$Z_{РГ} = Z_{34} + Z_{3A}, \quad (42)$$

$$Z_S = Z_{12} + Z_{2A}, \quad (43)$$

где Z_{12} - полное сопротивление линии передачи между шиной 1 и шиной 2;

Z_{34} - полное сопротивление линии передачи между шиной 3 и шиной 4;

Z_{3A} - импеданс части линии передачи между шиной 3 и точкой А (точка повреждения);

Z_{2A} - полное сопротивление части линии передачи между шиной 2 и точкой А (точка повреждения на рисунке 14).

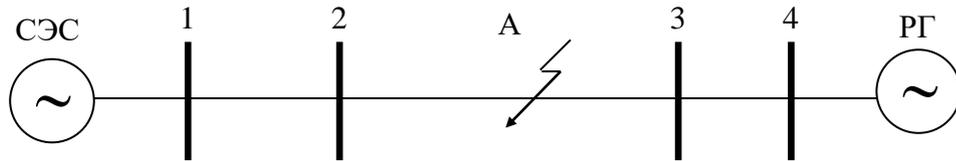


Рисунок 14 - Простая распределительная сеть с одним объектом РГ [54]

В этой сети отношение тока короткого замыкания сети к току короткого замыкания РГ составляет (44):

$$\frac{I_S}{I_{РГ}} = \frac{Z_{34} + Z_{3A}}{Z_{12} + Z_{2A}} \quad (44)$$

Предполагая переходное сопротивление в точке А, указанное соотношение имеет вид (45):

$$\frac{I_S}{I_{РГ}} \approx \frac{Z_{34} + Z_{3A} + Z_f}{Z_{12} + Z_{2A} + Z_f} \quad (45)$$

где Z_f – переходное сопротивление повреждения.

Таким образом, используя эту пропорцию, то есть отношение тока замыкания различных ресурсов на вход нейронной сети, влияние импеданса замыкания уменьшится до наименьшей величины. Можно заметить, что этот метод применим к распределительным сетям, включающим объекты РГ. Кроме того, важно отметить, что при увеличении количества подключенных к распределительной системе объектов РГ точность локализации неисправностей нейронной сети будет повышаться за счет увеличения количества ее входов. Например, в случае одной РГ в сети для обучения нейронной сети можно использовать только один вход, а в случае n объектов РГ, подключенных к сети, количество входов нейронной сети составляет (46):

$$N = \binom{n}{2}, \quad (46)$$

где n – количество объектов РГ, питающих точку КЗ (один сетевой и $n-1$ ресурсов РГ),

2 – сигналы напряжения и тока для каждого источника.

Количество выходов нейронной сети равно n , что равно количеству источников тока КЗ, и каждый выход однозначно определяет расстояние до точки КЗ от своего источника питания. Структура нейронной сети, используемой в данном исследовании, показана на рисунке 15.

Входной вектор	Нейронная сеть	Выходной вектор
I_1	<p>n (Количество источников) N_i (Количество входов) N_o (Количество выходов) I_j (ток короткого замыкания, подаваемый из источника j) D_i (расстояние места неисправности от источника i)</p>	D_1
I_2		D_2
I_3		...
...		
I_{n-1}		D_n
I_n		

Рисунок 15 - Структура нейронной сети [47]

Для целей построения нейронной сети количество нейронов связано с модифицирующими условиями и не может быть точно задано. Здесь необходимо упомянуть, что, в частности, проблема определения количества нейронов в скрытом слое, может быть решена методом проб и ошибок.

2.3 Выводы к Главе 2

1. Выполнен анализ алгоритмов работы защиты в системе с распределенной генерацией. Принято решение, что необходимо разработать алгоритмы, основанные на математических методах, для большей интеграции с изменениями параметров электрического комплекса. Предложено применение искусственных нейронных сетей для повышения чувствительности и обеспечения селективности дистанционной защиты.

2. Разработан алгоритм определения повреждения для распределительных систем с РГ с использованием нейронной сети. Алгоритм использует подход зонирования сети, в которой каждая зона представляет собой самостоятельную линию. После разделения системы распределения на несколько независимых зон, реле, установленное на подстанции, диагностирует точное место повреждения с помощью нейронных сетей, которые обучаются посредством своих автономных вычислений. Реле отправляет необходимые команды и сигналы устройствам защиты, чтобы изолировать неисправную зону от остальной сети. Ведется дальнейшая работа по совершенствованию алгоритма путем зонирования поврежденного участка с учетом определенного количества коммутационных аппаратов и, в конечном счете, оптимальное использование зон в режиме островной работы.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

3.1 Влияние нагрузки и источника питания на эффективность дистанционной защиты в сетях распределенной генерации

Изучено влияние различных условий работы нагрузки и источников энергии в распределенной генерации на эффективность дистанционной защиты в электрических сетях. Представлено подробное исследование, в котором основное внимание уделяется электрической сети, объединяющей источники ветровой и солнечной энергии в сирийскую распределительную сеть – Южный сектор Сирийской республики. Моделирование выполняется с использованием программного обеспечения для моделирования энергосистемы с целью анализа диапазона и селективности дистанционных реле в различных сценариях с учетом изменений уровней нагрузки, выходной мощности генерации и мест неисправностей. Результаты показывают, что изменения условий работы нагрузки и распределенной генерации могут существенно повлиять на токи короткого замыкания и характеристики напряжения, что может привести к превышению или не достижению диапазона срабатывания дистанционных реле.

Рассмотрим влияние условий работы нагрузки и источников электроснабжения на эффективность дистанционной защиты в сети, интегрированной с распределенной генерацией. Изменения уровней нагрузки, например, пиковая нагрузка по сравнению с малой нагрузкой, могут по-разному влиять на распределение тока короткого замыкания. Изменения в выходной мощности распределенной генерации (например, изменение максимальной мощности в фотоэлектрических батареях по сравнению со снижением выходной мощности при высоком напряжении в сети) влияют на величину и направление токов короткого замыкания. Это отрицательно влияет на селективность и надежность дистанционных реле, что может привести к ложным отключениям или невозможности устранения неисправностей [55]. Это неоднократно наблюдалось в сирийской распределительной сети - Южном секторе. В

исследовании анализируется эффективность дистанционной защиты в системе с распределенной генерацией, состоящей из распределенных ветровых и солнечных электростанций (рисунок 16).

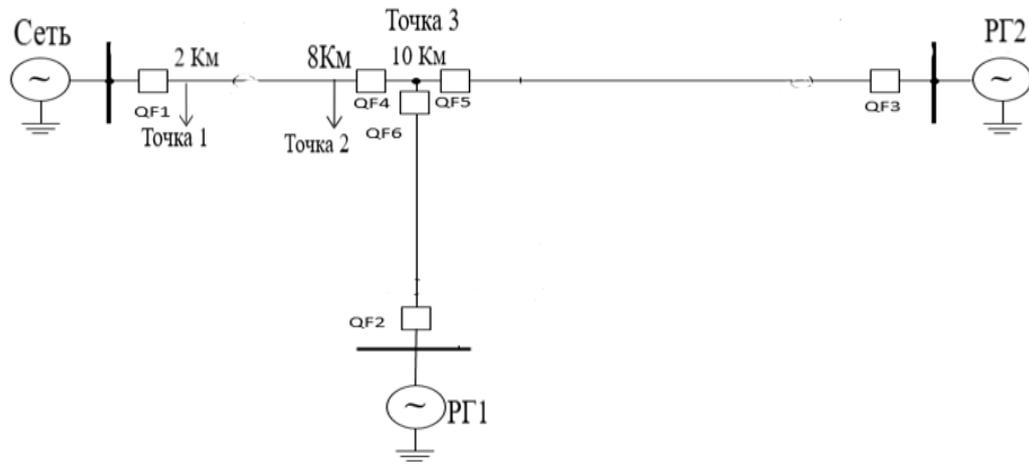


Рисунок 16 - Рассматриваемая схема (составлено автором)

Модель электрической сети была смоделирована при различных сценариях нагрузки и генерации, чтобы оценить их влияние на работу дистанционной защиты. Результаты испытаний подчеркивают важность учета динамических условий эксплуатации при проектировании и координации схем защиты для сетей, интегрированных с распределенными генераторами. Были рассмотрены следующие сценарии:

Условия эксплуатации нагрузки:

- максимальная нагрузка: нагрузка составляет 100% от номинальной мощности.
- легкая нагрузка: нагрузка составляет 25% от номинальной мощности.

Условия эксплуатации блока питания:

- максимальная выходная мощность: ветряные турбины и солнечные батареи работают с максимальной выходной мощностью.
- минимальная генерация: ветровые турбины и солнечные фотоэлектрические системы работают на минимальной выходной мощности (например, из-за низкой скорости ветра или регулирования напряжения сети).

Места неисправностей:

- Точка 1 в 2 км от подстанции G1.

- Точка 2 в 8 км от подстанции G1.
- Точка 3 в 10 км от подстанции G1.

Симметричные трехфазные короткие замыкания моделировались в каждой точке во всех сочетаниях сценариев нагрузки и генерации. Токи и напряжения при коротких замыканиях регистрировались для оценки производительности дистанционных реле. Настройки дистанционных реле изначально рассчитывались на основе обычных методов, предполагая чисто радиальную сеть без распределенной генерации.

Результаты и обсуждение

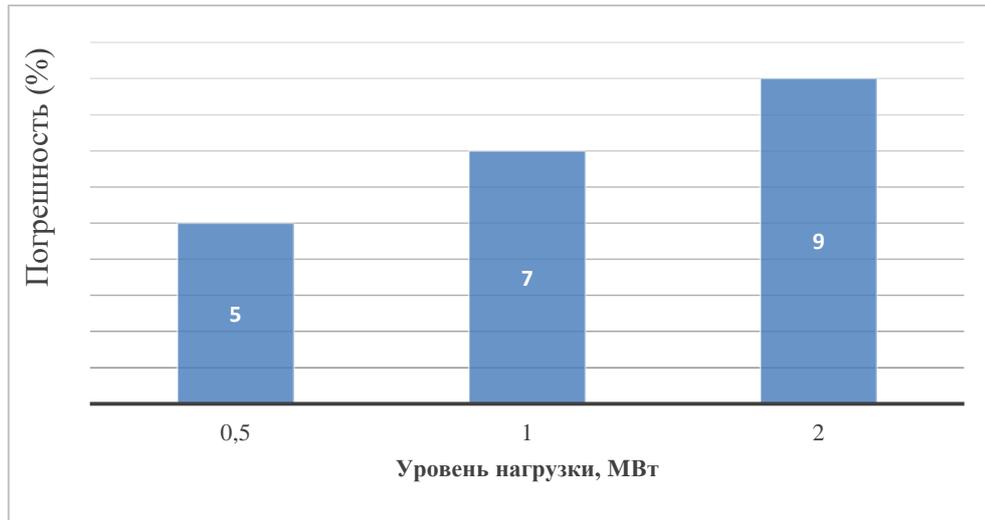
Результаты моделирования демонстрируют значительное влияние условий нагрузки и генерации на значения сопротивления до точки короткого замыкания. В таблице 5 и на рисунках 17, 18 обобщен наблюдаемый диапазон реле ДЗ1 в различных сценариях.

Таблица 5 - Работа дистанционной защиты при различных сценариях нагрузки и генерации (составлено автором)

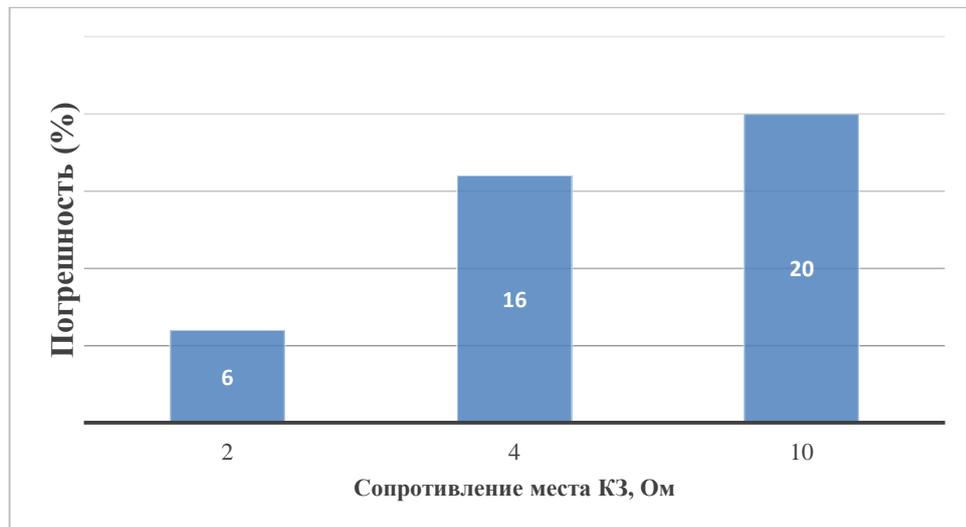
№	Уровень нагрузки [МВт]	Сопротивление источника (ветрогенератор), X_{s1} , [о.е]	Сопротивление источника (фотоэлементы), X_{s2} , [о.е]	Уровень генерации P _{G1,2} [МВт]	Сопротивление места КЗ, [ом]	Местоположение неисправности (км)	Погрешность (%)
1	1	0.008	0.01	6	2	2	6
2	1	0.008	0.01	6	4	2	16
3	1	0.008	0.01	6	10	2	20
4	2	0.008	0.01	6	10	2	12
5	2	0.008	0.01	4	10	2	10
6	2	0.008	0.01	2	10	2	8
7	0.5	0.008	0.01	4	10	8	5
8	1	0.008	0.01	4	10	8	7
9	2	0.008	0.01	4	10	8	9
10	1	0.01	0.01	4	10	10	4
11	1	0.015	0.015	3	10	10	3

Продолжение таблицы 5

№	Уровень нагрузки [МВт]	Сопротивление источника (ветрогенератор), Xs1, [о.е]	Сопротивление источника (фотоэлементы), Xs2, [о.е]	Уровень генерации PГ1,2 [МВт]	Сопротивление места КЗ, [Ом]	Местоположение неисправности (км)	Погрешность (%)
12	1	0.02	0.02	2	10	10	2



а)

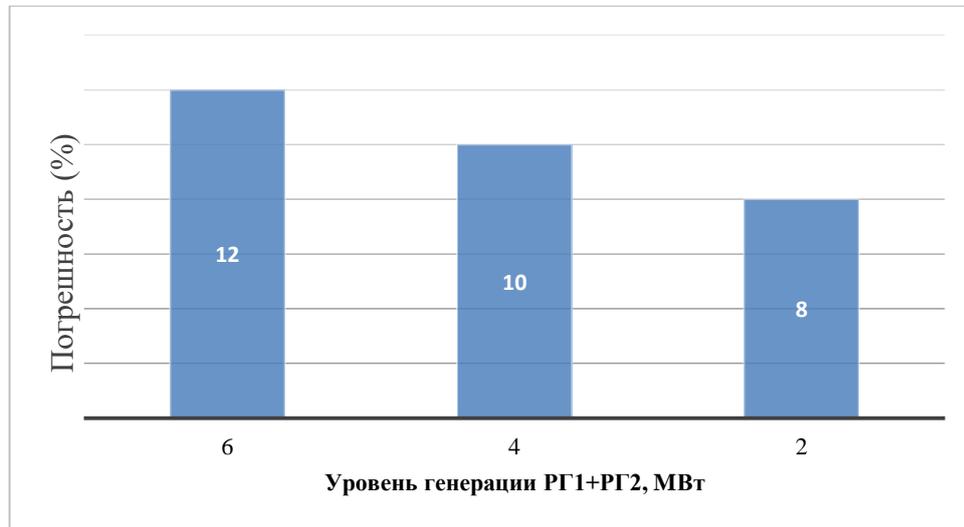


б)

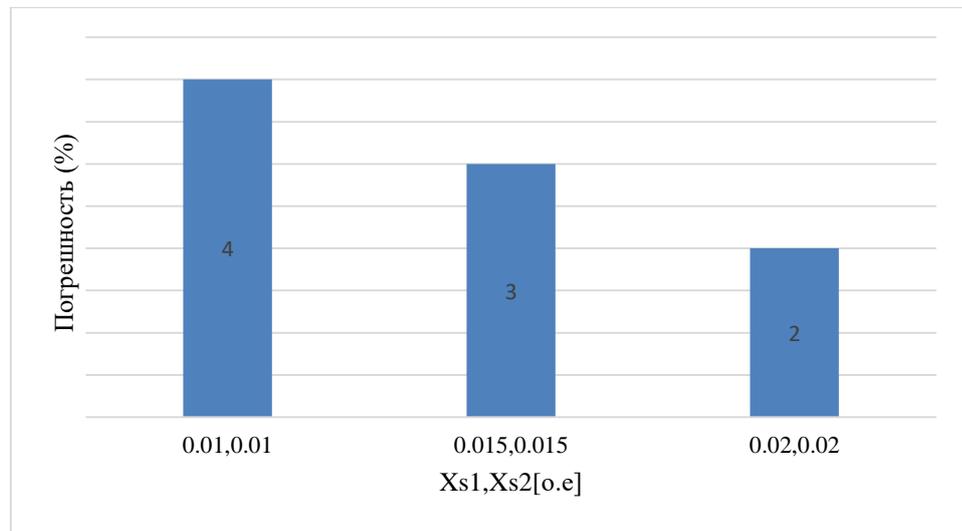
Рисунок 17 - Влияние параметров нагрузки и источников питания на погрешность в определении места КЗ (составлено автором)

а) Уровень нагрузки = 1 МВт, уровень генерации PГ1 = 4 МВт, PГ2 = 2 МВт, точка 1

б) PГ1 = 2 МВт, PГ2 = 2 МВт. Сопротивление места КЗ = 10 Ом, точка 2



а)



б)

Рисунок 18 - Влияние параметров нагрузки и источников питания на погрешность в определении места КЗ (продолжение) (составлено автором)

а) Уровень нагрузки = 2 МВт, сопротивление места КЗ = 10, Ом, точка 1,

б) Уровень нагрузки = 1 МВт, сопротивление места КЗ = 10 Ом, точка 3

Как показано в таблице 5, показания реле ДЗ1 во многом зависят от нагрузки и условий генерации. Это происходит из-за повышенного тока короткого замыкания, генерируемого распределенными источниками, в результате чего реле измеряет сопротивление ниже фактического сопротивления короткого замыкания. Эффект более заметен при небольших уровнях нагрузки [56-58]. И наоборот, когда генерация минимальна (например, из-за низкого уровня производства ветровой и солнечной энергии), радиус действия реле

уменьшается, что может привести к короткому диапазону действия, особенно в условиях малой нагрузки.

Результаты подчеркивают необходимость разработки адаптивных схем защиты для решения проблем, связанных с условиями работы защит электротехнических комплексов в сетях с распределенной генерацией. Адаптивные схемы защиты динамически регулируют настройки реле на основе данных об условиях режимов работы электротехнического комплекса, таких как уровни нагрузки, распределенная генерация и конфигурация сети. Поэтому была использована защита, основанная на нейронных сетях и дополненная средствами связи (обмен информацией между реле и центральной системой управления для координации решений об отключении) (рисунок 19).

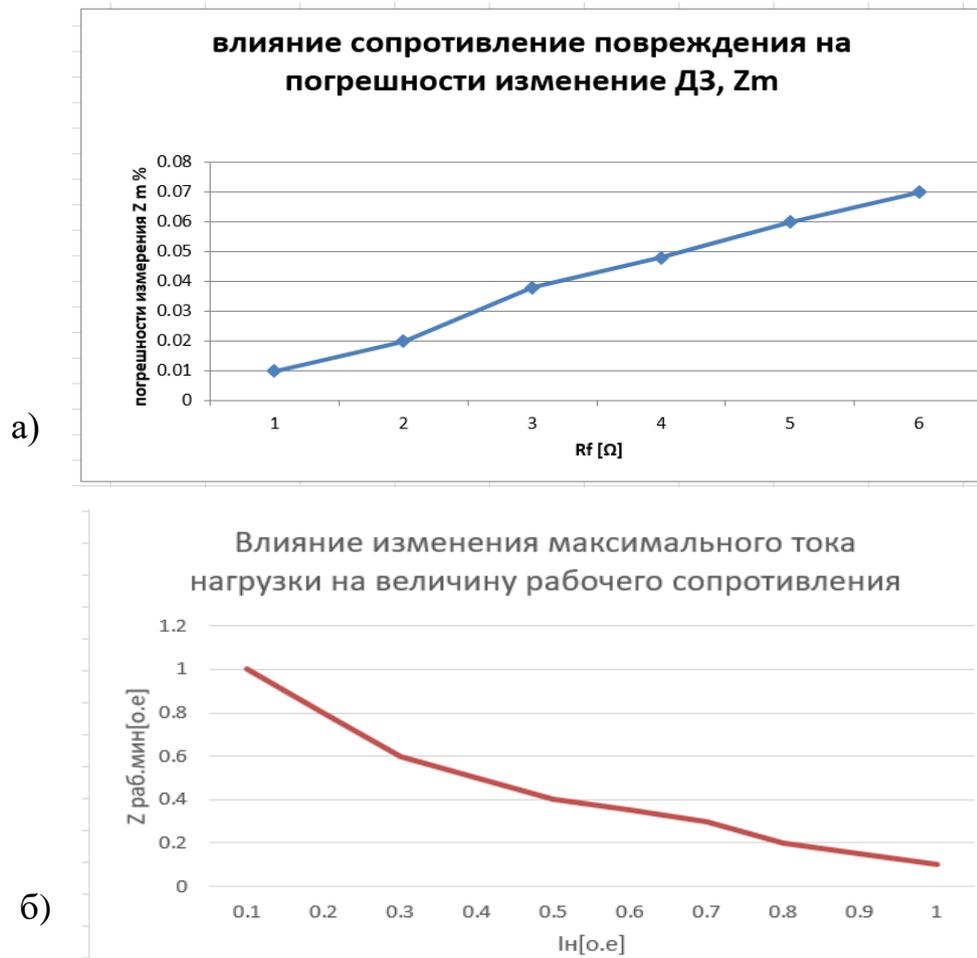


Рисунок 19 - Влияния вариации параметров электротехнических комплексов в сети с распределенной генерацией: а) влияние сопротивления повреждения на погрешность ДЗ, б) влияние изменения максимального тока нагрузки на величину рабочего сопротивления (составлено автором)

Из рисунка 19а видно, что с увеличением переходного сопротивления короткого замыкания возрастает погрешность при определении сопротивления реле. Из рисунка 19б видно, что при увеличении нагрузки величина сопротивления, фиксируемого реле, будет уменьшаться.

3.2 Создание модели исследования действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией и сбор данных для обучения и тестирования

Нейронные сети обучаются на обширных наборах данных исторических ошибок и обычных состояний системы, что позволяет с их помощью изучать сложные закономерности, связанные с различными типами ошибок. MATLAB предоставляет мощные инструменты для создания и обучения NN [60]:

- Neural Network Toolbox: предлагает функции для:
 - создания сетей: построение различных архитектур NN (прямой связи, рекуррентной, сверточной).
 - обучения: использование таких алгоритмов, как обратное распространение и градиентный спуск.
 - моделирования: тестирование и оценка производительности сети.
 - анализа в реальном режиме времени. Во время работы NN получает данные датчиков в реальном времени (напряжение и ток) от электротехнических комплексов, выполняет анализ этих сигналов и сравнение их с шаблонами, полученными во время обучения.

Поскольку на практике собрать хороший набор данных с выборками, содержащими различные случаи неисправностей с разными параметрами, очень сложно, в этом тесте данные были сгенерированы с использованием программного обеспечения Matlab с трехфазной линией электропередачи с параметрами, взятыми из реальной линии. Различные случаи повреждения моделировались путем изменения 4 параметров: вида повреждения, места повреждения, сопротивления короткого замыкания и величины нагрузки линии. В системе Matlab выполнено моделирование и получены 6 сигналов (3 напряжения и 3 тока) в начале каждой линии, в местах установки защиты, для дальнейшей

обработки. Был смоделирован электротехнический комплекс в системе с распределенной генерацией, содержащий три источника трехфазного переменного напряжения 6 кВ. К шинам, к которым подключены источники, также подключена нагрузка мощностью 2 МВт (активно-индуктивная нагрузка, коэффициент мощности 0,86). Смоделированные дистанционные защиты были установлены в начале каждой линии электропередачи, длина каждого участка распределительной сети составляла 10 км (сопротивление кабеля 0,626 Ом/км, индуктивность кабеля 0,2451 мГн/км, емкость кабеля LL 0,26 мкФ/км, емкость кабеля LG 0,05 мкФ/км) [60]. На рисунке 20 показана блок-схема модели в программе Simulink.

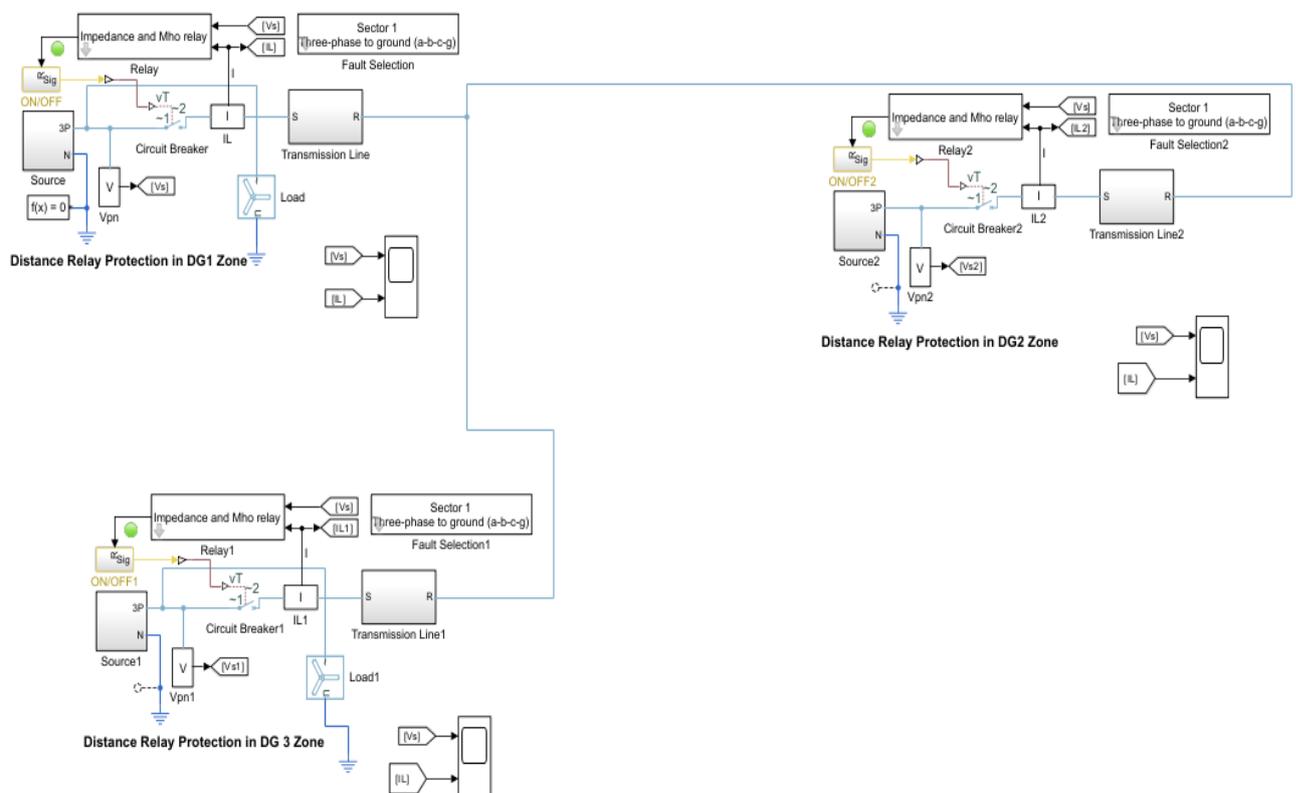


Рисунок 20 - Блок-схема модели в библиотеке Simulink (составлено автором)

3.2.1 Сбор данных для обучения и тестирования

Обнаружение и классификация неисправностей. На основе анализа нейронные сети могут быстро и точно определить возникновение неисправности, определить ее тип (двух или трехфазное короткое замыкание) и оценить ее местоположение. Программное обеспечение Matlab использовалось для моделирования реальной линии электропередачи длиной 10 км и напряжением

6 кВ. Рассмотрены следующие сценарии ошибок при создании обучающих данных:

- место повреждения на линии $N = 3$ (на расстоянии 2, 4, ..., 10 км от начала линии);
- переходное сопротивление в месте короткого замыкания: количество вариантов $K = 6$ (величина переходного сопротивления $R = 1, \dots, 6 \text{ Ом}$);
- типы повреждения: тип короткого замыкания $P = 2$ (двухфазное, трехфазное короткое замыкание). В разработанной модели могут быть рассмотрены все типы замыканий;
- загрузка линий: один из случаев $Q = 3$ (нагрузка равна 30%, 50% и 100% от номинальной нагрузки линии).

В сумме это дало $N \times K \times P \times Q = 3 \times 6 \times 2 \times 3 = 108$ случаев.

Структура искусственных нейронных сетей вдохновлена человеческим мозгом, который может учиться и решать сложные и нелинейные задачи, не имеющие специального алгоритма, но, для решения которых, доступна полезная и важная информация. Одной из таких задач является защита электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией. Еще одна вещь, которую следует сказать о системах защиты, заключается в том, что классификация неисправностей работает на основе линейных алгоритмов или методов логического сравнения.

Линейные сигналы напряжения и тока берутся с измерительных приборов. Нейронная сеть обучается только один раз, находится в режиме `off_Line` и вычисляет соответствующий выходной сигнал для каждого получаемого ею входного сигнала. Время, необходимое сети для считывания входящих данных после обучения и реагирования на них, зависит от скорости обработки. Алгоритм работы защиты построен на функционировании многоуровневой ИНС [60]. При этом алгоритм предусматривает контроль тока и напряжения в местах установки защит, и получение данных о режимах работы нагрузки и источников питания. Схема алгоритма работы защиты на основе нейронных сетей представлена на рисунке 21.

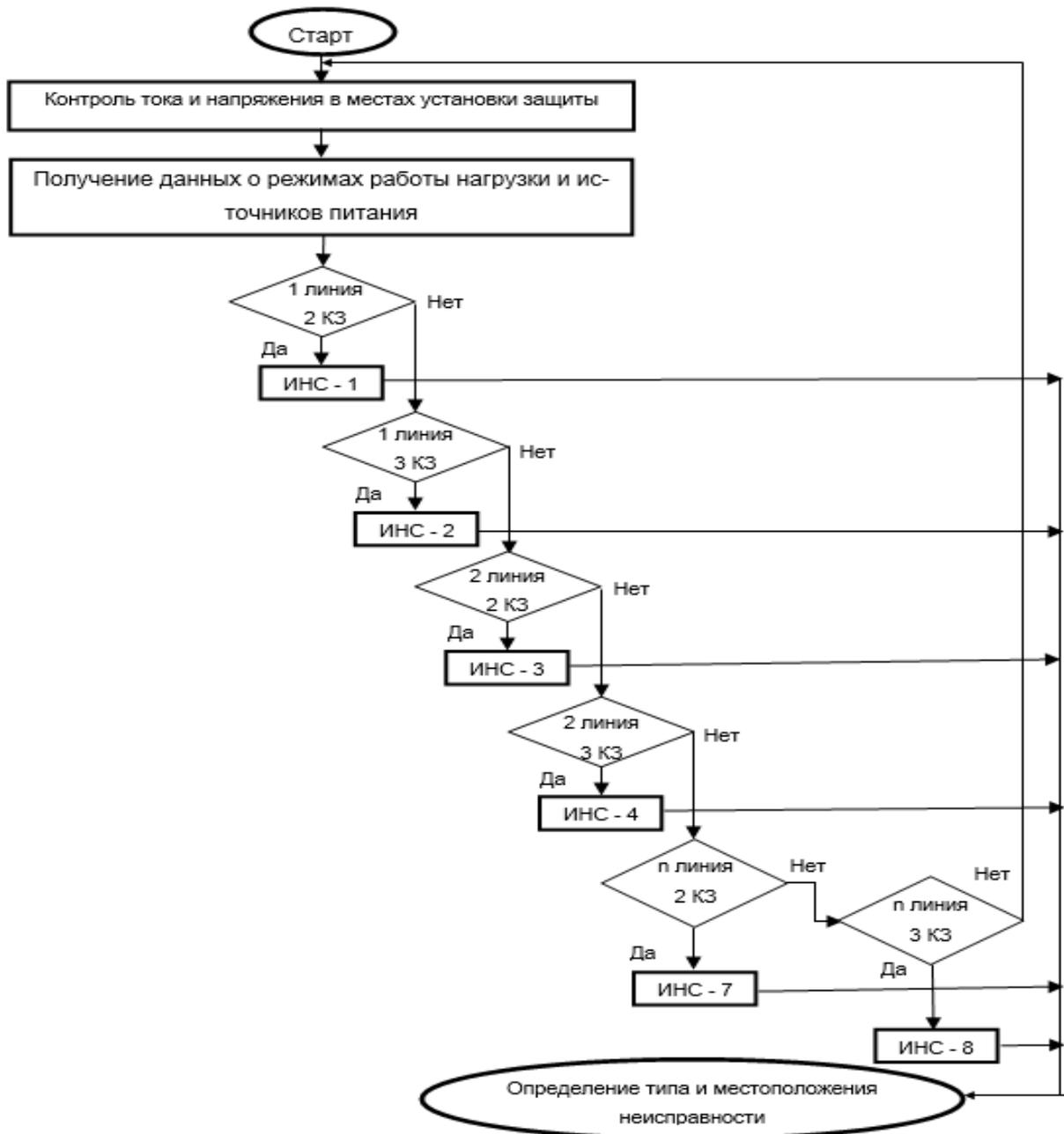


Рисунок 21 - Алгоритм функционирования многоуровневой ИНС
(составлено автором)

Ниже приведено подробное описание используемых механизмов:

1. Понимание базовой нейронной сети:

Входные данные: они обычно представляют собой электрические параметры, измеряемые в сети распределенной генерации. Вот несколько примеров:

Напряжение (V_{abc}): трехфазное напряжение в ключевых узлах (например, на клеммах распределенного генератора и подстанциях). Токи (I_{abc}): трехфазные

токи, протекающие по разным линиям и ветвям. Мощность (P , Q): активные и реактивные потоки мощности.

Сигналы защитного реле: сигналы от сверхтока, перенапряжения и т.д.

Скрытые слои: эти слои извлекают сложные признаки из входных данных, позволяя сети изучать нелинейные соотношения между электрическими параметрами и условиями неисправности. Количество слоев и нейронов в каждом слое определяет способность сети извлекать признаки. После выбора архитектуры следующим шагом является определение количества скрытых слоев и количества нейронов в каждом слое для каждой сети. Обучение проводилось с использованием одного скрытого слоя для задачи классификации неисправностей и трех скрытых слоев для задачи определения местоположения неисправностей.

Выходы: эти выходы представляют собой прогнозы сети, которые являются:

Тип неисправности: выходы классификации (например, «Короткое замыкание», «Обрыв цепи», «Замыкание на землю», «Отключение»).

Место неисправности: либо выход классификации (например, «Линия 1», «Трансформатор 2», «DG A»), либо цифровой выход (например, расстояние вдоль линии).

Серьезность неисправности: определение величины неисправности (например, сопротивление неисправности, ток неисправности).

2. Методы адаптации архитектуры нейронной сети:

А. Динамический выбор входных данных определяет наиболее релевантные входные характеристики для определенных типов или местоположений неисправностей и динамически выбирает только эти характеристики в качестве входных данных для нейронной сети. Это снижает вычислительную нагрузку и повышает точность за счет удаления нерелевантных данных.

Как это работает:

Анализ чувствительности: вычисляет, насколько сильно изменяется выходной сигнал при нарушении каждого входного сигнала. Высокая чувствительность указывает на эффективность архитектуры, используемой в системах защиты. Затем он определяет статистическую зависимость между

каждым входным признаком и выходом (тип/местоположение неисправности). Нейронная сеть (NN) обучается итеративно, и менее значимые признаки удаляются на основе их весов или коэффициентов. На основе ранжированных признаков и текущих условий сети (таких как местоположение и данные в реальном времени) выбирается подмножество входов для нейронной сети (ИНС1, ИНС2 и т.д.). Входной слой нейронной сети динамически настраивается. Модуль получает информацию о текущем состоянии сети (такую, как конфигурация и местоположение DG) для руководства процессом выбора и корректировки количества выходных ячеек или их интерпретации для соответствия потенциальным местам или видам рассматриваемых неисправностей. Это необходимо при изменении архитектуры сети (например, при добавлении новых динамических генерирующих блоков). В зависимости от топологии сети выходной слой модифицируется, и нейроны могут быть добавлены/удалены: если подключается новый блок распределенной генерации для повышения чувствительности к новой дистанционной защите, то есть если линия отключена, соответствующая выходная ячейка удаляется. Однако после модификации выходного слоя сеть необходимо переобучить (или настроить) для изучения новых взаимосвязей между входами и выходами.

Были получены данные для обучения нейронной сети с использованием комбинаций Матлаб, которые образуют связь между устройством дистанционной защиты. Блок выбора вида повреждения, местоположения и значения выбранного сопротивления повреждения показан на рисунке 22. На рисунке 23 показана схема рассматриваемой модели.

Имитационные модели ИНС Matlab связаны с выходными блоками для обучения нейронной сети. Входными данными для нейронной сети являются сигналы тока: IA, IB, IC и сигналы напряжения: VA, VB, VC, которые сохраняются в файлах Excel со значениями неисправностей If. После выбора структуры следующим шагом является определение количества скрытых слоев и количества нейронов в каждом скрытом слое для каждой сети.

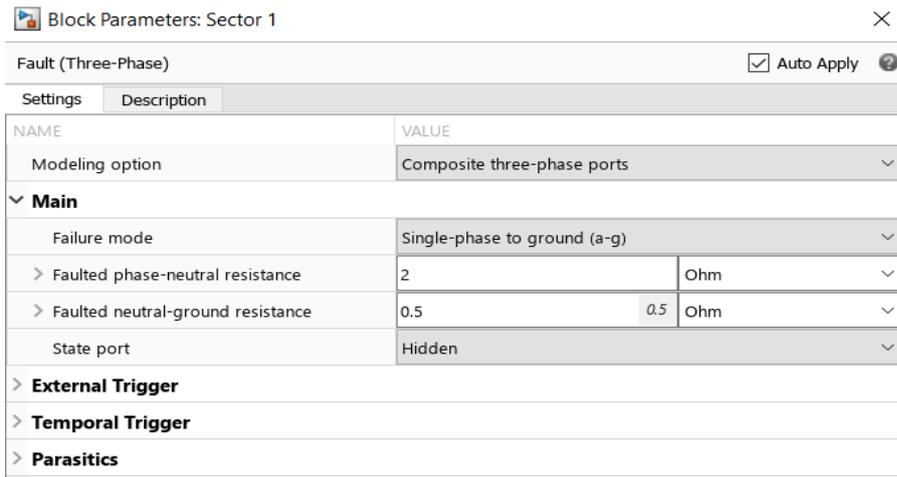


Рисунок 22 - Блок выбора вида повреждения, местоположения и значения выбранного сопротивления повреждения [60]

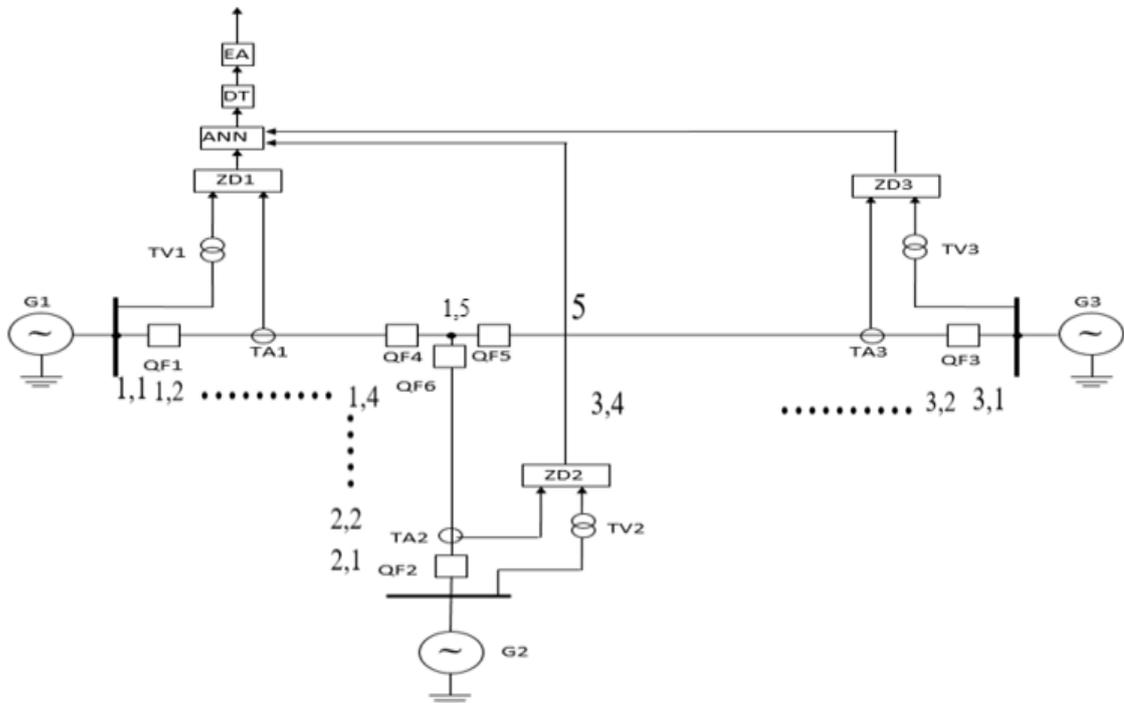


Рисунок 23 - Схема рассматриваемой модели (составлено автором)

Обучение проводилось при использовании одного скрытого слоя для задачи классификации неисправностей и трех скрытых слоев для задачи определения местоположения неисправности. Обучение ИНС осуществляется с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта (рисунок 24).

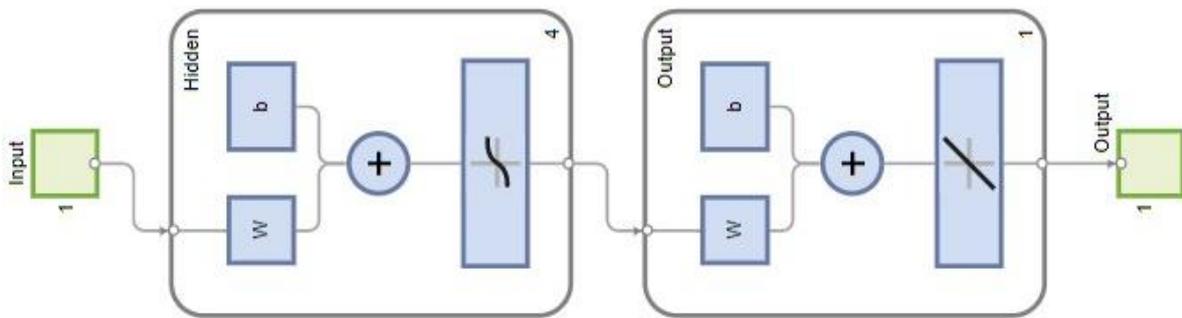


Рисунок 24 - Блок-схема нейронной сети в Matlab (составлено автором)

3.2.2 Обучение нейронной сети в структуре защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией

Обучение нейронной сети необходимо для обеспечения того, чтобы сеть выдавала выходные данные, соответствующие новым входным данным, и имела хорошую способность к обобщению для генерации выходных данных. Существует ряд методов, используемых для тестирования обученной ИНС. Сеть тестируется с использованием тестового набора данных, в котором входные и целевые выходные данные отсутствуют в обучающем наборе, и рассчитывается процентная ошибка между выходными данными сети и целевыми выходными данными. Если средний процент ошибок является приемлемым значением, это означает, что тест ИНС пройден и теперь сеть можно использовать [61, 62].

1. Набор данных для обучения (Training). Это основной набор данных, используемый для обучения ИНС для изучения базовых закономерностей в данных и корректировки ее внутренних параметров (весов и смещений).

2. Набор данных для проверки (Validation). Этот набор данных используется в процессе обучения для мониторинга производительности ИНС на данных, которые она не видела во время обучения. Он помогает предотвратить переобучение и настроить параметры.

3. Тестовый набор данных. Этот набор данных используется после завершения обучения и настройки параметров, чтобы предоставить окончательную, беспристрастную оценку производительности ИНС.

Результаты испытаний на короткое замыкание приведены в таблицах 6,7.

Таблица 6 - Погрешность при расчете расстояния до места повреждения без ИНС, максимальная ошибка 9,84 % (составлено автором)

№ точка	Фактическое расстояние (км)	Расчётное расстояние (км)	Погрешность, %	Тип неисправности
1,1	2	2,15	7,5	Трёхфазное КЗ
1,2	4	4,29	7,3	двухфазное КЗ, фазы АВ
1,3	6	6,43	7,1	Трёхфазное КЗ
1,4	8	8,79	9,84	двухфазное КЗ, фазы АВ
1,5	10	10,78	7,8	Трёхфазное КЗ
2,1	2	2,19	9,5	двухфазное КЗ, фазы АВ
2,2	4	4,15	3,7	Трёхфазное КЗ
2,3	6	6,29	4,6	двухфазное КЗ, фазы АВ
2,4	8	8,193	3,08	Трёхфазное КЗ
3,1	2	2,15	3,51	двухфазное КЗ, фазы АВ
3,2	4	4,13	3,2	Трёхфазное КЗ
3,3	6	6,28	4,6	двухфазное КЗ, фазы АВ
3,4	8	8,29	3,6	Трёхфазное КЗ

Таблица 7 - Эффективность обучения ИНС для местоположения КЗ (Данные файла обучения) (составлено автором)

№ точка	Фактическое расстояние (км)	ИНС (км)	Погрешность, %	Тип неисправности
1,1	1	1,005	0,5	Трёхфазное Кз
1,2	3	3,009	0,3	двухфазное КЗ, фазы АВ
1,3	5	5,029	0,58	двухфазное КЗ, фазы АВ
1,4	7	7,0037	0,8	Трёхфазное Кз
1,5	10	10,07	0,7	двухфазное КЗ, фазы АВ
2,1	1	1,0034	0,3	Трёхфазное Кз
2,2	3	3,003	0,1	двухфазное КЗ, фазы АВ
2,3	5	5,03	0,6	Трёхфазное Кз
2,4	7	7,003	0,5	двухфазное КЗ, фазы АВ
3,1	1	1,003	0,1	Трёхфазное Кз

Продолжение таблицы 7

№ точка	Фактическое расстояние (км)	ИНС (км)	Погрешность, %	Тип неисправности
3,2	3	3,003	0,1	двухфазное КЗ, фазы АВ
3,3	5	5,04	0,8	Трехфазное Кз
3,4	7	7,05	0,7	двухфазное КЗ, фазы АВ

3.3 Тестирование нейронной сети в составе защиты электротехнических комплексов

При разработке нового алгоритма для обнаружения и локализации неисправностей искусственных нейронных сетей разрабатываются новые стратегии, которые будут играть важную роль в интеграции схемы электрической защиты с распределенной генерацией.

Этот алгоритм указывает на возможности вычислений значительно сократить время вычислений по сравнению с классическими алгоритмами дистанционной защиты. Более быстрое распознавание неисправностей, снижение влияния потенциальных сбоев и улучшенное распознавание неисправностей. Усовершенствованные алгоритмы могут обеспечить превосходную точность в различении различных типов неисправностей, что приводит к более целенаправленным стратегиям защиты.

Повышение надежности, скорости и точности алгоритмов могут повысить общую надежность системы защиты, что приводит к меньшему количеству ложных срабатываний и повышению эффективности работы.

Разработка специального алгоритма для дистанционной защиты для повышения точности дистанционной защиты и оптимального выбора параметров и структуры обучаемой нейронной сети.

В зависимости от обучаемой нейронной сети соответствующие входные данные выбираются и делятся так, что 70% набора приходится на обучение, 15% на проверку и 15% на тестирование [64] (рисунок 25).

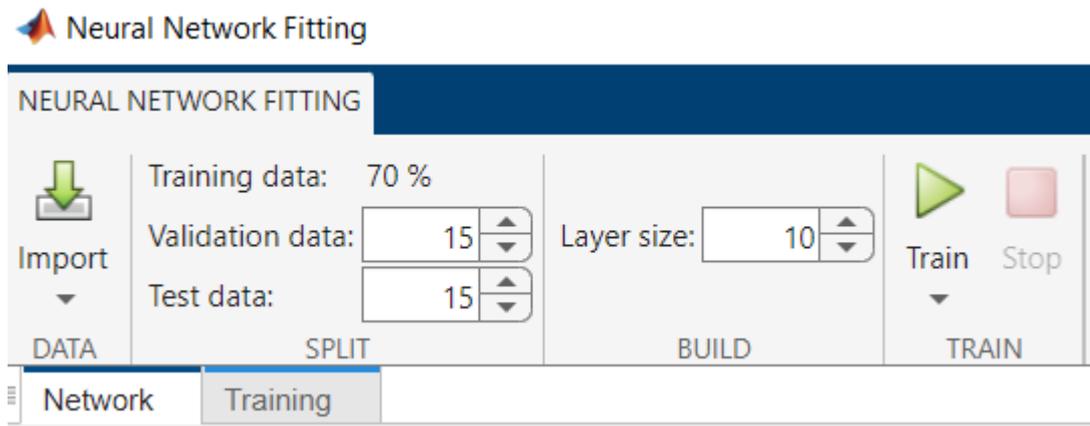


Рисунок 25 - Выбор соответствующих входных данных (составлено автором)

На рисунке 26 видно, что по мере увеличения количества нейронов в скрытом слое ошибка оценки расстояния уменьшается. Такое поведение показывает, что для большого количества нейронов в скрытом слое точность оценки расстояния может значительно возрасти, тем самым повышая чувствительность и надежность дистанционной защиты с использованием технологий нейронных сетей.

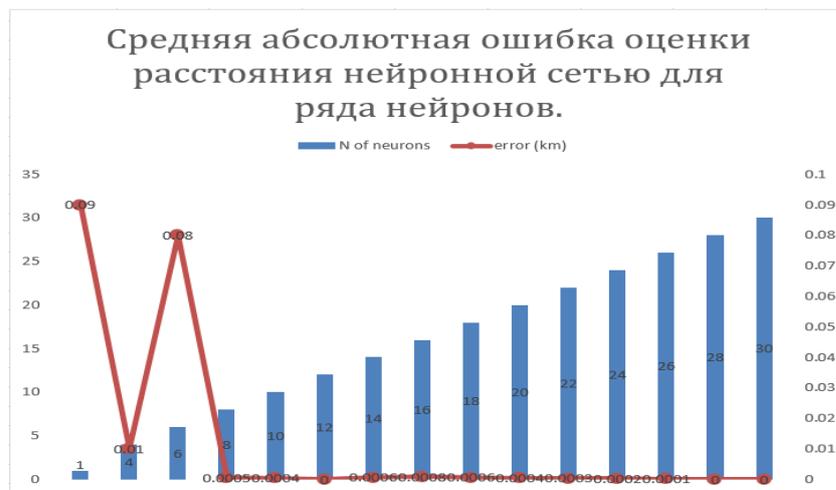


Рисунок 26 - Средняя абсолютная ошибка оценки расстояния для каждой линии с учетом различного количества нейронов (составлено автором)

Был выбран соответствующий критерий оценки, такой как среднеквадратическая ошибка. Результаты были записаны, как показано на рисунке 26, и проанализированы для определения наилучших значений параметров. После анализа результатов можно определить наилучшую комбинацию значений параметров, обеспечивающую наилучшую производительность обучающей сети. Процесс можно повторить с разными

диапазонами значений параметров для дальнейшего улучшения производительности сети.

Это включало итеративную корректировку весов и смещений модели, чтобы уменьшить ошибку. Между ожидаемыми и фактическими значениями среднеквадратическая ошибка (MSE) (средняя ошибка) использовалась в качестве показателя эффективности для оценки обучения [65].

На рисунке 27 представлена рассматриваемая сетевая диаграмма.

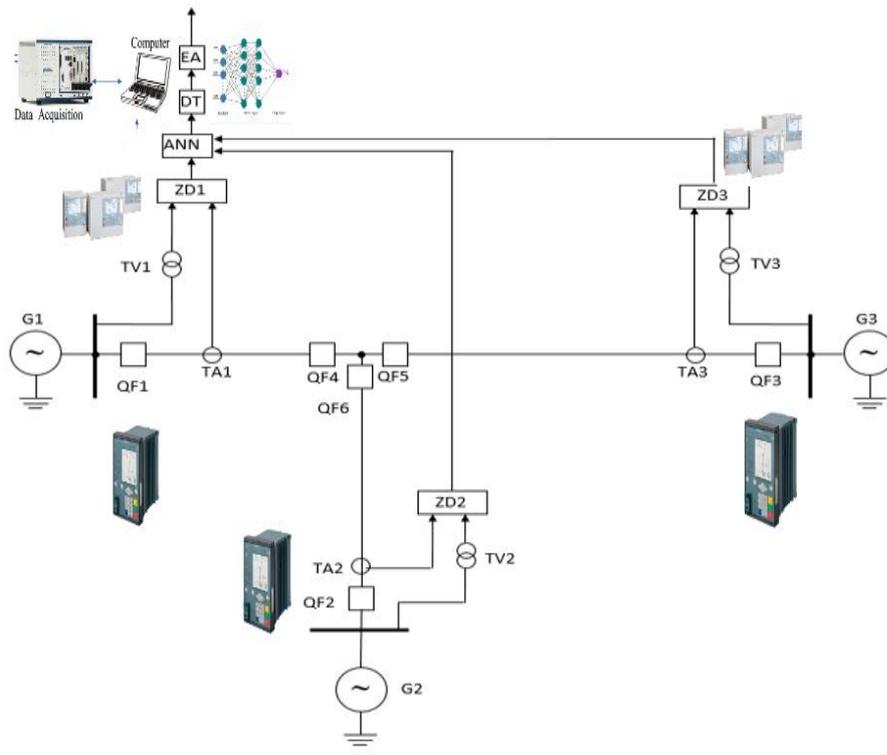


Рисунок 27 - Рассматриваемая сетевая диаграмма (составлено автором)

Здесь показаны G1, G2, G3 – источники питания; QF1, QF2, QF3, QF4, QF5, QF6 – линейные выключатели; TV1, TV2, TV3, трансформаторы напряжения шинной системы; TA1, TA2, TA3 – линейные трансформаторы тока; ZD1, ZD2, ZD3 – элементы измерения сопротивления; ANN – блок нейронных сетей; DT – блок задержки времени; EA – исполнительный блок.

Среднеквадратическая ошибка

MSE (среднеквадратическая ошибка) использовалась в качестве показателя эффективности для оценки процедуры обучения. Уравнение для MSE можно записать следующим образом в уравнение (47):

$$MSE = 1/n \sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i)^2) \quad (47)$$

где n - общее количество точек данных в наборе данных.

y_i - истинное (наблюдаемое) значение i -й точки данных.

\hat{y}_i - предсказанное (оценочное) значение i -й точки данных, выдаваемое регрессионной моделью.

$(y_i - \hat{y}_i)$ - разница (или ошибка) между истинным и предсказанным значениями i -й точки данных (рисунок 28 и 29).

Эффективность обучения ИНС для местоположения КЗ отражена в таблице 8.

Таблица 8 - Эффективность обучения ИНС для местоположения КЗ максимальная ошибка 1 % (тестирование файлов данных) (составлено автором)

№ точка	Входные данные				Напряжение фаза А (PU)
	$I_{кз}$, линия фаза [А]	I_1 , от РГ1 [А]	I_2 от РГ2 [А]	I_3 от РГ3 [А]	
1,1	3818	2664	577	577	1.01
1,2	2637	1649	494	494	0,96
1,3	2423	1117	653	653	1.01
1,4	2350	1018	666	666	0,96
1,5	2310	770	770	770	1.01
2,1	3818	2664	577	577	0,96
2,2	2637	1649	494	494	1.01
2,3	2423	1117	653	635	0,96
2,4	2350	1018	666	666	1.01
3,1	3818	2664	577	577	0,96
3,2	2637	1649	494	494	1.01
3,3	2423	1117	653	653	0,96
3,4	2350	1018	666	666	1.01
№ точки	Фактическое расстояние, км	Расчётное расстояние, км	Погрешность, %		Тип неисправности
1,1	2	2.02	1		Трёхфазное КЗ
1,2	4	4.04	1		двухфазное КЗ, фазы АВ
1,3	6	6.02	0,33		Трёхфазное КЗ
1,4	4	4.02	0.5		двухфазное КЗ, фазы АВ
1,5	10	9.707	0.7		Трёхфазное КЗ
2,1	2	2.02	1		двухфазное КЗ, фазы АВ
2,2	4	4.04	1		Трёхфазное КЗ
2,3	6	6.05	0,83		двухфазное КЗ, фазы АВ
2,4	8	8.07	0.87		Трёхфазное КЗ
3,1	2	2.02	1		двухфазное КЗ, фазы АВ
3,2	4	4.04	1		Трёхфазное КЗ
3,3	6	6.05	0,8		двухфазное КЗ, фазы АВ
3,4	8	8.03	0,4		Трёхфазное КЗ

Algorithm			
Data division:	Random		
Training algorithm:	Levenberg-Marquardt		
Performance:	Mean squared error		
Training Results			
Training start time:	09-Oct-2024 12:18:45		
Layer size:	10		
	Observations	MSE	R
Training	2946	0.0023	0.9236
Validation	631	0.0024	0.9213
Test	631	0.0028	0.9061

Рисунок 28 - Результат обучения нейронной сети (составлено автором)

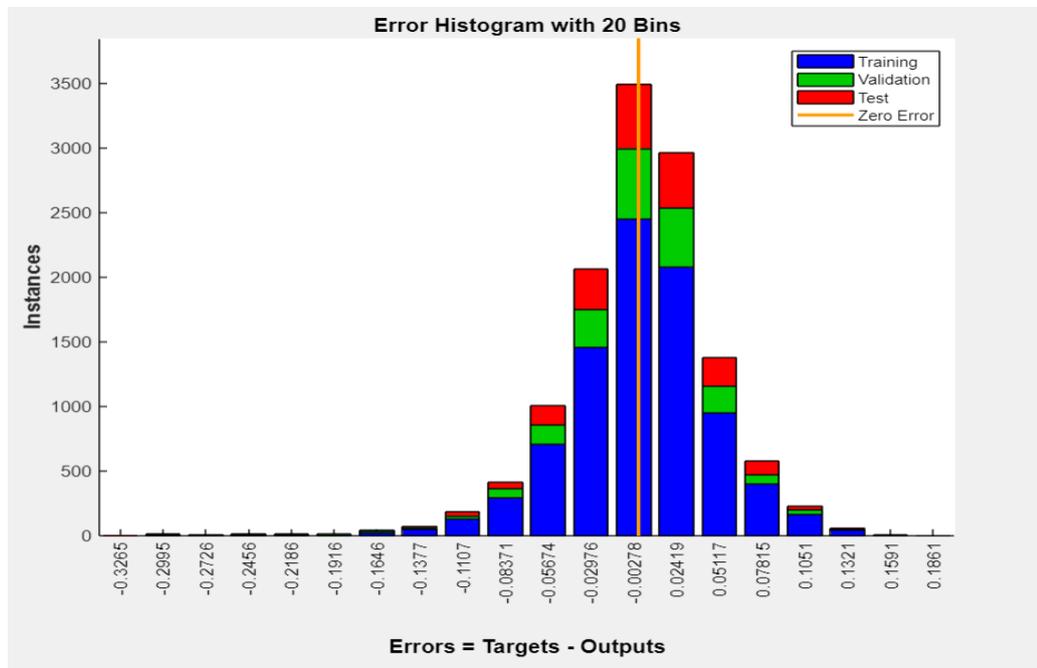


Рисунок 29 - Гистограмма ошибок, обучение ИНС для определения местоположения точки КЗ (составлено автором)

На рисунке 29 показано среднеквадратичное отношение ошибок для процессов обучения и тестирования, а результаты показывают приемлемые значения для обученной нейронной сети.

График производительности обучения нейронной сети показан на рисунке 30. Он представляет собой лучший результат проверки в данном случае с точки зрения MSE в конце фазы обучения.

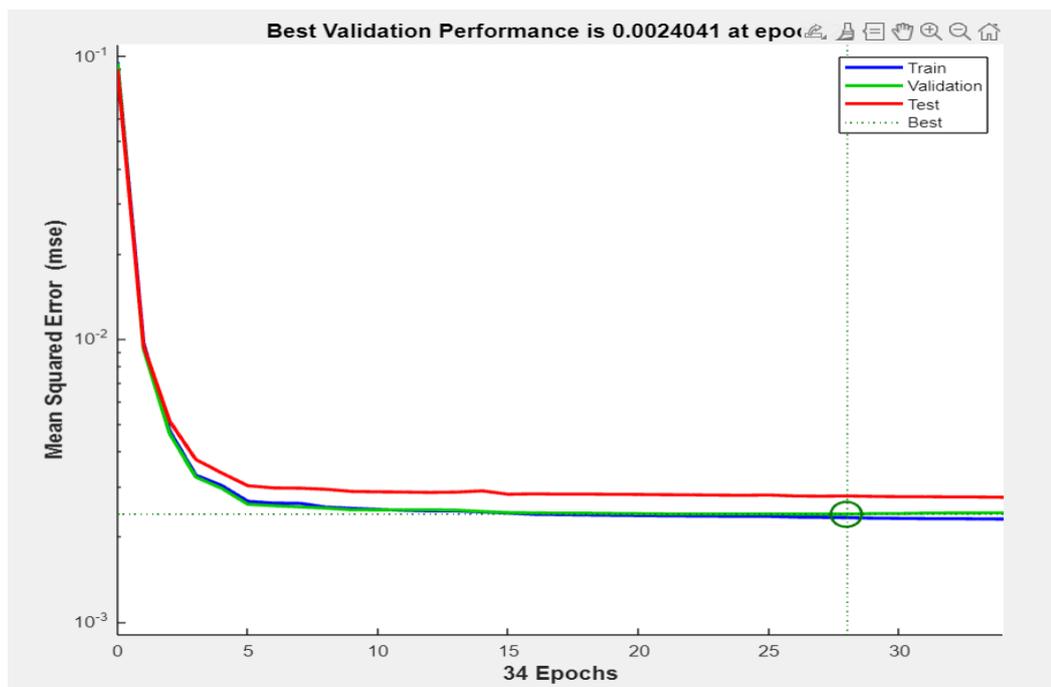


Рисунок 30 - Эффективность обучения ИНС для местоположения с MSE
(составлено автором)

3.4 Экспериментальные исследования

Эксперименты направлены на изучение того, как защитные устройства РЕТОМ71 и БМРЗ могут использоваться совместно для повышения эффективности дистанционной защиты, в частности, на то, как они способствуют измерению импеданса линий электропередачи и, таким образом, помогают пополнить базу данных, используемую для обучения нейронной сети.

РЕТОМ71: испытательный комплект (обычно релейный испытательный комплект), используемый для моделирования различных состояний энергосистемы и тестирования защитных реле. Он может подавать напряжение и ток в реле, позволяя проверять его работоспособность. Этот прибор не измеряет непосредственно фактическое сопротивление линии на месте во время нормальной работы, но используется для проверки способности реле точно измерять сопротивление в моделируемых условиях [67].

Устройство защиты БМРЗ: реле дистанционной защиты. Предназначено для защиты линий электропередачи путем их отключения при возникновении неисправности в определенной зоне на основе рассчитанного импеданса. БМРЗ рассчитывает импеданс на основе напряжений и токов, которые он измеряет в

месте своего расположения (обычно на распределительной подстанции). На рисунке 31 представлена схема эксперимента.

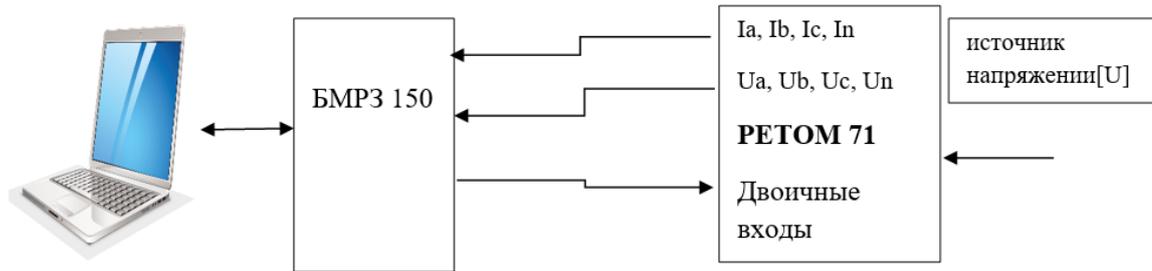


Рисунок 31 - Схема эксперимента (составлено автором)

Реле БМРЗ измеряет напряжение (V) и ток (I) в месте своего расположения на линии электропередачи. Импеданс (Z) рассчитывается с использованием закона Ома. Этот расчет выполняется непрерывно для контроля состояния линии. Точность измерения импеданса очень важна для эффективной защиты расстояния. Если импеданс измерен неправильно, реле не может обнаружить неисправность в пределах своей определенной области или срабатывает без необходимости из-за неисправности за пределами своего диапазона, вызывая нежелательные прерывания. Реле сравнивает измеренное сопротивление с заданными зонами сопротивления (настройками досягаемости). Если измеренное сопротивление попадает в зону неисправности, реле активирует автоматические выключатели, чтобы изолировать неисправный участок.

Для моделирования неисправностей в эксперименте РЕТОМ71 подает контролируемые сигналы напряжения и тока в реле БМРЗ, имитируя различные условия неисправности (различные типы неисправностей, места неисправностей на линии, сопротивления неисправностей и т.д.). Затем проверяются настройки, чтобы увидеть, правильно ли реле БМРЗ рассчитывает импеданс и срабатывает в указанном диапазоне (рисунок 32). Полученные данные загрузились в физическую модель, а затем изучалась совместная работа алгоритма в сравнении с модельными значениями. Таким образом, формировалась необходимая база данных.

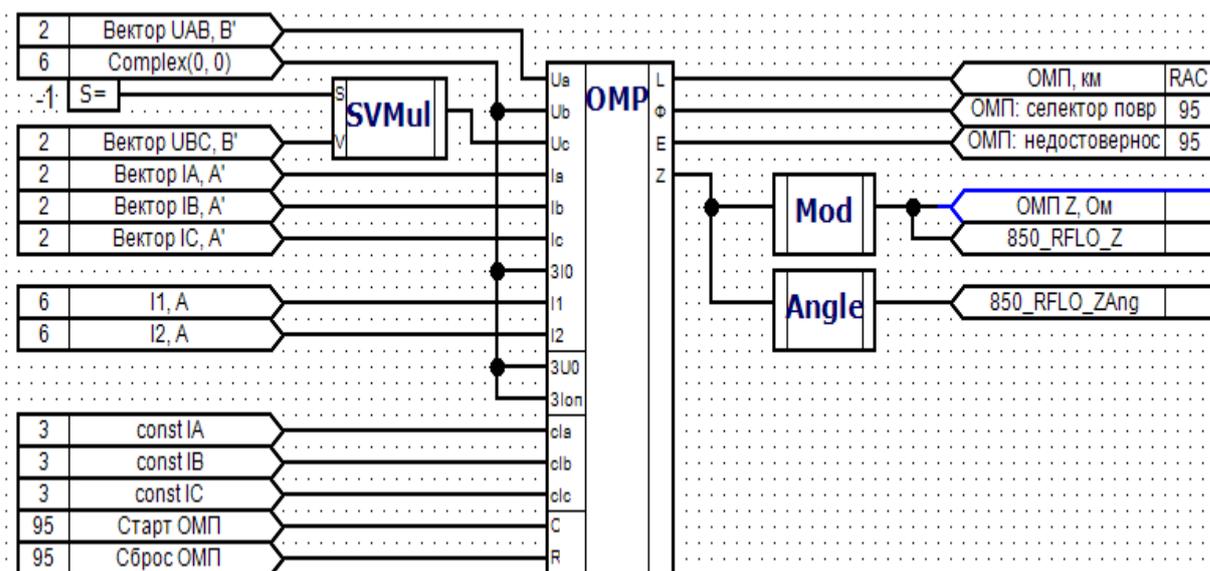


Рисунок 32 - Логическая схема расчета сопротивления защиты
(составлено автором)

На рисунке 33 показан результат эксперимента. Проанализировав его, можно сказать, что в момент, когда на линии подается нагрузка, а фазные токи принимают номинальные значения, происходит короткое замыкание в точке 1,1, согласно таблице 7.

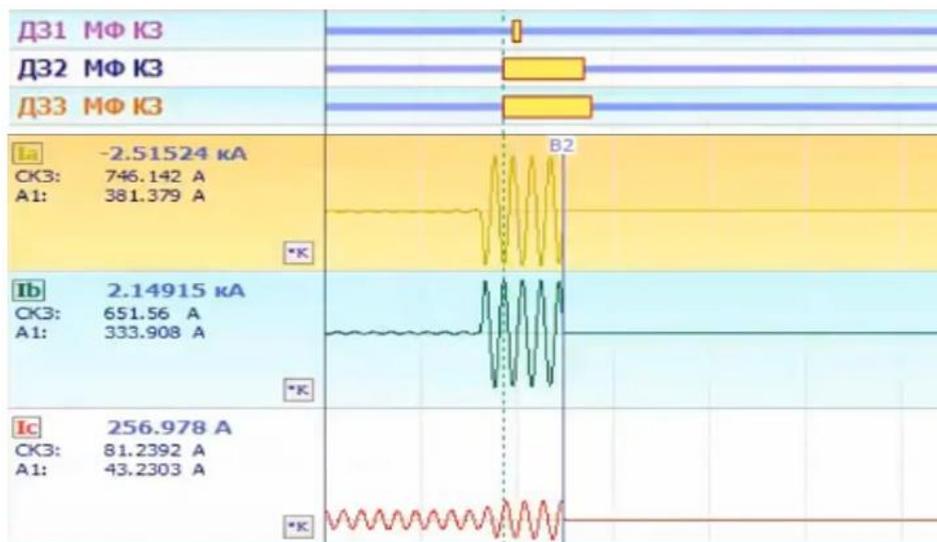


Рисунок 33 - Токи, фиксируемые защитой при КЗ в точке 1,1 (составлено автором)

РЕТОМ71 может моделировать динамические условия неисправности (например, неисправности, которые развиваются с течением времени) для проверки скорости реакции и стабильности реле, а также интегрируется с ЦП, тем

самым повышая способность реле различать неисправности в условиях изменяющейся нагрузки.

Затем выполняется калибровка, то есть можно изменить (откалибровать) настройки реле, чтобы скорректировать их. Это может включать корректировку:

- настройки коэффициента трансформации трансформатора тока (ТТ);
- настройки коэффициента трансформации трансформатора напряжения (VТ);
- настройки компенсации импеданса (для учета импеданса нулевой последовательности).

РЕТОМ71 не измеряет сопротивление линии напрямую в режиме реального времени. Скорее, он действует как высокоточный симулятор для тестирования и калибровки реле БМРЗ, гарантируя, что расчеты импеданса самого реле будут максимально точными. Путем точного тестирования и калибровки БМРЗ с помощью РЕТОМ71 можно значительно повысить надежность и эффективность дистанционной защиты, сформировав точную базу данных для обучения нейронной сети с целью снижения риска ложных срабатываний и более быстрого устранения неисправностей.

3.5 Выводы к Главе 3

1. После аналитического исследования влияния параметров электротехнических комплексов и распределенной сети стало ясно, что изменение этих параметров оказывает явное влияние на работоспособность дистанционной защиты, особенно на точность расчета расстояния до места повреждения.

2. Установлено влияние изменения параметров электротехнических комплексов с системой распределенной генерации на эффективность действия дистанционной защиты. При увеличении значения переходного сопротивления КЗ от 2 до 10 Ом, погрешность при определении точки КЗ изменяется от 6 до 20%; при увеличении нагрузки от 0,5 до 2 МВт, погрешность при определении точки КЗ изменяется от 5 до 9 %; при уменьшении уровня генерации с 6 до 2 МВт, погрешность при определении точки КЗ уменьшилась от 12 до 8 %.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМЕ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

4.1 Разработка структуры устройства защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией

Защита играет решающую роль в обеспечении надежности функционирования электротехнических комплексов, быстро изолируя неисправности, предотвращая каскадные отключения и сводя к минимуму перерывы в обслуживании [47]. Однако растущая сложность электросетей, интеграция возобновляемых источников энергии бросили вызов традиционным системам защиты, требуя повышения показателей надежности. Поэтому необходимо разрабатывать системы связи и управления для дистанционной защиты, подчеркивая необходимость повышения надежности [49].

Предлагаемое устройство относится к области релейной защиты элементов электрических систем. Технический результат заключается в повышении чувствительности дистанционной защиты к коротким замыканиям. Устройство может быть использовано в качестве ступени дистанционной защиты линии электропередачи с ответвлением, предназначенной для действия при коротких замыканиях в системе с распределенной генерацией. Устройство содержит комплект элементов в противоположном конце защищаемой линии, для определения сопротивления, и блок, анализирующий сигналы измерительных органов сопротивления комплекта элементов, установленных в месте установки защиты.

Технический результат достигается тем, что устройство состоит из симметрично установленного комплекта элементов, установленных в месте установки защиты и комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии, где комплект элементов, установленных в месте установки защиты и комплект элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии, включают трансформаторы тока линии установленные на защищаемой линии, выходы

которых соединены с входами устройств приема-передачи сигналов, первых сумматоров и преобразователей тока в напряжение, выходы преобразователей тока в напряжение соединены с инвертирующими входами второго сумматора, выходы трансформаторов напряжения систем шин соединены с входами вторых сумматоров, выходы с вторых сумматоров и первых сумматоров соединены с входами измерительных органов сопротивления, выходы и входы устройств приема-передачи сигналов соединены входами и выходами блока двухстороннего обмена информацией, выход измерительного органа сопротивления комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии, соединен с входом устройства передачи сигналов, выход которого соединен с входом блока одностороннего обмена информацией, выход которого соединен с входом устройства приема сигналов, выходы измерительного органа сопротивления комплекта элементов, установленных в месте установки защиты, и устройства приема сигналов соединены с входами блока нейронных сетей, выход которого соединен с входом органа выдержки времени, выход органа выдержки времени соединен со входом исполнительного органа, выход которого соединяется выходом устройства в целом», «блока нейронных сетей, анализирующего сигналы измерительных органов сопротивления комплекта элементов, установленных в месте установки защиты, и комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии, сравнивающего сигналы с характеристикой срабатывания и подающего сигнал на вход органа выдержки времени, если сигналы оказываются в области срабатывания защиты.

Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией поясняется следующей фигурой (рисунок 34).

Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией 21 состоит из симметрично установленного комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19 и комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20.

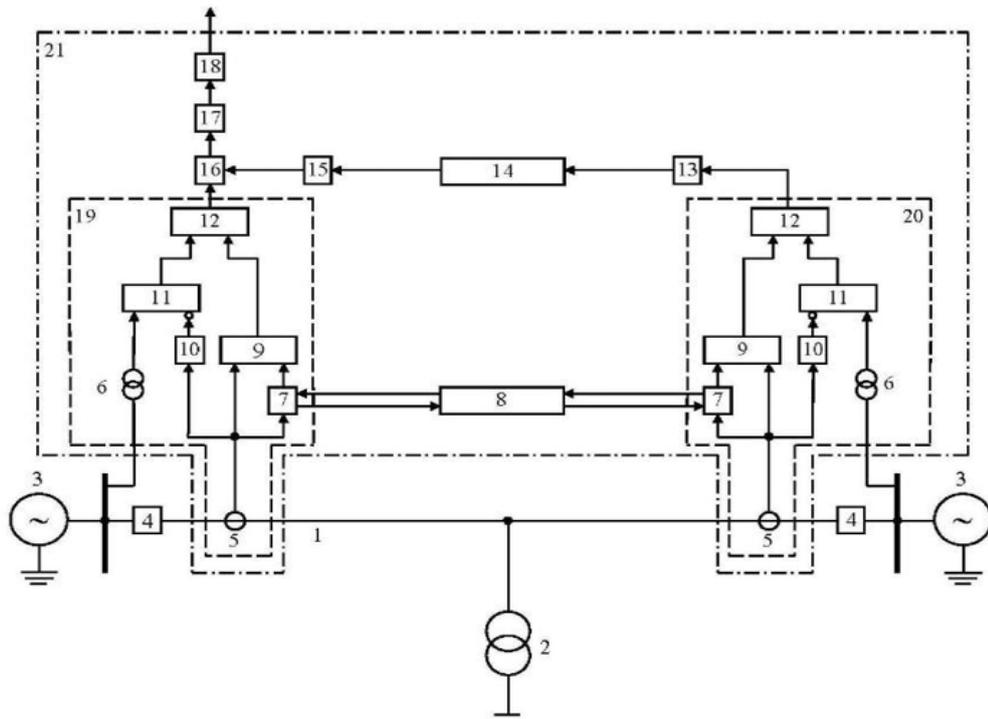


Рисунок 34 - Общая схема устройства [68],

где 1 – защищаемая линия; 2 – ответвление от линии с трансформатором ответвления; 3 – источник питания; 4 – выключатель линии; 5 – трансформатор тока линии; 6 – трансформатор напряжения системы шин; 7 – устройство приема-передачи сигналов; 8 – блок двухстороннего обмена информацией; 9 – первый сумматор; 10 – преобразователь тока в напряжение; 11 – второй сумматор; 12 – измерительный орган сопротивления; 13 – устройство передачи сигналов; 14 – блок одностороннего обмена информацией; 15 – устройство приема сигналов; 16 – блок нейронных сетей; 17 – орган выдержки времени; 18 – исполнительный орган; 19 – комплект элементов, установленных в месте установки защиты; 20 – комплект элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии; 21 – устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией

Комплект элементов, установленных в месте установки защиты 19 и комплект элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20 включают трансформаторы тока линии 5 установленные на защищаемой линии 1, выходы которых соединены с входами устройств приема-передачи сигналов 7, первых сумматоров 9 и преобразователей тока в напряжение 10. Выходы преобразователей тока в напряжение 10 соединены с

инвертирующими входами второго сумматора 11, выходы трансформаторов напряжения систем шин 6 соединены с входами вторых сумматоров 11. Выходы с вторых сумматоров 11 и первых сумматоров 9 соединены с входами измерительных органов сопротивления 12. Выходы и входы устройств приема-передачи сигналов 7 соединены входами и выходами блока двухстороннего обмена информацией 8. Выход измерительного органа сопротивления 12 комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, соединен с входом устройства передачи сигналов 13, выход которого соединен с входом блока одностороннего обмена информацией 14, выход которого соединен с входом устройства приема сигналов 15. Выходы измерительного органа сопротивления 12 комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, и устройства приема сигналов 15 соединены с входами блока нейронных сетей 16, выход которого соединен с входом органа выдержки времени 17. Выход органа выдержки времени 17 соединен со входом исполнительного органа 18, выход которого соединяется выходом устройства в целом.

Устройство защиты работает следующим образом. На первый вход первого сумматора 9, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, подается ток от трансформатора тока линии 5 в месте установки защиты 19. Аналогично, на первый вход первого сумматора 9, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, подается ток от трансформатора тока линии 5 в противоположном конце защищаемой линии. На второй вход первого сумматора 9, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, через устройство приема-передачи сигналов 7 и блок двухстороннего обмена информацией 8 подается ток от трансформатора тока 5, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20. Аналогично, на второй вход первого сумматора 9, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой

линии 20, через устройство приема-передачи сигналов 7 и блок двухстороннего обмена информацией 8 подается ток от трансформатора тока 5, входящего в состав комплекта элементов, установленных вместе установки защиты 19. Поэтому на токовые входы измерительных органов сопротивления 12, входящих в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, и в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, подаются токи, равные сумме токов по концам защищаемой линии 1 (48):

$$\dot{I}_{\text{защ},1} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \quad (48)$$

где $\dot{I}_{\text{защ},1}$ - ток от трансформатора тока линии 5, входящего в состав комплекта элементов,

\dot{I}_1 - ток от трансформатора тока линии в месте установки первого комплекта защиты 7; установленных в месте установки защиты 19,

\dot{I}_2 - ток от трансформатора тока линии 5, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20.

На вход преобразователя тока в напряжение 10, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, подается ток от трансформатора тока линии 5, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19. Коэффициент передачи преобразователя тока в напряжение 10, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, принимается равным сопротивлению защищаемой линии 1 от места установки комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, до ответвления от линии с трансформатором ответвления от линии с трансформатором ответвления 2. Поэтому напряжение на выходе преобразователя тока в напряжение 10 будет равно падению напряжения от тока в месте комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, на сопротивлении части защищаемой линии 1. Это напряжение подается на второй вход второго сумматора 11, а на его первый вход подводится напряжение от трансформатора напряжения системы шин 6, входящего в состав комплекта

элементов, установленных в месте установки защиты 19. Поэтому к входу напряжения измерительного органа сопротивления 12, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, подводится напряжение, равное (49):

$$\dot{U}_{\text{защ.1}} = \dot{U}_{\text{ш.1}} - \dot{I}_1 * Z_{\text{л.1}}, \quad (49)$$

где $\dot{U}_{\text{защ.1}}$ - напряжение на втором входе первого измерительного органа сопротивления 12 входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19;

$\dot{U}_{\text{ш.1}}$ - напряжение трансформатора напряжения системы шин 6, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19;

$Z_{\text{л.1}}$ - сопротивление части защищаемой линии 1 от места установки комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, до места ответвления от линии с трансформатором ответвления 2.

Измерительный орган сопротивления 12, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, реагирует на величину сопротивления, равную по формуле 50:

$$Z_{\text{защ.1}} = \frac{\dot{U}_{\text{ш.1}} - \dot{I}_1 * Z_{\text{л.1}}}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}, \quad (50)$$

где $Z_{\text{защ.1}}$ - замер сопротивления измерительного органа сопротивления 12, входящего в состав комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19.

Аналогично, на вход преобразователя тока в напряжение 10, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, подается ток от трансформатора тока линии 5, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20. Коэффициент передачи преобразователя тока в напряжение 10, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, принимается равным сопротивлению защищаемой линии 1 от места установки комплекта

элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, до ответвления от линии с трансформатором ответвления 2. Поэтому напряжение на выходе преобразователя тока в напряжение 10 будет равно падению напряжения от тока в месте установки комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, на сопротивлении части защищаемой линии 1. Это напряжение подается на второй вход второго сумматора 11, а на его первый вход подводится напряжение от трансформатора напряжения системы шин 6, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20. Поэтому к входу напряжения измерительного органа сопротивления 12, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, подводится напряжение, равное (51):

$$\dot{U}_{\text{защ.2}} = \dot{U}_{\text{ш.2}} - \dot{I}_2 * Z_{\text{л.2}} \quad (51)$$

где $\dot{U}_{\text{защ.2}}$ - напряжение на втором входе первого измерительного органа сопротивления 12 входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20;

$\dot{U}_{\text{ш.2}}$ - напряжение трансформатора напряжения системы шин 6, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20;

$Z_{\text{л.2}}$ - сопротивление части защищаемой линии 1 от места установки комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, до места ответвления от линии с трансформатором ответвления 2.

Измерительный орган сопротивления 12, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, реагирует на величину сопротивления, равную (52):

$$Z_{\text{защ.2}} = \frac{\dot{U}_{\text{ш.2}} - \dot{I}_2 * Z_{\text{л.2}}}{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}, \quad (52)$$

где $Z_{\text{защ.2}}$ замер сопротивления измерительного органа сопротивления 12, входящего в состав комплекта элементов, установленных в противоположном

конце защищаемой линии 20.

Измерительный орган сопротивления 12 комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, через устройство передачи сигналов 13, блок одностороннего обмена информацией 14 и устройство приема сигналов 15 подает сигнал на блок нейронных сетей 16. Аналогично, измерительный орган сопротивления 12 комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, также подает сигнал на блок нейронных сетей 16.

Блок нейронных сетей 16 анализирует сигналы измерительных органов сопротивления 12 комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, и комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, сравнивает сигналы с характеристикой срабатывания и подает сигнал на вход органа выдержки времени 17, если сигналы оказываются в области срабатывания защиты. Через время, равное времени срабатывания, орган выдержки времени 17 подает сигнал на вход исполнительного органа 18, выход которого является выходом устройства. С выхода исполнительного органа 18 передается сигнал о срабатывании защиты с действием на отключение выключателя линии 4 в месте установки комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19.

Для обеспечения несрабатывания в нагрузочном режиме и при внешних коротких замыканиях характеристика срабатывания защиты отстраивается только от сопротивления нагрузки трансформатора ответвления 2.

При коротком замыкании за трансформатором ответвления от линии с трансформатором ответвления 2 замер предлагаемого устройства защиты равен сопротивлению от места ответвления до места короткого замыкания.

В нагрузочном режиме сумма токов по концам защищаемой линии 1 равна току нагрузки ответвления от линии с трансформатором ответвления 2. Поэтому замер сопротивления в нагрузочном режиме оказывается равным сопротивлению нагрузки ответвления 2.

При внешних коротких замыканиях за пределами защищаемой линии 1

сумма токов по концам линии также оказывается равной току ответвления от линии с трансформатором ответвления 2. Поэтому замер сопротивления в этих режимах также равен сопротивлению нагрузки ответвления от линии с трансформатором ответвления 2.

Для обеспечения чувствительности защиты к повреждению за трансформатором ответвления от линии с трансформатором ответвления 2 характеристика срабатывания защиты должна охватывать только сумму сопротивлений: сопротивления линии от места ответвления до трансформатора и сопротивления трансформатора ответвления от линии с трансформатором ответвления 2.

Для обеспечения несрабатывания в нагрузочном режиме и при внешних коротких замыканиях характеристика срабатывания защиты отстраивается только от сопротивления нагрузки трансформатора ответвления 2.

Для обеспечения селективности при повреждениях за трансформатором ответвления от линии с трансформатором ответвления 2 время срабатывания органа выдержки времени 17 устройства защиты выбирается больше времени срабатывания резервной защиты трансформатора ответвления от линии с трансформатором ответвления 2

Фиксируемые значения сопротивлений измерительными органами сопротивления 12 комплекта элементов, установленных в месте установки защиты 19, и комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии 20, при одно, двух, трехфазных коротких замыканиях, при коротких замыканиях через переходное сопротивление, при нагрузочном режиме, при внешних коротких замыканиях будут различными. Обучение нейронной сети позволит повысить надёжности и чувствительность действия защиты выше существующей.

Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией за счет установки дополнительного комплекта элементов в противоположном конце защищаемой линии, для определения сопротивления, а также блока нейронных сетей позволяет повысить надёжности

и чувствительность дистанционной защиты к коротким замыканиям[68].

4.2 Оценка показателей надежности защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией

Надежная работа электротехнических комплексов имеет решающее значение для обеспечения экономического роста, социального благополучия и национальной безопасности. Дистанционная защита, ключевой компонент защиты, выступает в качестве первой линии защиты от неисправностей, сводя к минимуму перерывы в обслуживании. Это важнейшая технология, отвечающая за изоляцию неисправных участков, тем самым защищая целостность системы и обеспечивая непрерывность электроснабжения. Традиционно дистанционные реле защиты полагались на аналоговые технологии и были в первую очередь сосредоточены на локальном обнаружении неисправностей. Однако развивающаяся природа систем с распределенной генерацией привела к серьезным проблемам. Эти проблемы включают [69]:

- повышение сложности сети: современные электросети становятся все более сложными, а взаимосвязанные сети охватывают огромные расстояния. Включение распределенных источников генерации, таких как солнечные и ветровые электростанции, еще больше увеличило сложность сети.

- интеграция возобновляемых источников энергии: интеграция возобновляемых источников энергии, особенно прерывистых источников, таких как солнечные и ветровые, создает проблемы для дистанционной защиты из-за их непредсказуемой природы и потенциала быстрых изменений в состоянии системы.

- рост киберугроз: растущая зависимость от цифровых систем связи и управления в электросетях подвергает их киберугрозам (рисунок 35). Эти угрозы могут нарушать нормальную работу, манипулировать сигналами управления и даже вызывать массовые отключения электроэнергии.

Эти проблемы подчеркнули необходимость повышения надежности систем дистанционной защиты.

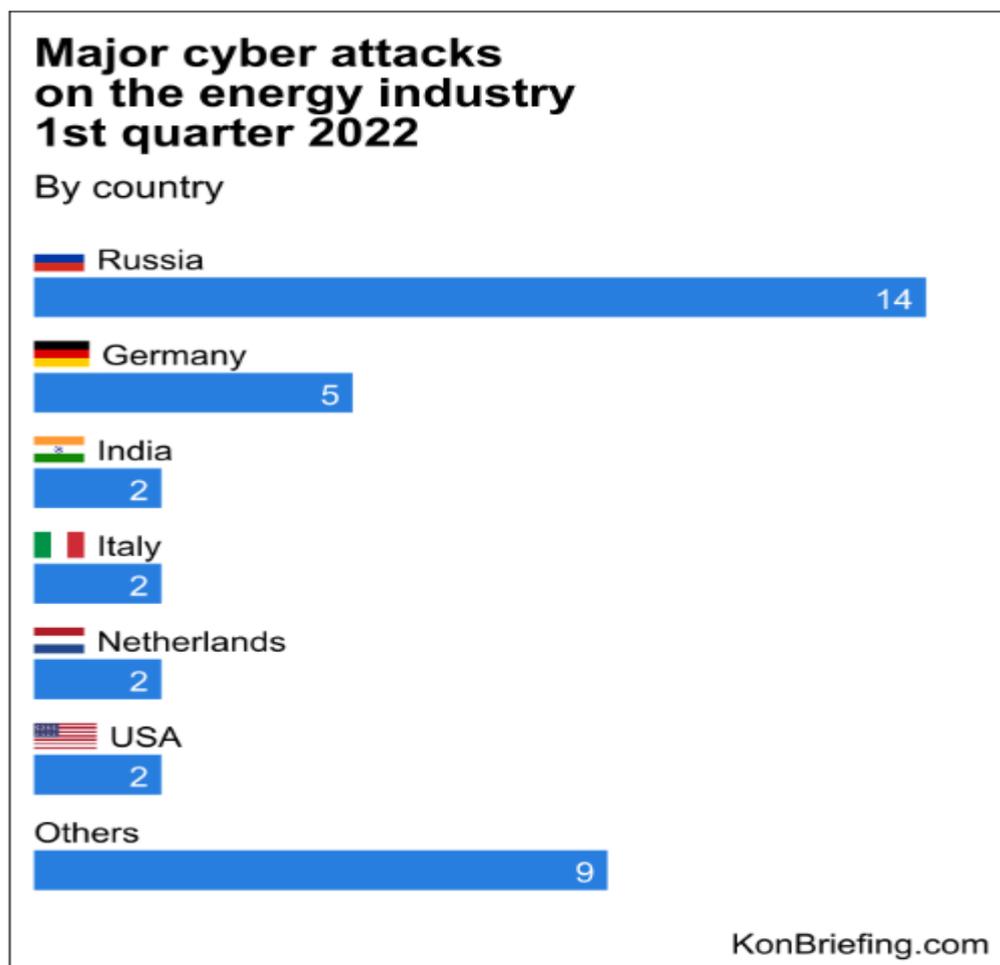


Рисунок 35 - Крупные кибератаки на энергетическую отрасль в 1 квартале 2022 г.

[70]

Методологией оценки надежности являются вероятностные методы, блок-схема надежности (RBD) и анализ индексов средней частоты прерываний системы (SAIFI), индекса средней продолжительности прерываний системы (SAIDI) и индекса средней продолжительности прерываний клиента (CAIDI) [70]. На рисунке 36 показано улучшение показателей индекса средней частоты прерываний системы (SAIFI), индекса средней продолжительности перерывов в системе (SAIDI) и индекса средней продолжительности прерываний для клиентов (CAIDI).

SAIDI (индекс средней длительности перерывов в работе системы): представляет среднюю продолжительность перерывов, с которыми сталкивается каждый клиент за определенный период (например, год).

$$SAIDI = \Sigma(t)/n,$$

где t - продолжительность простоя у клиента, n общее количество клиентов. Более низкий SAIDI указывает на более высокую надежность

SAIFI (индекс средней частоты перерывов в работе системы): представляет среднее количество перерывов, с которыми сталкивается каждый клиент за определенный период.

$$SAIFI = \Sigma(b) / n$$

где b количество перерывов у клиента

Более низкий SAIDI указывает на более высокую надежность (снижение, в 9 раз за счет уменьшения количества случаев ложных срабатываний в исследуемой сети.)

CAIDI (индекс средней длительности перерывов у клиента): представляет среднюю продолжительность перерывов, с которыми сталкивается каждый клиент, столкнувшийся с перерывом в работе. Это исключает клиентов, у которых не было перерывов в работе.

$$CAIDI = SAIDI / SAIFI$$

На основании годового статистического отчета определена продолжительность отключений, вызванных некорректным отключением защит в распределительной сети Сирии - южный сектор 460,5 минут в год, что выше, чем в других соседних странах, имеющих более стабильные электрические сети. Используя усовершенствованный алгоритм на основе нейронных сетей, можно снизить погрешность определения расстояния до неисправности с 9% до 1%. (Снижение в 9 раз за счет уменьшения количества случаев ложных срабатываний в исследуемой сети (рисунок 36).

В приложении В приведены статистические данные действия релейной защиты по южному сектору Сирийской республики. Южный сектор в Республике Сирия состоит из пяти центральных генерирующих станций и двух распределенных источников генерации ветряных и солнечных по 6 МВт, 75 шин (41 шина на 20 кВ 830 линий 0,4 кВ и 34 шины на 66 кВ), линий электропередачи 66 кВ и подстанций 66/20 кВ. Схема упрощенной системы представлена Приложении Г. Частота системы составляет 50 Гц. Система содержит много

жизненно важных нагрузок, таких как промышленные, коммерческие и жилые объекты.

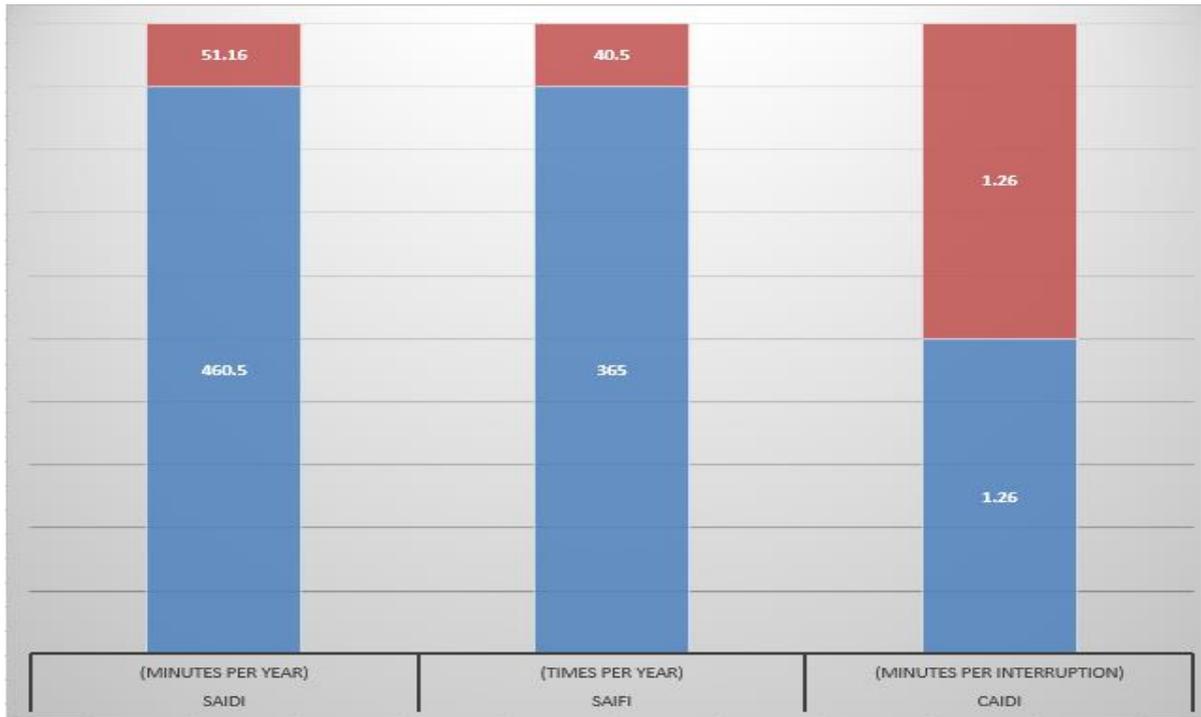


Рисунок 36 - Оценка надежности системы распределения электроэнергии С ИНС, SAIFI, SAIDI, CAIDI [71]

Данные сети, включая линии электропередачи, а также отчеты о нагрузках и неисправностях, предоставлены Министерством электроэнергетики Сирии (таблица 9).

Таблица 9 - Показатели надежности за счет снижения частоты ложных срабатываний (Статистика Национального центра энергетических исследований - Сирия) [71]

-	SAIDI	SAIFI	CAIDI
-	(minutes per year)	(times per year)	(minutes per interruption)
Без ИНС	460.5	365	1.26
С ИНС	51.16	40.5	1.26

4.3 Оценка чувствительности действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией

Искусственные нейронные сети (ИНС) предлагают альтернативный подход. В ходе этого сравнения анализируется чувствительность всех традиционных

методов и предлагаемого улучшенного метода, а также исследуется их эффективность при различных условиях ошибок.

Трехфазная линия электропередачи, рассматриваемая в нашей модели Matlab, моделируется с повреждениями в различных местах, величинами переходного сопротивления и видами повреждений. В традиционной схеме дистанционной защиты используется измерение полного сопротивления с фиксированной настройкой реле. Искусственная нейронная сеть обучается с использованием данных из различных сценариев сбоев. Обученная искусственная нейронная сеть производит классификацию «неисправностей» на основе параметров исследуемой линии. Выполним оценку погрешности измерения сопротивления.

На рисунках 37-41 показаны погрешности при измерении сопротивления при различных методах:

- метод 1: с учетом поправочного коэффициента K , учитывающего подпитывающий эффект от дополнительных источников;
- метод 2: с учетом выявленных зависимостей расстояния до точки повреждения от сопротивления с учетом подпитывающего эффекта;
- метод 3: основанный на эквивалентном преобразовании расчетной схемы методом Тевенина;
- метод 4: основанный на преобразовании Стоквелла FDST;
- метод 5: с использованием нейронных сетей.

Величина переходного сопротивления в точке КЗ принята равной 10 Ом.

В третьей главе показаны характеристики предлагаемой схемы защиты для различных случаев повреждения, возникающих на дальнем конце линии от точки реле с различными местами повреждения. Работоспособность предложенной схемы защиты была проверена на расстоянии до 9,9 км, то есть 99,9% длины линии, и было обнаружено, что предложенный алгоритм защиты способен обнаруживать/классифицировать и локализовать все типы замыканий, точность классификации 99%.

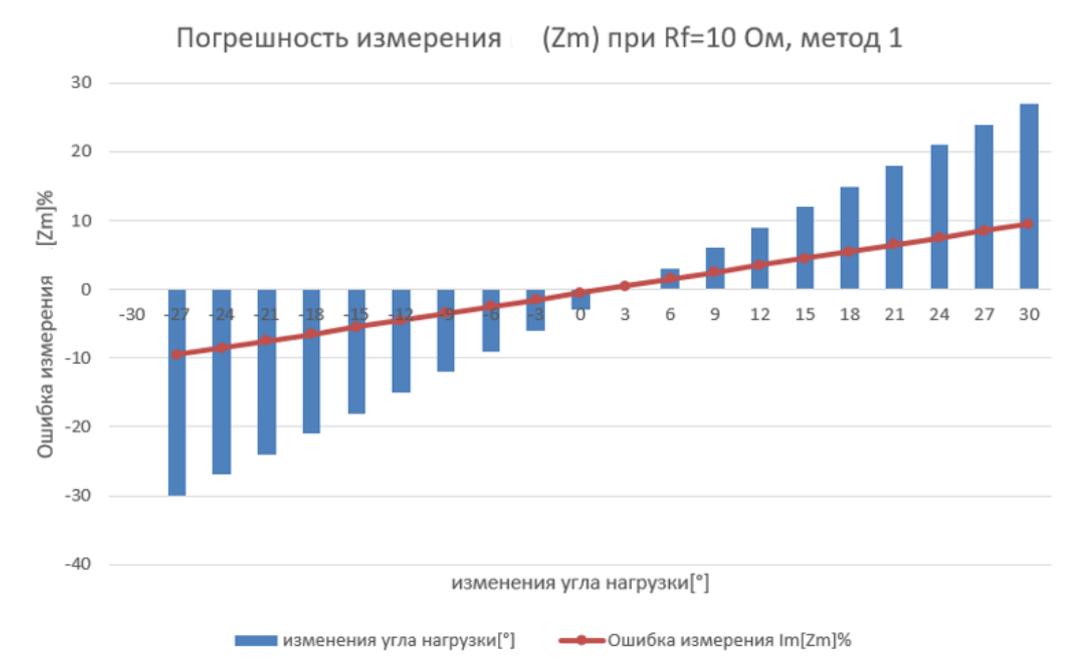


Рисунок 37- Погрешности измерения (Z_m) сопротивления до точки КЗ при изменении характера нагрузки, метод 1 (составлено автором)

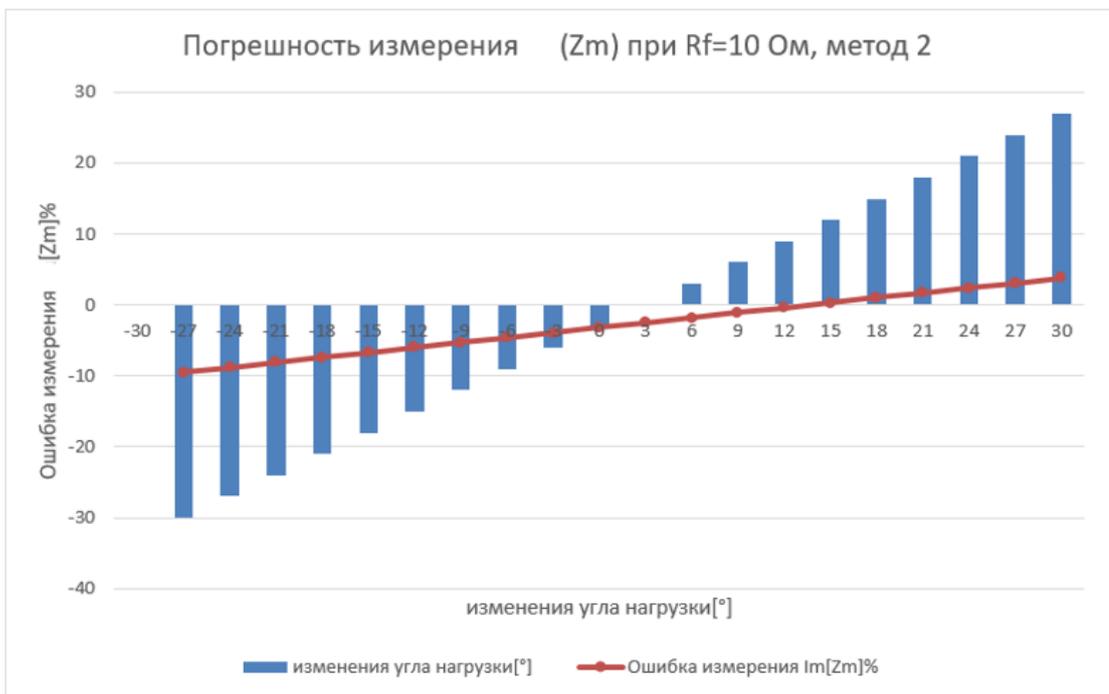


Рисунок 38 – Погрешности измерения (Z_m) сопротивления до точки КЗ при изменении характера нагрузки, метод 2 (составлено автором)

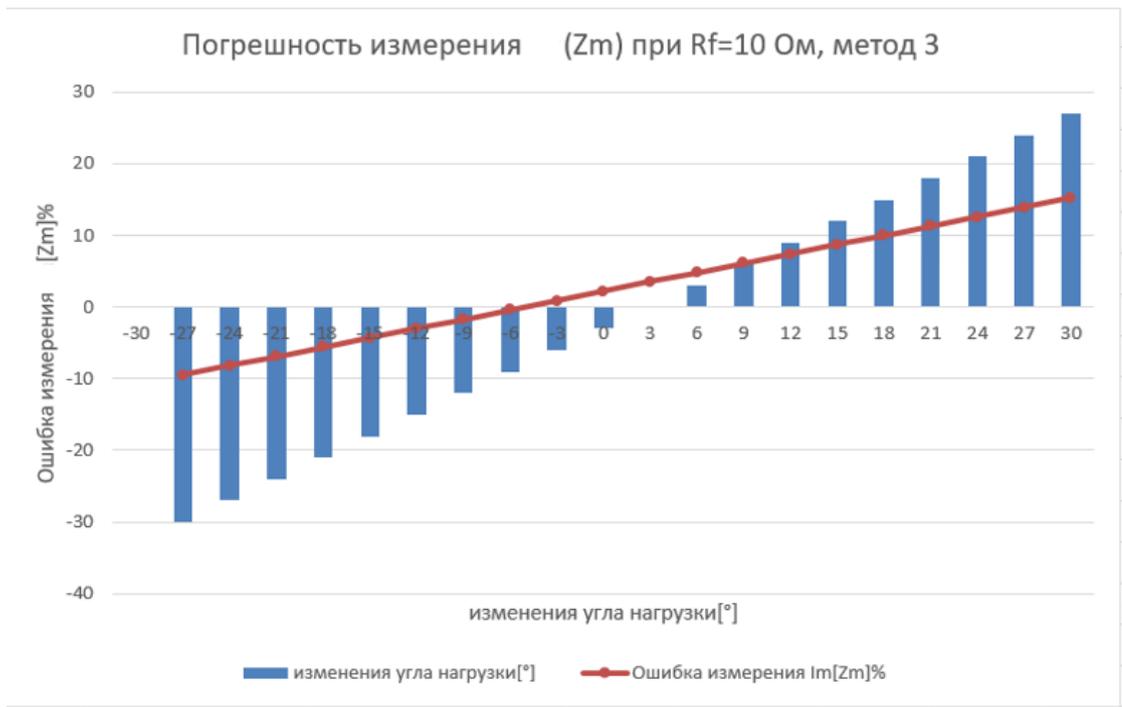


Рисунок 39 - Погрешности измерения (Zm) сопротивления до точки КЗ при изменении характера нагрузки, метод 3 (составлено автором)

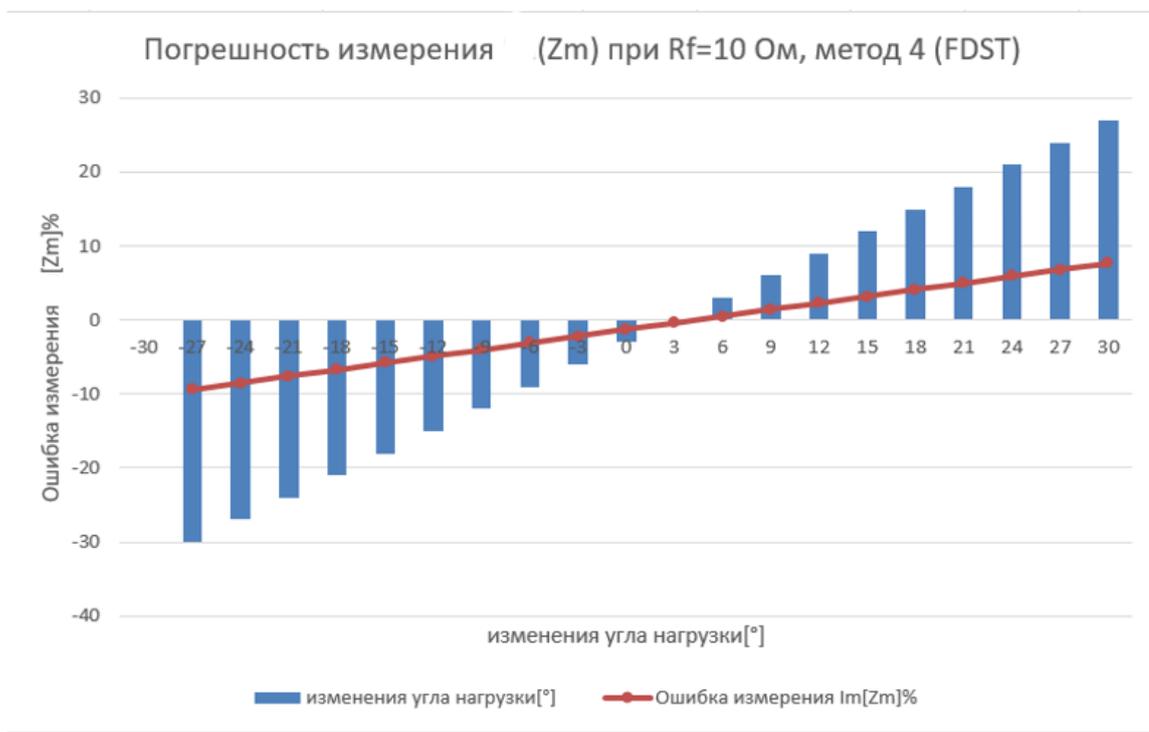


Рисунок 40 - Погрешности измерения (Zm) сопротивления до точки КЗ при изменении характера нагрузки, метод 4 (составлено автором)

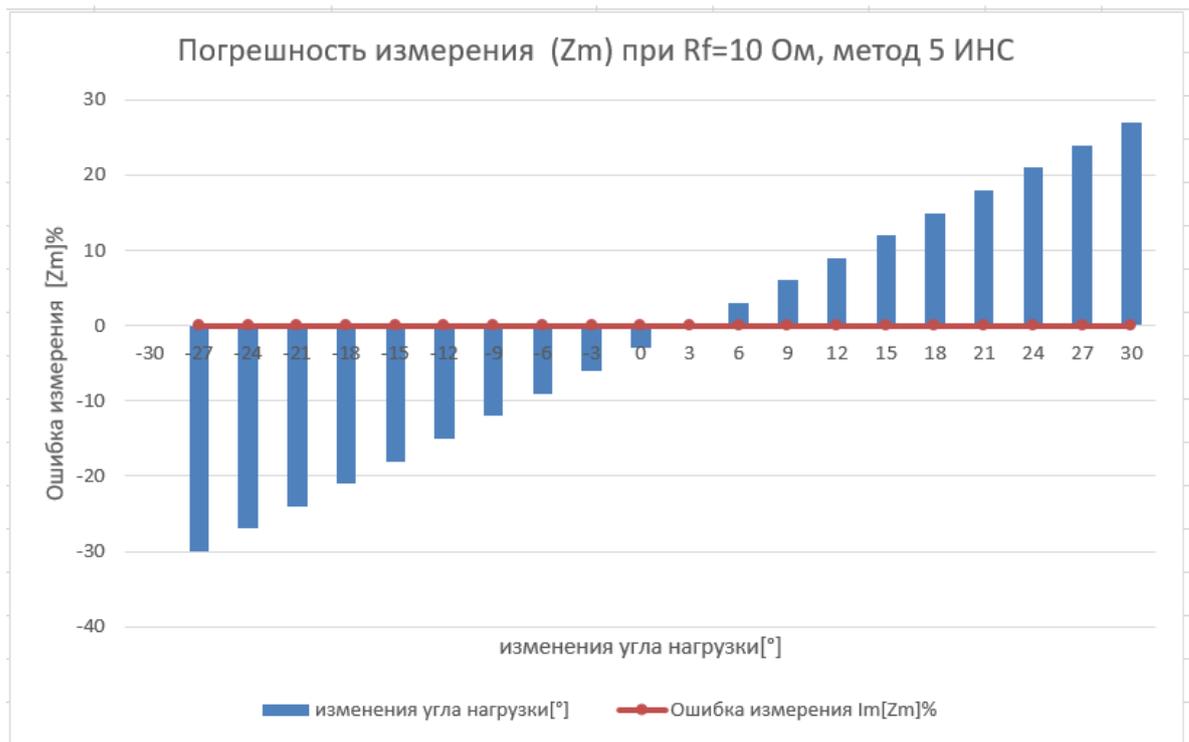


Рисунок 41 - Погрешности измерения (Z_m) сопротивления до точки КЗ при изменении характера нагрузки, метод 5 (составлено автором)

Предложенная таким образом схема позволяет специалистам по защите увеличить диапазон настройки до 99,9% от общей длины линии, то есть большая часть длины линии может быть защищена и может использоваться как основное средство защиты или как дополнительное, резервное.

На рисунке 42 видно, что в 97% случаев нейросеть в сочетании с дистанционной защитой определяет место и тип повреждения. Это означает, что для оставшихся 3% набора данных нейронная сеть находилась в состоянии неопределенности, пытаясь классифицировать область ошибки. Показано, что общее сравнение четырех традиционных методов работы дистанционных защит с эффектом дополнительного электропитания от блоков распределенной генерации с предложенным алгоритмом.

Выполним сравнение коэффициента чувствительности дистанционного реле, разработанного с использованием нейронной сети, с четырьмя традиционными методами. Коэффициент чувствительности дистанционного реле является важным параметром, определяющим его способность обнаруживать неисправности в пределах защищаемой зоны.

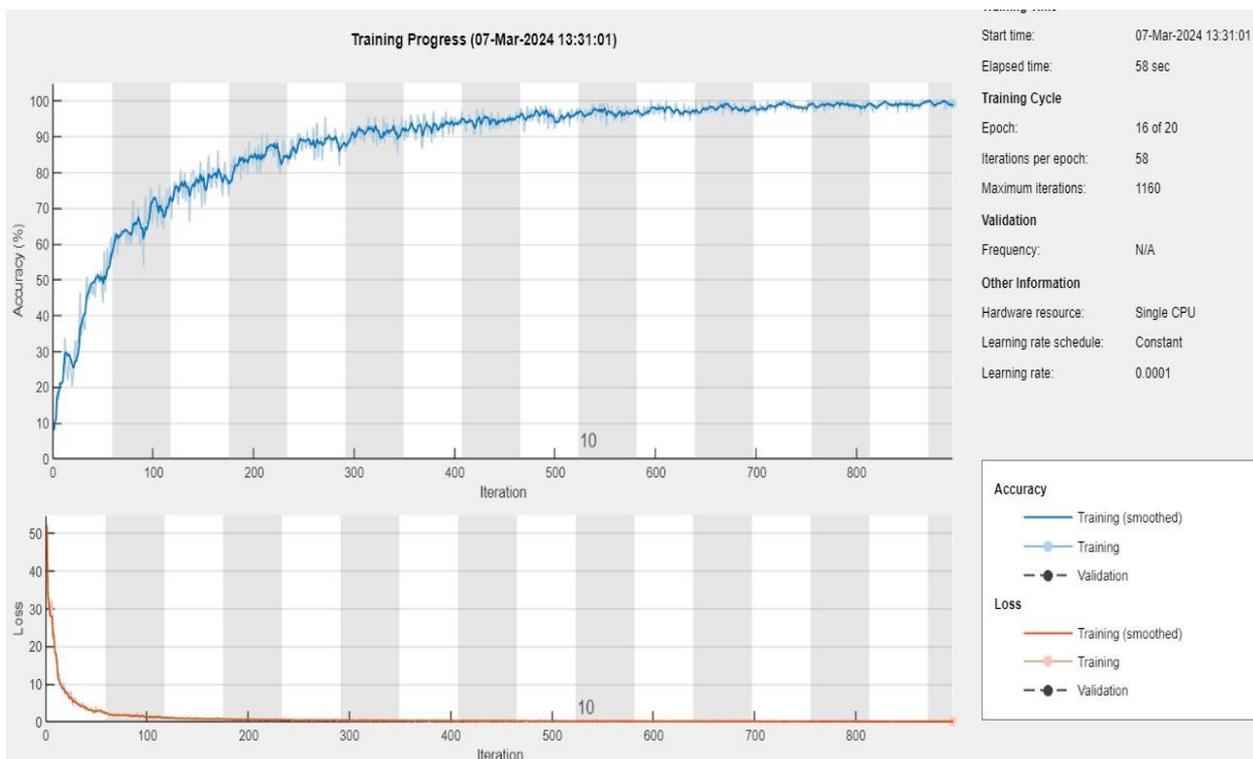


Рисунок 42 - Производительность обучения нейронной сети [60]

Это мера чувствительности реле к изменениям импеданса, вызванным неисправностями. Коэффициент чувствительности (K) представляет собой отношение максимального импеданса, который может обнаружить реле (Z_{max}), к минимальному импедансу, который может обнаружить реле (Z_{min}) (формула 53):

$$K = Z_{max} / Z_{min} \quad (53)$$

где Z_{max} - максимальный импеданс, который реле может обнаружить без срабатывания. Обычно это импеданс в конце защищаемой зоны.

Z_{min} : представляет собой минимальный импеданс, который реле может обнаружить и сработать. Обычно это импеданс в месте неисправности, ближайшем к реле.

Значение коэффициента чувствительности:

- более высокий коэффициент чувствительности позволяет реле защищать большую зону, поскольку оно может обнаруживать неисправности с более высоким импедансом.

- более высокий коэффициент чувствительности повышает надежность обнаружения неисправностей, снижая вероятность ложных срабатываний.

- коэффициент чувствительности играет решающую роль в координации реле, гарантируя, что реле срабатывает правильно и эффективно, не влияя на другие реле в системе.

Дистанционное реле, защищающее линию передачи длиной 10 км, с характеристиками, указанными в третьей главе (тестовая сеть в MATLAB):

Сопротивление линии: 0,1 Ом/км.

Настройка реле: $Z_{\max} = 1$ Ом (в конце защищаемой зоны)

Место повреждения: 3,3, 6,6 км... от реле.

Z_{\min} : 0,1 Ом/км * 3,3 км = 0,33 Ом (в месте повреждения)

Коэффициент чувствительности (K): 1 Ом / 0,33 Ом = 3

Погрешность необходимо учитывать при расчете импеданса для дистанционной защиты для четырех традиционных методов, а также улучшенного метода, который имеет наименьшую погрешность среди них, как показано на рисунке 43.

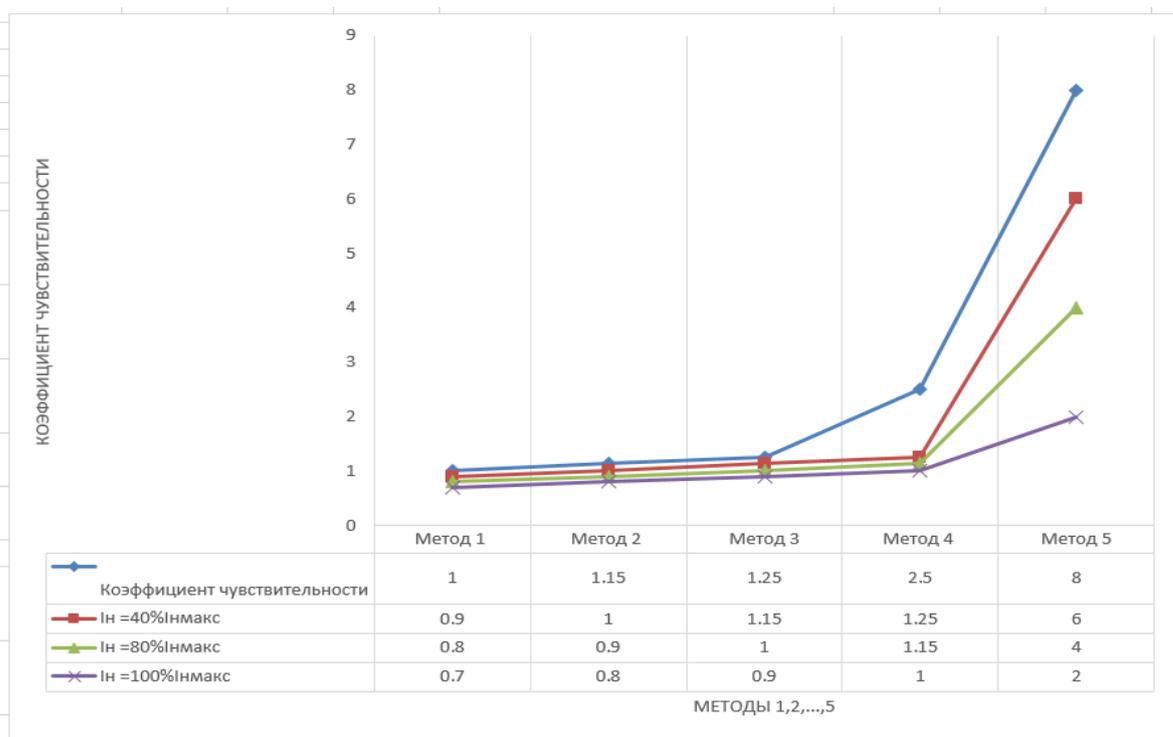


Рисунок 43 - Сравнение коэффициента чувствительности дистанционного реле, разработанного с использованием нейронной сети, с четырьмя традиционными методами защиты (составлено автором)

В предлагаемом методе защиты на основе искусственных нейронных сетей отмечено, что улучшилась чувствительность. Искусственные нейронные сети позволяют обнаруживать неисправности в более широком диапазоне мест и при разных условиях неисправности, появилась возможность адаптивного обучения по входным данным в виде таблиц Excel и адаптации к изменениям в системе электропитания электротехнических комплексов, что может повысить надежность системы и уменьшить количество ненужных отключений.

Недостатки защиты на основе искусственных нейронных сетей:

- сложность: обучение и внедрение искусственных нейронных сетей могут быть сложными и требовать специальных знаний.

- зависимость от данных: производительность искусственных нейронных сетей зависит от качества и количества обучающих данных.

- интерпретируемость. Процесс принятия решений в искусственных нейронных сетях может быть трудным для объяснения, что может затруднить устранение неполадок.

Анализ чувствительности демонстрирует потенциальные преимущества использования искусственных нейронных сетей для удаленной защиты. Искусственные нейронные сети обеспечивают улучшенную чувствительность и адаптивность по сравнению с традиционными методами. Однако во время реализации необходимо тщательно учитывать сложности и требования к данным искусственных нейронных сетей.

4.4 Аппаратная реализация дистанционной защиты в распределенной генерации

4.4.1 Стратегии аппаратной реализации защиты в системе с распределенной генерации

Регулировка настроек зоны: Реле настраиваются так, чтобы выдерживать повышенные токи повреждения и двунаправленный поток мощности. Это может включать в себя изменение размера ретрансляционных зон для включения вклада распределенного генераторного блока (рисунок 44).



Рисунок 44 - Дистанционная защита ABB Relion® 670 [72] и реле дистанционной защиты серия Cypotec 7SA [73]

ABB Relion® 670 и Siemens SIPROTEC 7SA предлагают передовые решения аппаратной дистанционной защиты для распределенной генерации. Они оба высоконадежны, многофункциональны и предлагают отличные возможности интеграции с другими системами управления питанием. Выбор между ними зависит от конкретных требований проекта, бюджета и предпочтений по интеграции. Для проектов, приоритетными для которых являются бесшовная интеграция с системой управления питанием ABB и расширенные возможности определения местоположения неисправностей, Relion® 670 может быть предпочтительным выбором. Для проектов, требующих более широкого спектра опций, расширенных функций кибербезопасности и расширенных возможностей анализа, SIPROTEC 7SA может подойти лучше [72].

Предлагаемая архитектура использует комбинацию нейронных сетей и реле дистанционной защиты в системе распределенной генерации (РГ). Его цель – обеспечить быструю, точную и надежную дистанционную защиту за счет использования преимуществ обеих технологий.

Интеллектуальные защитные реле (SPR): эти реле, оснащенные встроенными нейронными сетями, контролируют параметры местной линии (ток, напряжение и т.д.) и выполняют элементарные расчеты расстояния. Высокоскоростная сеть связи с малой задержкой (например, оптоволокно, выделенные микроволновые каналы связи) соединяет интеллектуальные реле защиты, обеспечивая обмен данными в реальном времени. Центральный процессор (ЦП): этот блок собирает данные со всех интеллектуальных реле

защиты, выполняет расширенный анализ с использованием нейронных сетей и определяет место повреждения с более высокой точностью. Блок принятия решений в зависимости от места и серьезности неисправности ЦП выдает команды на отключение соответствующим автоматическим выключателям [73].

Каждое интеллектуальное реле защиты использует предварительно обученную нейронную сеть для идентификации и классификации неисправностей на основе локальных измерений. Затем рассчитывает расстояние до места повреждения, используя быстрый алгоритм, и инициирует сигнал отключения на местный автоматический выключатель, если повреждение происходит в его зоне. Может быть организован центральный процессор (ЦП), который собирает данные со всех интеллектуальных реле защиты и использует более сложную нейронную сеть для определения местоположения и серьезности неисправности. Эта сеть анализирует данные с учетом топологии и характеристик всей системы. Нейронные сети постоянно обучаются и обновляются эксплуатационными данными в режиме реального времени, что делает систему защиты адаптивной к изменяющимся условиям в системе распределенной генерации. Сеть связи отдает приоритет данным, связанным с неисправностями, при этом сводя к минимуму передачу ненужной информации, обеспечивая реагирование в реальном времени и поддерживая высокоскоростные протоколы связи с малой задержкой (например, IEC 61850) [73], чтобы уменьшить задержки при обнаружении ошибок и отключений и повысить надежность, обеспечить непрерывную и безошибочную связь.

Преимущества данной структуры:

- повышенная скорость и точность: более быстрое обнаружение и точное обнаружение неисправностей благодаря комбинированному использованию нейронных сетей и традиционных реле защиты. Адаптивность: нейронные сети адаптируются к изменяющимся условиям в распределенной генераторной системе, со временем улучшая эффективность защиты.

- гибкость: распределенная архитектура обеспечивает легкое масштабирование по мере роста системы распределенной генерации.

4.4.2 Беспроводные реле дистанционной защиты

Автономные беспроводные реле: интегрируйте возможности беспроводной связи непосредственно в существующие реле удаленной защиты. Эти реле могут связываться с центральной системой управления или другими реле по беспроводным каналам. Гибридный подход: использование беспроводной связи для передачи данных между реле и центральной системой управления при сохранении традиционной проводной связи и защиты. В таблице 10 показаны устройства беспроводной связи.

Таблица 10 - Устройства беспроводной связи [74]

Устройства	Протокола	Преимущества	Недостатки
Zigbee Relay	IEEE 802.15.4	Низкая стоимость, низкое энергопотребление	Ограниченный радиус действия, возможные помехи
Wi-Fi Relay	IEEE 802.11	Широкая доступность, высокая скорость передачи данных	Высокое энергопотребление, проблемы безопасности
Сотовый ретранслятор	Сотовые сети	Большой радиус действия, высокая скорость передачи данных	Дорогостоящий, подверженный перебоям в работе сети
Спутниковый ретранслятор	Спутниковая связь	Широкий охват, надежная связь	Высокая стоимость, задержка

Удаленные панели разрабатываются на основе методов нейронных сетей и технологий беспроводной связи, когда имеется, например, удаленная ветряная электростанция в горной местности. Спутниковое дистанционное реле обнаруживает неисправность и рассчитывает расстояние до места повреждения (рисунок 45). Реле передает данные о неисправности в центральный центр управления через спутниковую линию связи. Центр управления анализирует данные о неисправности и определяет, что ветроэлектростанцию необходимо отключить, чтобы предотвратить дальнейшие повреждения. Центр управления отправляет команду отключения на реле по спутниковой линии связи. Реле получает команду отключения и размыкает автоматический выключатель, изолируя ветроэлектростанцию от отключенной секции [74].

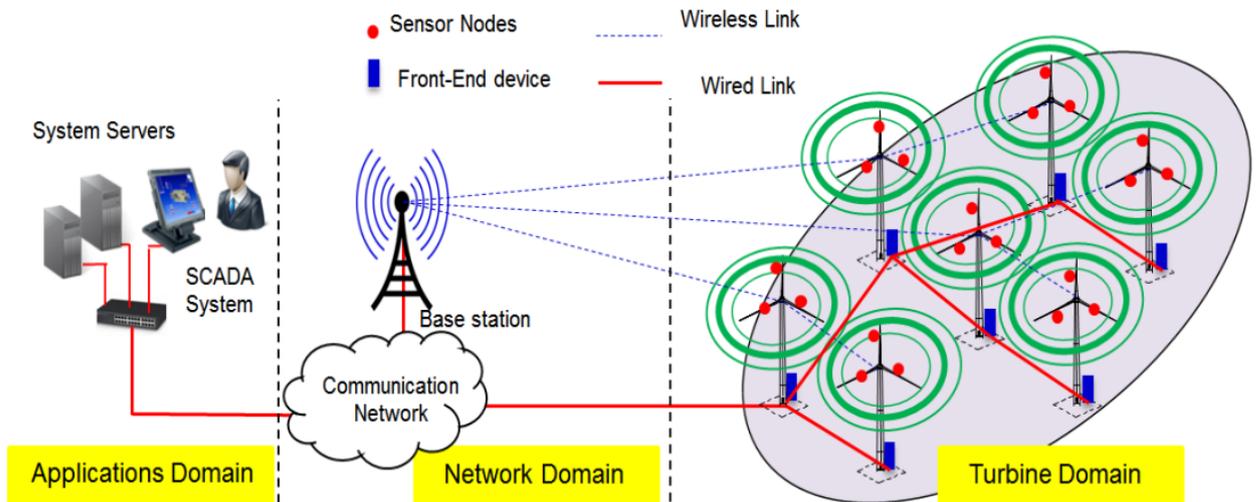


Рисунок 45 - SCADA интеллектуальных ветровых электростанций (Smart-WPF): диспетчерское управление [75]

Преимущества спутниковых дистанционных ретрансляторов:

1. Широкий охват: обеспечивает защиту удаленных распределенных генераторных установок, где наземная связь ограничена или недоступна.
2. Высокая надежность: спутниковая связь обеспечивает высокую надежность и устойчивость к стихийным бедствиям и другим помехам.
3. Расширенная координация: обеспечивает централизованное управление и координацию планов защиты для нескольких удаленных блоков распределенной генерации электроэнергии.
4. Мониторинг в реальном времени: позволяет отслеживать производительность системы распределенной генерации электроэнергии и события сбоев в режиме реального времени.

Стандарт подключения систем защиты реализуется посредством проектирования и монтажа систем защиты, соответствующих его требованиям. Это включает в себя выбор подходящих реле защиты, их правильную настройку, а также выполнение комплексных испытаний и ввода в эксплуатацию. Это также требует тесного сотрудничества между инженерами, производителями и операторами для обеспечения плавной интеграции системы защиты ветрогенератора и всей энергосистемы. IEC 61400-25 служит жизненно важным эталоном для обеспечения безопасности, надежности и производительности ветряных генераторов. Соблюдение этого стандарта имеет решающее значение

для безопасной и успешной эксплуатации ветряных электростанций, способствуя росту сектора возобновляемой энергетики.

Новая схема защиты на основе современных устройств беспроводной связи, называемая модифицированным дистанционным элементом, используется для защиты линий, подключенных к распределенным генераторам. Разработанная схема основана на импедансном пути, характеристиках затухания формы тока повреждения, а характеристики модифицированного дистанционного элемента были исследованы на предыдущей испытательной системе с тремя генераторами.

4.5 Экономическое обоснование разработки систем электрозащиты, дистанционной защиты в системах распределенной генерации

В этом разделе анализируется экономическая целесообразность разработки и внедрения усовершенствованных систем дистанционной защиты для сетей распределенной генерации (РГ) с упором на повышение чувствительности и надежности с использованием алгоритмов нейронных сетей. Рассмотрены основные **компоненты затрат и выгод**, приведем практические примеры и проиллюстрируем экономические выгоды с помощью Таблицы 11.

Практический пример анализа затрат.

Анализ затрат включает как первоначальные инвестиции, так и текущие эксплуатационные расходы:

1. Расширенные дистанционные реле, интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ), оснащенные передовыми алгоритмами на основе нейронных сетей для определения местоположения неисправностей и возможностей связи (например, протокол поддержки IEC 61850). Р

Цена 1350000*3 Р (Три расширенных средства защиты с поддержкой Интернета для сети, изученной в Главе 3) зависит от характеристик, подключения и продавца.

2. Инфраструктура связи и волоконно-оптические кабели.

900000*3 Р (Три линии электропередачи и их усовершенствованные дополнения к сети, изученной в Главе 3) Для систем беспроводной связи или

линий электропередачи для обеспечения надежной связи между реле и центральной системой управления, но зависит от расстояния между подстанциями и выбранной технологии связи.

450000 Р Программное обеспечение и лицензии (Лицензия на активацию программы мониторинга и координации EPLAN). Программное обеспечение для настройки реле, анализа данных, лицензии на специальные функции и поддержку, включая лицензии на интеграцию SCADA.

3. Инженерное проектирование и консалтинг стоимостью 720000 Р (включают инженерную экспертизу в проектировании систем защиты, конфигураций реле, координационных исследований и интеграции с существующей сирийской сетевой инфраструктурой в южном секторе). Это требует специальных знаний в области интеграции и защиты распределенных генераторов.

4. Тестирование и ввод в эксплуатацию – 450000 Р (включает в себя расходы на рабочую силу и оборудование), необходимые для тестирования новой системы безопасности, проверки правильности настроек, обеспечения надлежащей координации с существующей системой безопасности и обучения сотрудников эксплуатации, обслуживанию и устранению неполадок новой удаленной системы безопасности.

5. Для обеспечения надлежащей работы и обслуживания системы необходимо 180000 Р.

Общие первоначальные инвестиции = сумма всех расходов, указанных выше, **8550000 Р**.

279000 Р – это приблизительный диапазон. Фактическая стоимость зависит от конкретной системы и местоположения. Сюда входят незапланированные расходы на аварийное техническое обслуживание.

Общая стоимость инвестиций = 8829000 Р.

- Анализ преимуществ применения улучшенного алгоритма.

Преимущества повышения чувствительности и надежности дистанционной защиты в основном связаны с сокращением времени простоя, уменьшением

повреждения оборудования и повышением стабильности сети. Эти преимущества трансформируются в ощутимые экономические преимущества.

1. Сокращение перерывов (сокращение SAIDI/SAIFI):

Повышение чувствительности и надежности дистанционной защиты в 9 раз сокращает время устранения неисправностей. Это сокращает продолжительность отключений электроэнергии и улучшает показатели индекса средней продолжительности перерывов в электроснабжении (SAIDI) и индекса средней частоты перерывов в электроснабжении (SAIFI).

По данным **Сирийского национального центра энергетических исследований**, в энергоснабжающих подразделениях южного сектора ежегодно происходит в среднем 365 ошибочных отключений (время повторного подключения составляет от 2 до 30 секунд, в некоторых случаях — минут).

Экономический эффект от снижения показателя SAIDI зависит от величины потеряннной нагрузки (VoLL), которая варьируется в зависимости от вида потребителя и его местонахождения (промышленный - бытовой). Предположим, что стоимость потери от отключения электроэнергии составляет 23,4 Р/ кВт·ч (Оценка экономических потерь на киловатт-час отключения электроэнергии). Предположим, что фидер обслуживает 100 промышленных потребителей со средней нагрузкой 100 кВт каждый и 1000 бытовых потребителей со средней нагрузкой 3 кВт каждый.

Годовая выгода: $(7,6 \text{ часов} * 100 \text{ клиентов} * 100 \text{ кВт/клиент} * 23,4 \text{ Р/кВт}\cdot\text{ч}) + (7,6 \text{ часов} * 10000 \text{ клиентов} * 3 \text{ кВт/клиент} * 23,4 \text{ Р/кВт}\cdot\text{ч}) = 7113600 \text{ Р}$,

где 7,6 час/год - период отключения электроэнергии в году из-за неправильного разделения защитных зон в южном секторе.

Уменьшение повреждения оборудования:

Более быстрый ремонт и меньшее количество незапланированных простоев снижают нагрузку на электрооборудование (трансформаторы, кабели, распределительное оборудование) и производственные линии (остановки, которые могут привести к повреждению производства), тем самым предотвращая или смягчая ущерб.

Практический пример

Неисправность трансформатора в промышленной зоне Адра, вызванная частыми отключениями и медленным ремонтом, приводит к ущербу величиной около 9000000 Р. Вероятность такого отказа снижается с 9% до 1% при повышении надежности защиты.

Годовой процент (предотвращенный ущерб): $(9000000 \cdot 0,09) - (9000000 \cdot 0,01) = 720000$ Р.

- Улучшается стабильность сети:

Благодаря быстрой изоляции неисправностей улучшенная дистанционная защита предотвращает каскадные неисправности и поддерживает стабильность сети, снижая риск крупных отключений.

Предотвращение масштабного отключения электроэнергии может помочь избежать огромных экономических потерь. 04.02.2025 г. в южном секторе произошло общее отключение электроэнергии. Восстановление электроснабжения всего сектора заняло 12 часов. Серьезная нестабильность сети с вероятностью 1% нанесла ущерб в размере 27000000 Р. Новая защита снижает эту вероятность до 0,1%. Годовой процент (стабильность сети): $(27000000 \cdot 0,01) - (27000000 \cdot 0,001) = 243000$ Р.

Уменьшение нормативных штрафов:

Коммунальные предприятия часто штрафуются за плохие показатели SAIDI/SAIFI. Улучшенная защита может помочь достичь нормативных показателей и избежать этих штрафов.

Пример: Предположим, нормативные штрафы составляют 450000 Р долларов в год, если SAIDI превышает пороговое значение. Улучшенная защита обеспечивает соответствие и позволяет избежать штрафа.

Годовая выгода (отсутствие штрафов): **450000** Р, Сводка экономических выгод (годовых) в таблице 11.

Используем чистую приведенную стоимость (NPV) и внутреннюю норму доходности (IRR) для оценки финансовой жизнеспособности проекта.

Таблиц 11 - Сводка экономических выгод (годовых) (составлено автором)

Критерий оценки	Расчетная годовая выгода, руб.
Сокращение продолжительности простоев (SAIDI)	7113600
Минимизация ущерба оборудованию	720000
Улучшенная стабильность сети	243000
Избежание нормативных штрафов	450000
Общая годовая выгода	8526600

Ставка дисконтирования: предположим, что ставка дисконтирования составляет 8%. Срок службы проекта: предположим, что срок службы проекта составляет 15 лет.

- Чистая приведенная стоимость (NPV):

NPV рассчитывается как текущая стоимость всех будущих денежных потоков (выгоды за вычетом затрат) (уравнение 54).

$$NPV = \sum \left[\frac{n}{(1+m)^G} - h \right] \quad (54)$$

где n – чистая выгода;

m – ставка дисконтирования;

G – год;

h – начальные инвестиции.

Начальные инвестиции: 8829000 Р (в зависимости от сценария)

Годовая чистая выгода: 8526600 - 81000 – 279000 = **8166600 Р**

Используя эти цифры, NPV колеблется от приблизительно 112699080 Р в зависимости от начальных инвестиций и эксплуатационных расходов. Положительная NPV указывает на финансовую жизнеспособность проекта

4.6 Выводы к Главе 4

1. Разработана структура устройства дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией, в котором за счет установки дополнительного комплекта элементов в противоположном конце защищаемой линии, для определения сопротивления, а также блока нейронных сетей повышается надёжность и чувствительность дистанционной защиты к коротким замыканиям.

2. Выполнена оценка показателей надежности защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. Показано, что показатель SAIDI (среднее время отключения одного потребителя в системе) улучшается в 9 раз.

3. Выполнена оценка чувствительности действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. Показано, что применение нейронных сетей в составе дистанционной защиты способствует повышению коэффициента чувствительности до 5 раз.

4. Точное определение требований к надежным, высокопроизводительным линиям связи, включая скорость, надежность, пропускную способность, безопасность и физические носители, имеет решающее значение для обеспечения быстрой, эффективной и надежной работы системы защиты. После всестороннего анализа электротехнического комплекса, тщательного выбора технологии связи и определения ее протоколов были сформулированы основные шаги по созданию надежной и безопасной системы защиты. Поскольку электротехнические комплексы становятся все более сложными и взаимосвязанными, надежная инфраструктура связи для защиты будет приобретать все большее значение. Для базового управления реле подойдут такие технологии, как ZigBee (IEEE 802.15.4), так и Wi-Fi. «Лучший» выбор зависит от потребностей системы безопасности с точки зрения размера сети, надежности, безопасности, бюджета и простоты использования. Но там, где первостепенное значение имеют надежность и низкое энергопотребление, ZigBee может оказаться лучшим вариантом, несмотря на его более высокую первоначальную стоимость и более сложную настройку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации обосновано применение комплекса технических мероприятий, позволяющих повысить селективность и чувствительность действия защиты на основе нейронных сетей в условиях вариации параметров электротехнических комплексов с распределенной генерацией. По результатам выполнения диссертации сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Проведен анализ состояния и тенденций развития релейной защиты электротехнических комплексов в сетях распределенной генерации и определено влияние изменения параметров защищаемых присоединений в условиях различий параметров электротехнических комплексов в сети распределенной генерации на эффективность дистанционной защиты. Установлено, что для обеспечения необходимой селективности и чувствительности необходимо, чтобы система релейной защиты обеспечивала возможность коррекции уставки при изменении режимов работы нагрузки и источников питания.

2. Установлено влияние изменения параметров электротехнических комплексов с системой распределенной генерации на эффективность действия дистанционной защиты. Получены зависимости, характеризующие влияние переходного сопротивления в точке КЗ, режимов работы нагрузки, уровня генерации источников распределенной генерации на погрешность при определении точки КЗ.

3. Разработан метод функционирования дистанционной защиты, основанный на применении искусственных нейронных сетей, позволяющий учесть изменение режимов работы электротехнических комплексов и объектов распределенной генерации.

4. Разработан алгоритм действия дистанционной защиты электротехнических комплексов с использованием нейронных сетей в системе с распределенной генерацией для обеспечения чувствительности и селективности. Результаты исследования показали точность до 99% определения места возникновения повреждений различного вида.

5. Показано, что действие дистанционной защиты по разработанному алгоритму способствует увеличению коэффициента чувствительности до 6,8 при средней нагрузке и до 4,2 при максимальной нагрузке.

6. Разработана структура устройства дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией. Показано, что устройство дистанционной защиты линий электропередачи в сети с распределенной генерацией оснащено дополнительными комплектами элементов, расположенными у объектов распределенной генерации и нагрузки для определения параметров режимов их работы, а также блока нейронных сетей, позволяющих повысить надежность и чувствительность дистанционной защиты от коротких замыканий.

7. Выполнена оценка показателей надежности защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. На основании годового статистического отчета Национального центра энергетических исследований (Сирия) определена продолжительность отключений, вызванных ложным отключением защит в южном секторе распределительной сети республики Сирия. Показано, что предлагаемое решение обеспечит снижение количества ложных срабатываний защиты в 9 раз. Предложена аппаратная реализация дистанционной защиты электротехнических комплексов с распределительной генерацией.

8. Экономическая оценка показывает, что инвестиции в современные системы дистанционной защиты для сетей распределенной генерации экономически оправданы. Преимущества от сокращения простоев, уменьшения повреждений оборудования, повышения стабильности сети и избежание штрафных санкций со стороны регулирующих органов превышают первоначальные инвестиции и текущие эксплуатационные расходы.

Дальнейшее исследование по данной теме будут направлены на изучение влияния синхронизации между измерительными устройствами на селективность и чувствительность защит. Даже небольшая потеря синхронизации окажет существенное влияние на результаты. Это станет предметом более глубокого

исследования в будущем, в частности, эффект синхронизации измерительных приборов и различных системах защиты в сетях с объектами распределенной генерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Исследование эффективности функционирования инвариантной защиты от неполных однофазных замыканий на землю в составе микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики / Б.Н. Абрамович, Д.Н. Пеленев, К.В. Бабырь, А.И. Зимовец // Промышленная энергетика. – 2021. – №1. – С. 13-19. DOI: 10.34831/EP.2020.53.39.002.

2. Абрамович, Б.Н. Обеспечение электробезопасности на горнодобывающих предприятиях при возникновении однофазных замыканий на землю / Б.Н. Абрамович, Д.Н. Пеленев, К.В. Бабырь // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № S7. – С. 9-19. DOI 10.25018/0236-1493-2019-4-7-9-19.

3. Аль-Хомиди, М.С.С. Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / М.С.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрягина, Е.С. Шагурина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – Т. 3. – С. 50-55. DOI 10.17588/20722672.2016.3.050-055.

4. Андреев, В.А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения: учебник для вузов / В.А. Андреев, Е.В. Бондаренко // Москва: Высшая школа. – 1975. – С. 375.

5. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие // Москва: Высшая школа. – 1991. – С. 496.

6. Бабырь, К.В. Разработка алгоритмов действия защиты от кратковременных однофазных замыканий на землю для электрических сетей среднего класса напряжения / К.В. Бабырь // Сборник тезисов XIX всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования». – 2021. – Т. 5. – С. 176-177.

7. Бабырь, К.В. Разработка мероприятий по обеспечению селективного действия защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей предприятий по добыче твердых полезных ископаемых / К.В. Бабырь //

Материалы Международной научно-практической конференции. В 7-ми томах, Москва, 04–06 апреля 2018 года. Том 3. – 2018. – Т. 3. – С. 60-62.

8. Бельков, А.В. Особенности правового регулирования труда работников, занятых на подземных работах через анализ производственного травматизма в горнодобывающей промышленности / А.В. Бельков, Н.В. Съедина // Проблемы экономики и управления: социокультурные, Правовые и организационные аспекты : Сборник статей магистрантов и преподавателей КузГТУ / Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. – 2023. – Т. 5. – С. 281-290.

9. Блок микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-152 / ООО «НТЦ «Механотроника» // Руководство по эксплуатации. – 2020. – С. 18-19. 11. Блок релейной защиты и автоматики серии IED-EP+ / ООО «ПАРМА» // Руководство по эксплуатации Часть 2. – 2018. – С. 12.

10. Борухман, В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятия по их совершенствованию / В.А. Борухман // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20–22.

11. Бухтояров, В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров / В.Ф. Бухтояров, А.М. Мавритцын // Москва: Недра. – 1986. – С. 184.

12. Бычин, М.А. Новый способ защиты трёхфазных сетей от однофазных замыканий на землю / М.А. Бычин, М.Л. Сапунков, А.А. Худяков // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 8. – С. 29-30. 129

13. Веселов, А.Е. Разработка технических мероприятий по компенсации ёмкостных токов замыкания на землю и ограничению перенапряжений в промышленных распределительных электрических сетях / А.Е. Веселов, Ю.М. Невретдинов, В.В. Ярошевич [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 527-532.

14. Гаврилюк, П.С. Оценка влияния механической деформации на электрическую прочность изоляции кабельных изделий / П.С. Гаврилюк // Томск. – 2017. – С. 41-46.

15. Гарке, В.Г. Параметры электрической дуги при КЗ и их влияние на работу релейной защиты / В.Г. Гарке, З.З. Хазбулатов // Доклад на IX симпозиуме «Электротехника 2030», энергетический университет. – 2007. – С. 1-3.

16. Горюнов, В.А. Релейная защита от замыканий на землю в сетях с резистивным заземлением нейтрали / В.А. Горюнов // Энергетик. – 2011. – Т. 10. – С. 20-22.

17. Гришин, М.В. Эффективный контроль изоляции шахтных кабелей / М.В. Гришин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – Т. 2. – С. 58-62.

18. Грунтович, Н.В. Способы восстановления изоляции высоковольтных кабелей / Н.В. Грунтович, М.Д. Астапенко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. ПО Сухого. – 2021. – №. 4 (87). – С. 58-66.

19. Дударев, Л.Е. Проблемы защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электричество. – 1979. – № 2. – С. 8-12.

20. Евминов, Л.И. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6-35 кВ / Л.И. Евминов, Т.В. Алферова // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – № 4 (25). – С. 94-108. 130

21. Ковригин, Л.А. Моделирование частичных разрядов в изоляции кабелей среднего напряжения / Л.А. Ковригин // Электротехника. – 2013. – Т. 11. – С. 49-51. 24. Костров, М.Ф. Основы техники релейной защиты: учебное пособие / М.Ф. Костров, И.И. Соловьев, А.М. Федосеев // Москва: Ленинград: Госэнергоиздат. – 1944. – С. 436.

22. Лоскутов, А.А. Анализ применения резистивного заземления нейтрали в распределительных электрических сетях на основе имитационного моделирования / А.А. Лоскутов, О.В. Кузина // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 2. – С. 61-73. DOI: 10.46960/2658_6754_2019_2_61.

23. Матвеев, Д.А. О технических требованиях к дугогасящим реакторам в распределительных сетях 6-35 кВ / Д.А. Матвеев, А.М. Быкова, А. В. Жуйков [и др.] // Электротехника. – 2016. – № 8. – С. 3-8.

24. Матвеев, В.Н. Электротехнические комплексы и системы / В.Н. Матвеев, К.А. Варнавский // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – Т. 3. – № 91. – С. 152-155.

25. Микропроцессорный блок защиты присоединений секций сборных шин 6-35 кВ БЗП-02 / ООО НПП «Микропроцессорные технологии» // Руководство по эксплуатации. – 2021. – С. 19-20. 30. Микроконтроллерный блок защиты присоединений МКЗП МИКРО 2.0/2.0М/2.0Д / ООО НПП «ЭСТРА» // Руководство по эксплуатации. – 2020. – С. 37-40.

26. Микропроцессорные блоки релейной защиты и автоматики серии БЭМП РУ-01, БЭМП РУ-02 и БЭМП РУ-03 / АО «ЧЭАЗ» // Руководство по эксплуатации. – 2021. – С. 32-33. 131 32. Микропроцессорные терминалы релейной защиты и автоматики РИТМ / ОАО «ВНИИР» // Руководство по эксплуатации. – 2016. – С.10.

27. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-2Л-02» / АО «РАДИУС Автоматика» // Руководство по эксплуатации. – 2020. – С. 33-48.

28. Микропроцессорное устройство защиты Сириус-ОЗЗ. – Режим доступа: <https://www.rza.ru/catalog/zashchita-i-avtomatika-prisoedineniy-vvodov-i-bsk-dla-setey-6-35-kv/sirius-ozz.php> (дата [Электронный ресурс]. обращения: 13.03.2021).

29. Микропроцессорное устройство релейной защиты и автоматики РС83-АВ2 / ООО «РЗА СИСТЕМЗ» // Руководство по эксплуатации. – 2016. – С. 50-56.

30. Многофункциональный терминал релейной защиты и автоматики 6-35 кВ ARIS-2305/2308 / ООО «Прософт-Системы» // Брошюра ARIS-23хх. – 2020. – С. 2.

31. Многофункциональное устройство защиты и местного управления SIPROTEC 4 / Siemens // Руководство по эксплуатации. – 2008. – С. 12.

32. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, П.Л. Калантаров // Москва-Л., «Госэнергоиздат». –1959. С. 34.

33. Орлов, П.С. Инженерно-технические мероприятия по повышению надёжности электроснабжения объектов строительства / П.С. Орлов // Записки Горного института. – 2016. – Т. 222. – С 845-851. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.845.

34. Патент № 2821418 Российская Федерация, МПК H02H 3/40 (2006.01). Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией. Заявка № 2023131514: заявл. 01.12.2023 : опубл. 24.06.2024 / Д.А. Устинов, **А.Р. Аисар**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 13 с.: ил.

35. Патент № 203930, Российская Федерация, H02H 3/00 G01R 31/08. Устройство дистанционной защиты. Заявка: № 2020137512 : заявл. 11.16.2020 опубл. 28.04.2021 / Булычев. А.В, Бычков. Ю.В, Грибков М.А., Козлов. В.Н. ; заявитель/патентообладатель Публичное акционерное общество "Россети Московский регион" ПАО «Россети Московский регион» – 11 с.

36. Патент № 2573595, Российская Федерация, H02H 3/40(2006.01) G01R 31/08. Устройство для дистанционной защиты линии электропередачи с ответвлением. Заявка № 2014135839/07: заявл. 02.09.2014 : опубл. 20.01.2016 / заявитель/патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) –Бюл. 2 с.

37. Патент № 2480882 Российская Федерация, МПК H02H3/26. Устройство импульсной защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6-35 кВ. Заявка № 2011146258/07: заявл. 16.11.2011: опубл. 27.04.2013 / В.Ф. Лачугин, С.А. Серединский, С.В. Иванов, А.В. Буров, В.В. Жуков; заявитель и патентообладатель ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», ОАО энергетики и электрификации «Тюменьэнерго», ООО «Исследовательский центр «Бреслер». – 9 с. 132.

38. Патент № 675513, СССР, МПК H02H3/16, H02H3/38. Устройство для направленной защиты от однофазного замыкания на землю в сети с изолированной или компенсированной нейтралью. Заявка № 2360626 заявл. 17.05.1976: опубл. 25.07.1979 / Л.Е. Дударев; заявитель/патентообладатель

Донецкий ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт., Бюл. 27. – 3 с.

39. Патент №103039 Российская Федерация, МПК H02H3/16. Устройство защиты трёхфазной сети от однофазных замыканий на землю. Заявка № 2010139666/07: заявл. 27.09.2010: опубл. 20.03.2011 / М.Л. Сапунков, Л.М. Сапунков, А.А. Худяков; заявитель/патентообладатель ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет». – 7 с.

40. Пеленев, Д.Н. Анализ точности методик расчет тока однофазного замыкания на землю электрических сетей горнодобывающего предприятия / Д.Н. Пеленев, К.В. Бабырь, В.В. Колычев // Материалы IX Международной научной конференции «Молодые – Научкам о Земле». – М.: МГРИ-РГГРУ. – 2020. – С. 48-51.

41. Пеленев, Д.Н. Инвариантная защита электротехнических комплексов от однофазных замыканий на землю с автоматической коррекцией 133 входных параметров. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Пеленев Денис Николаевич. – Санкт-Петербург. – 2017. – С. 22.

42. Полуянович, Н.К. Разработка метода диагностики и прогнозирования остаточного ресурса кабельных линий в результате старения изоляции, вызванного частичными разрядами / Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 70-79.

43. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 N 505 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых».

44. Рудаков, М.Л. О возможности использования критерия максимального правдоподобия в целях оценки профессионального риска, обусловленного обрушениями горных пород при подземной добыче угля / М.Л. Рудаков, К.А. Кольвах // Безопасность жизнедеятельности. – 2019. – № 8(224). – С. 10-13.

45. Рыжкова, Е.Н. Методика определения показателей эффективности сетей 6 - 35 кВ в зависимости от состояния нейтрали / Е.Н. Рыжкова, Е.П. Младзиевский, С.А. Цырук // Промышленная энергетика. – 2021. – № 1. – С. 2-12. DOI 10.34831/EP.2020.71.81.001.

46. Сапунков, М.Л. Устройство адаптивной токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, Д.Н. Пеленев, Р.И. Мухаметшин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – Т. 12, № 6. – С. 128-133.

47. Сапунков, М.Л. Новый принцип токовой защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей 6-35 кВ / М.Л. Сапунков // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. – 2015. – Т. 1. – С. 232-236.

48. Сапунков, М.Л. Особенности выбора характеристик микропроцессорной защиты от замыканий на землю / М.Л. Сапунков, М.А. Бычин // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 2. – С. 31-33.

49. Терминал защиты и автоматики линии (кабельной/воздушной, линии к ТСН) 6-35 кВ БРЕСЛЕР-0107.200 / ООО «НПП «Бреслер» // Руководство по эксплуатации. – 2016. – С. 32-36.

50. Терминал защиты, автоматики, управления и сигнализации линии БЭ2502А01ХХ / ООО НПП «ЭКРА» // Руководство по эксплуатации. – 2021. – С. 28-29.

51. Устройство защиты и автоматики линии 6-35 кВ «ТОР 200» / ООО «Релематика» // Руководство по эксплуатации. Описание устройства и работы терминала. – 2017. – С. 19-23.

52. Устинов, Д.А. Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор / Д.А. Устинов, **А.Р. Айсар** // Безопасность труда в промышленности. - 2023. - № 2. - С. 15–20. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20. – DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2- 15-20.

53. Устинов, Д.А. Исследование алгоритмов работы дистанционной защиты в системах распределенной генерации / Д.А. Устинов, **А.Р. Аисар** // Доклады

Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2023. – № 2(59). – С. 41-55. – DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55.

54. Устинов, Д.А. Разработка нового рабочего алгоритма для повышения эффективности удаленной защиты в сетях распределенной генерации / Д.А. Устинов, **А.Р. Айсар** // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 5. – С. 20-27. – DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-20-27.

55. Устинов, Д.А. Оценка ветропотенциала для электроснабжения горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана (Сирия) / Д.А. Устинов, **А.Р. Айсар** // Интеллектуальная электротехника. – 2023. – № 2(22). – С. 121-134. – DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121.

56. Устройство релейной защиты и автоматики сетей напряжением 6-35 кВ «ЮНИТ-М1» ОЛ1 / ООО «Юнител Инжиниринг» // Руководство по эксплуатации. – 2020. – С. 4. 135

57. Устройство защиты и управления RELION серия 615 / ABB // Техническое руководство. – 2020. – С. 346-468

58. Устройство релейной защиты, измерения и управления / Schneider Electric // Каталог Easergy Sepam P3. – 2018. – С. 10.

59. Федосеев, А.М. Релейная защита электрических систем: учебник для вузов. / А.М. Федосеев // М.: «Энергия». – 1976. – С. 560.

60. Хабаров, А.М. Разработка и исследование характеристик защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Хабаров Андрей Михайлович. – Новосибирск. – 2006. – С. 20.

61. Худяков, А.А. Разработка и исследование принципа защиты от однофазных замыканий на землю, основанного на контроле пульсирующей мощности. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Худяков Антон Александрович. – Пермь. – 2012. – С. 20.

62. Худяков, А.А. Разработка обобщенной модели распределительной сети 6-10 кВ для исследования нового способа защиты от однофазных замыканий на

землю / А.А. Худяков, М.Л. Сапунков // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4. – № 1. – С. 133-138.

63. Цапенко, Е.Ф. Электробезопасность на горных предприятиях / Е.Ф. Цапенко, С.З. Шкундин // М:МГГУ. – 2017. – С. 102.

64. Цедяков, А.А. Разработка и исследование характеристик защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали. Автореф. дис. канд. техн. наук: 04.03.02 / Цедяков Андрей Александрович. – Москва. – 2023. – С. 24. 136

65. Цифровое устройство релейной защиты типа DRP-100 / ООО «НПП «Механотроника РА» // Руководство по эксплуатации. – 2019. – С. 29 30.

66. Черненко, А.Н. Динамическая модель печной дуги в Matlab (Simulink) / А.Н. Черненко, В.В. Вахнина, С.Г. Мартынова // Frontier Materials & Technologies. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 58-64

67. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад // СПб.: ПЭИПК. – 2003. – С. 350. 74. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад // СПб.: ПЭИПК. – 2003. – С. 348.

68. Шадрикова, Т.Ю. Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Шадрикова Татьяна Юрьевна. – Иваново. – 2016. – С. 20.

69. Шалин, А.И. Защита от замыканий на «землю» сетей средних классов напряжений (6–10 кВ) / А.И. Шалин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2009. – Т. 11. – С. 53-60.

70. Шуин, В.А. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ. / В.А. Шуин, Д.И. Ганджаев, О.А. Сарбеева, Е.С. Шагурина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – С. 32

71. Эрнст, А.Д. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / А.Д. Эрнст, П.Н. Матвиенко, Т.П. Матвиенко // Омский научный вестник. – 2013. – Т. 2. – С. 227. 137

72. Achitaev, A.A. Development of an algorithm for identifying single phase ground fault conditions in cable and overhead lines in the networks with isolated neutral / A.A. Achitaev, K.V. Suslov, I. O. Volkova [et al.] // Energy Reports. – 2023. – Vol. 9. – P. 1079-1086. DOI:10.1016/j.egyr.2023.01.046

73. Ustinov Anatolevich, D. Using Artificial Neural Network Methods to Increase the Sensitivity of Distance Protection / D. Anatolevich Ustinov, **Abou Rashid A.** // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2024. Vol. 37, Issue 11. – pp. 2192-2199. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.11B.06

74. Annual Statistical Report (Ministry of Electricity, General Directorate for Electric Power Transmission) URL: <https://tde.gov.sy/en/instructions> (2022-2024) – Text: electronic.

75. Belsky, A.A. Electrotechnical complex for autonomous power supply of oil leakage detection systems and stop valves drive control systems for pipelines in arctic region / A. A. Belsky, V. S. Dobush, D. I. Ivanchenko, D. Y. Gluhanich // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – № 1.

76. Bogdanov, I. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises / I. Bogdanov, B. Abramovich // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 249. – P. 408-416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

77. Cadick, J. Electrical Safety Handbook / J. Cadick, M. Capelli Schellpfeffer, D.K. Neitzel // Choice Reviews Online. – 1994. – Vol. 32. – № 04. – P. 32.

78. Dobryagina, O.A. Method of adaptive current protection against earth faults in 6–10 kV cable networks with an insulated neutral / O.A. Dobryagina, V.V. Tyutikov, T.Y. Shadrikova, V.A. Shuin // Vestnik IGEU. – 2019. – № 5. – P. 31-39. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.031-039.

79. Everton, M.D. Active System Grounding With a Novel Distribution Transformer Design / M.D. Everton // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. – 2020. – Vol. 7. – P. 183-190. DOI:10.1109/OAJPE.2020.2995878.

80. Fedotov, A.I. Rating of amplitudes of high harmonics in determining feeder with single-phase ground fault / A.I. Fedotov, L.V. Akhmetvaleeva, R.S. Basyrov [et al.] // Power engineering: research, equipment, technology. – 2020. – Vol. 22. – № 1. – P. 58-68. DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-1-58-68. 138

81. Furse, C. Down to the wire [aircraft wiring] / C. Furse, R. Haupt // IEEE Spectrum. – 2001. – Vol. 38. – № 2. – P. 34-39.

82. Gendler, S.G. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in coal longwalls / S.G. Gendler, V.V. Gabov, N.V. Babyr, E.A. Prokhorova // Mining informational and analytical bulletin. – 2022. – № 1. – P. 5-19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

83. Hariri, F. New Infeed Correction Methods for Distance Protection in Distribution Systems / F. Hariri, M. Crow, // Energies 2021, 14, 4652, p 4-17. <https://doi.org/10.3390/en14154652>

84. Hanninen, S. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks Characteristics, Indication and Location / S. Hanninen, A. Nadheer Shalash, M. A. Ahmed Haidar // Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus Technical Research Centre of Finland, Espoo, 2001.

85. Ivanov, S. Peat mining: a look through the centuries / S. Ivanov, D. Fadeev, R.-E. Kudryavtseva // ООО «Zhurnal «Voprosy Istorii». – 2022. – Vol. 2022. – № 7-2. – P. 45-63. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202207Statyi01.

86. Klyuev, R.V. Ensuring Electrical Safety of a Mountain Quarry by Choosing Selective Relay Protection in the Electrical Networks with the Voltage above 1 kV / R.V. Klyuev, V.I. Golik, I.I. Bosikov, O.A. Gavrina // Occupational Safety in Industry. – 2021. – № 9. – P. 31-37. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9 31-37.

87. Klyuev, R. Improving the efficiency of relay protection at a mining and processing plant / R. Klyuev, I. Bosikov, O. Gavrina // Journal of Mining Institute. – 2021. – Vol. 248. – P. 300-311. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14.

88. Kondrateva, N.P. Digital technologies for monitoring and implementation of smart diagnostics of the isolation of power supply systems with isolated neutral in the operating mode / N.P. Kondrateva, A.A. Shishov, R.G. Bolshin, M. G. Krasnolutsкая

// Тенденции развития науки и образования. – 2021. – Vol. 75. – № 2. – P. 109-112.
DOI: 10.18411/lj-07-2021-60. 139

89. Komarov, I.V. Partial discharges characteristics study in XLPE cable insulation with multiple defects / I.V. Komarov, D.A. Polyakov, K.I. Nikitin // Omsk Scientific Bulletin. – 2021. – № 180. – P. 33-40. DOI: 10.25206/1813-8225-2021 180-33-40.

90. Kutumov, Y.D. Dynamic stability of the functioning of current earth fault directional protection in networks with isolated neutral / Y.D. Kutumov, V.V. Tyutikov, T.Y. Shadrikova, V.A. Shuin // Vestnik IGEU. – 2019. – № 6. – P. 30-41. DOI 10.17588/2072-2672.2019.6.030-041.

91. Lyakhomskiy, A.V. Modeling phase-to-ground faults in 6kV grids in open pit mining / A.V. Lyakhomskiy, A.I. Gerasimov, E.N. Perfil'eva // Mining informational and analytical bulletin. – 2021. – № 2. – P. 164-178. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-164-178.

92. Nazarychev, A. Studying the Single-Phase Earth Fault Protection Based on Measuring the Negative-Sequence Current / A. Nazarychev, D. Ustinov, D. Pelenev, K. Babyr // Elektrichestvo. – 2024. – № 2. – P. 31-41. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-2-31-41.

93. Pelenev, D.N. Investigation of the Accuracy of Existing Methods for Calculating the Single-Phase Ground Fault Current in a Coalmining Enterprise / D.N. Pelenev, B.N. Abramovich, K.V. Babyr, A.I. Zimovets // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2021. 10.1109/ElConRus51938.2021.9396493. – P. 1509-1513.

94. Pelenev, D.N. Increase Effectiveness Functioning of Protection against Single-Phase Ground Fault Electrical Networks Medium Voltage / D.N. Pelenev, B.N. Abramovich, K.V. Babyr // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2020. – P. 1291-1296. DOI: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039469.

95. Rudakov, M.L. Modeling acoustic effect exerted on personnel by operating equipment in underground coal mining / M.L. Rudakov, N.E. Duka // 140 Mining

informational and analytical bulletin. – 2021. – № 10. – P. 165-179. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_165

96. Shabanov, V. Features of a faulty phase at single phase-to-ground faults / V. Shabanov, A. Sorokin // Electrical and data processing facilities and systems. – 2022. – Vol. 18. – № 3-4. – P. 89-100. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-89 100.

97. Shuin, V.A. Simulation study of 6–10 kV cable lines for transient processes calculation during earth faults / V.A. Shuin, Y.D. Kutumov, N.V. Kuzmina, T.Y. Shadrikova // Vestnik IGEU. – 2021. – № 5. – P. 30-40. DOI 10.17588/2072-2672.2020.2.030-040.

98. Shuin, V.A. The influence of higher harmonics on transients during arcing earth faults in 6–10 kV cable networks with insulated neutral / V.A. Shuin, O.A. Dobryagina, Y.D. Kutumov, T.Y. Shadrikova // Vestnik IGEU. – 2020. – № 2. – P. 30-40. DOI 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040.

99. Sidorov, A.I. Study of the Errors of the Indirect Method of Measuring the Network Phase Isolation Parameters Relative to the Ground on the Simulation Model / A.I. Sidorov, K.D. Boboev // Occupational Safety in Industry. – 2020. – № 9. – P. 24-29. DOI:10.24000/0409-2961-2020-9-24-29.

100. Stroykov, G.A. System of Comprehensive Assessment of Project Risks in the Energy Industry / G.A. Stroykov, N.V. Babyr, I.V. Ilin, R.S. Marchenko // International Journal of Engineering. – 2021. – Vol. 34. – № 7. DOI:10.5829/IJE.2021.34.07A.22.

101. Swaim, R.L. Electrical Arcing of Aged Aircraft Wire / R.L Swaim // IEEE spectrum. – 2001. – T. 38. – №. 2. – C. 34-39. DOI: 10.1109/6.898797.

102. Sychev, Y.A. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry / Y.A. Sychev, M.E. Aladin, R.Y. Zimin // Mining informational and analytical bulletin. – 2022. – № 7. – P. 164-179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164.

103. Ustinov, D. Investigation of the Effect of Current Protections in Conditions of Single-Phase Ground Fault through Transient Resistance in the 141 Electrical Networks of Mining Enterprises / D. Ustinov, A. Nazarychev, D. Pelenev, K.

Babyr, A. Pygachev // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 9. – P. 3690. DOI: 10.3390/en16093690.

104. Ustinov, D.A. Investigation of the Influence of Unbalances the Single Phase Ground Fault Current in a Coal Mining Enterprise / D.A. Ustinov, D.N. Pelenev, K.V. Babyr // 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – IEEE, 2022. – P. 1284-1289. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755474.

105. Voronin, V. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system / V. Voronin, F. Nepsha // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 246. – P. 633-639. DOI:10.31897/PMI.2020.6.5.

106. Xu, Z. A distance protection relay for a 1000-kV UHV transmission line, *IEEE Trans* / Z. Xu, S.-F. Huang, L. Ran, [et al.] // *IEEE Transactions on Power Delivery* 23, no. 4 (2008): 1795-1804. *IEEE Transactions on Power Delivery* 23, no. 4 (2008): 1795-1804.

107. Yaghobi, H. 2023. Real-time discrimination of symmetrical faults from power swings / H.Yaghobi // *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*. – 2023. – Vol. 19, 2658. <http://dx.doi.org/10.22068/IJEEE.19.2.2658>

108. Ye, S. LSTM-based rapid identification of dominant low frequency oscillation modal features in power system / S. Ye, Wei, J., Xu, Z., Zhang, W., Liu, X. [et al.] // 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. EI2, <http://dx.doi.org/10.1109/EI250167.2020.9347304>

109. Yin, Y. Protection of microgrid interconnection lines using distance relay with residual voltage compensations / Y.Yin , F .Yong, Z . Zhiying , Z .Amin // *IEEE Transactions on Power Delivery* 37, no. 1 (2021): 486-495.

110. Yellajosula, J., Online detection of power swing using approximate stability boundaries. *IEEE Trans. Power Deliv* / J .Yellajosula, Wei, Y., Grebla, M., Paudyal, S. Mork, B., // 35, 1220–1229. 2020. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2941522>.

111. Youssef.D, Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying, IEEE Trans. Power Delivery / D. Youssef. // (2004), [https://doi.org/ 10.1109/TPWR](https://doi.org/10.1109/TPWR)

112. Zou, L. Improved phase selector for unbalanced faults during power swings using morphological technique. IEEE Trans / L.Zou, Zhao, Q., Lin, X., Liu, P., 2006. // Power Deliv. 21, 1847–1855. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874608>



08.07.2025 № Исх/Ред-041-25

Председателю
диссертационного совета ГУ6,
доктору технических наук,
профессору
ФГБОУ ВО «СПГУ»
Назарычеву А.Н.

СПРАВКА

В редакцию поступили следующие статьи с фотографиями авторов:

Д.А. Устинов, А.Р. Айсар «Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор» от 28.11.2022;

Д.А. Устинов, А.Р. Айсар «Разработка нового рабочего алгоритма для повышения эффективности удаленной защиты в сетях распределенной генерации» от 22.03.2023.

В последующем уточнено (по фотографиям), что автор Абу Ршид Айсар и Абу Ршид Аисар является одним и тем же лицом, т.е. является автором статей:

Д.А. Устинов, А.Р. Аисар «Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор» DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20, опубликована в выпуске № 2 2023 г. журнала «Безопасность труда в промышленности»;

Д.А. Устинов, А.Р. Аисар «Разработка нового рабочего алгоритма для повышения эффективности удаленной защиты в сетях распределенной генерации» DOI: 10.24000/0409-2961-2023-5-20-27 опубликована в выпуске № 5 2023 г. журнала «Безопасность труда в промышленности».

Справка дана для предъявления по месту требования.

Главный редактор

С.Н. Буйновский

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(НГТУ)

Минина ул., 24, г. Нижний Новгород, 603155
Тел. (831) 436-23-25, факс (831) 436-94-75
E-mail: ntu@ntu.ru www.ntu.ru

СПРАВКА

02.07.2025 № 21.2-01-08/465

Подтверждаем, что Абу Ршид Аисар (Abou Rashed Aysar) является автором статьи «Оценка ветропотенциала для электроснабжения горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана (Сирия)», DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121, опубликованной в выпуске №2 2025 года журнала «Интеллектуальная электротехника» (ISSN 2658-6754).

Полные выходные данные статьи: Устинов Д.А., Аисар А.Р. Оценка ветропотенциала для электроснабжения горнодобывающих предприятий в Аль-Хайджана (Сирия) // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 2. С. 121-134. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_2_121.

Справка дана для предъявления по месту требования.

Главный редактор
журнала «Интеллектуальная электротехника»



А.Б. Лоскутов

This author profile is generated by Scopus 

Aysar, A. R.

[Saint Petersburg Mining University](#), Saint Petersburg, Russian Federation • Scopus ID: 58398207800 • [Связать с ORCID](#)  [Show all information](#)

14 Citations by 9 documents 3 документа 3 h-индекс

 Настроить оповещение  Сохранить в список  Редактировать профиль  Подробнее

Документы (3) [Влияние](#) [Цитировал \(9\)](#) [Препринты \(0\)](#) [Co-authors \(1\)](#) [Темы \(1\)](#) [Выданные гранты \(0\)](#) Beta

You can view, sort, and filter all of the documents in [search results format](#).

Экспортировать все  Сохранить все в список Сортировать по [Дата \(самые новые\)](#) 

Article • [Открытый доступ](#)
Using Artificial Neural Network Methods to Increase the Sensitivity of Distance Protection
Ustinov Anatolevich, D., Abou Rashid, A.
International Journal of Engineering Transactions B Applications, 2024, 37(11), страницы 2192–2199
[Просмотреть реферат](#)  [Full text](#)  [Связанные документы](#) 3 Цитирования

Article
Development of a New Working Algorithm for Improving the Efficiency of the Remote Protection in the Distributed Generation Networks
Ustinov, D.A., Aysar, A.R.
Bezopasnost Truda V Promyshlennosti, 2023, 2023(5), страницы 20–27
[Просмотреть реферат](#)  [Full text](#)  [Связанные документы](#) 4 Цитирования

Article
Analysis of the Impact of the Distributed Generation Facilities on Protection Systems and Voltage Mode: Review
Ustinov, D.A., Aysar, A.R.
Bezopasnost Truda V Promyshlennosti, 2023, 2023(2), страницы 15–20
[Просмотреть реферат](#)  [Full text](#)  [Связанные документы](#) 7 Цитирования

Отобразить [10 результатов](#) 

[View all references](#)

Документ и тенденции цитирования



[Обзор цитирования](#) [Анализировать результаты по автору](#)

Должность автора for 2015 – 2024

First author 0% 

документы Среднее количество цитирований FWCI

Last author 100% 

Информация об авторе

Is this your profile?

To claim this profile, click [Edit profile](#), confirm it's you, and hit submit.  [Редактировать профиль](#)

Другие имена

Abou Rashid, A. • Aysar, A. R.

Potential author matches (0)

Аутентификаторы профиля

Scopus ID 58398207800

История учреждения

2023 – 2024 [Saint Petersburg Mining University](#)

Предметные области

- Конструирование • Энергетика
- Охрана окружающей среды • Химическая инженерия

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2821418УСТРОЙСТВО ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В СЕТИ С
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II" (RU)*

Авторы: *Устинов Денис Анатольевич (RU), Абу Ришд Аисар (RU)*

Заявка № 2023131514

Приоритет изобретения 01 декабря 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 24 июня 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 01 декабря 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акт внедрения**

**Общество с ограниченной ответственностью «Академия КЭТ»
(ООО «Академия КЭТ»)**

ул. Егорова, д. 18 лит. А, 7Н/3, Санкт-Петербург, Россия, 198005

info@qetacademy.ru

12.02.2024 № 03-А

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Академия КЭТ»



В.В. Никитин

АКТ ВНЕДРЕНИЯ**результатов научного исследования в практику**

Мы нижеподписавшиеся, аспирант кафедры Э и ЭМ Абу Ршид Ансар, доцент кафедры Э и ЭМ, к.т.н., доцент Устинов Денис Анатольевич, с одной стороны и генеральный директор ООО «Академия КЭТ» Никитин Вадим Валерьевич, технический директор Варавин Артем Сергеевич, советник директора Млынчик Владимир Витальевич, директор по развитию Батурина Татьяна Витальевна с другой стороны составили настоящий акт о том, что на основании научно-исследовательской работы Абу Ршида Ансара и Устинова Дениса Анатольевича на тему «Обоснование структуры, параметров и алгоритмов работы дистанционной защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией» были внедрены следующие предложения и рекомендации при проектировании и разработке систем электрозащиты автономных электротехнических комплексов, подключенных к сети общего пользования за счет наличия блоков распределенной генерации:

№ п/п	Ф.И.О. автора внедрения	Наименование предложения и его краткая характеристика	Эффект от внедрения
1	Абу Ршид Ансар	Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией	Снижение ущерба от неселективного действия релейной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией за

			счет установки дополнительных комплектов элементов в противоположных концах защищаемых линий, для определения сопротивления, а также блока нейронных сетей
2	Абу Ршид Аисар	способ настройки и тестирования работы нейронной сети в составе дистанционной защиты, установленной в сетях с объектами распределенной генерации	Повышение чувствительности и селективности дистанционных защит за счет точного определения места повреждения

Автор разработки


Абу Ршид Аисар

Научный руководитель


Д.А. Устинов

Наименование организации, в которой выполнена диссертация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», 199106, Санкт-Петербург, Россия, Васильевский остров, 21 линия, д. 2; <https://spmi.ru/>

Технический директор


А.С. Варавин

Советник директора


В.В. Млынчик

Директор по развитию


Т.В. Батурина

Наименование организации, где внедрена разработка:

Общество с ограниченной ответственностью «Академия КЭТ», 198005, Санкт-Петербург, Россия, ул. Егорова, д. 18 лит. А, 7Н/3, info@qetacademy.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Статистические данные

Таблица В.1 – Статистические данные о срабатывании систем релейной защиты

Ток КЗ, А	Продолжительность КЗ, с	Место	Дата	Уровень U, кВ	Причина
8542	0.05 - 0.1	ТС - Адра	11.11.2023	66	Трансформаторы: пробой внутренней изоляции, повреждение обмотки или наличие примесей в изоляционном масле.
8341	0.05 - 0.1	Кабун	01.05.2024	66	Трансформаторы: пробой внутренней изоляции, повреждение обмотки или наличие примесей в изоляционном масле.
14101	0.05 - 0.1	Кунейтра	12.06.2023	66	Трансформаторы: пробой внутренней изоляции, повреждение обмотки или наличие примесей в изоляционном масле.
6253	0.05 - 0.3	Ас-Сувейда, Майн	02.02.2024	66	Обрушение опоры линии
5400	0.05 - 0.1	ТС -Тишрин	28/12/2023	66	Перегрузки
5871	0.05 - 0.1	Гандар	02.05.2024	66	Перегрузки
6521	0.05 - 0.1	ТС -Тишрин	03.12.2024	66	Перегрузки
5800	0.05 - 0.1	Дэраа, Майн	22/12/2024	66	Обрушение опоры линии
5751	0.05 - 0.1	Гандар	16/01/2025	66	Перегрузки
21540	0.05 - 0.1	Кабун	23/02/2025	66	Перегрузки
7450	0.05 - 0.5	Ас-Сувейда - Вторичное	23/02/2025	66	Перегрузки

Продолжение таблицы В.1

Ток КЗ, А	Продолжительность КЗ, с	Место	Дата	Уровень U, кВ	Причина
4800	0.05 - 0.5	Первый Салхад	03.11.2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4952	0.05 - 0.5	Второй Салхад	04.02.2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4361	0.05 - 0.5	Третий Салхад	06.04.2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4834	0.05 - 0.5	Аль-Курайят 1	02.08.2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4866	0.05 - 0.5	Аль-Курайят 2	23/3/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3284	0.05 - 0.5	Меззе 1	15/2/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
5420	0.05 - 0.5	Меззе 2	27/11/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
5831	0.05 - 0.5	Меззе 3	27/11/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4637	0.05 - 0.5	Меззе 4	27/11/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3541	0.05 - 0.5	Ал-Кхайжанah 1	13/9/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3684	0.05 - 0.5	Ал-Кхайжанah 2	13/9/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3487	0.05 - 0.5	Ябруд 1	10.06.2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
2150	0.05 - 0.5	Ябруд 2	10.06.2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4368	0.05 - 0.5	Ябруд 3	10.06.2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3629	0.05 - 0.5	Аль-Набк 1	14/11/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты

Продолжение таблицы В.1

Ток КЗ, А	Продолжительность КЗ, с	Место	Дата	Уровень U, кВ	Причина
3100	0.05 - 0.5	Аль-Набк 2	14/11/2024	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3527	0.05 - 0.5	Шахба 1	28/3/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4361	0.05 - 0.5	Шахба 2	28/3/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
4660	0.05 - 0.5	Шахба 3	28/3/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3298	0.05 - 0.5	Аль-Малихия 1	15/04/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
5423	0.05 - 0.5	Хош Плейс 1	16/04/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты
3645	0.05 - 0.5	Хош Плейс 2	16/04/2025	20/0.4	Ложное срабатывание защиты

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Схема Южного сектора Республики Сирия

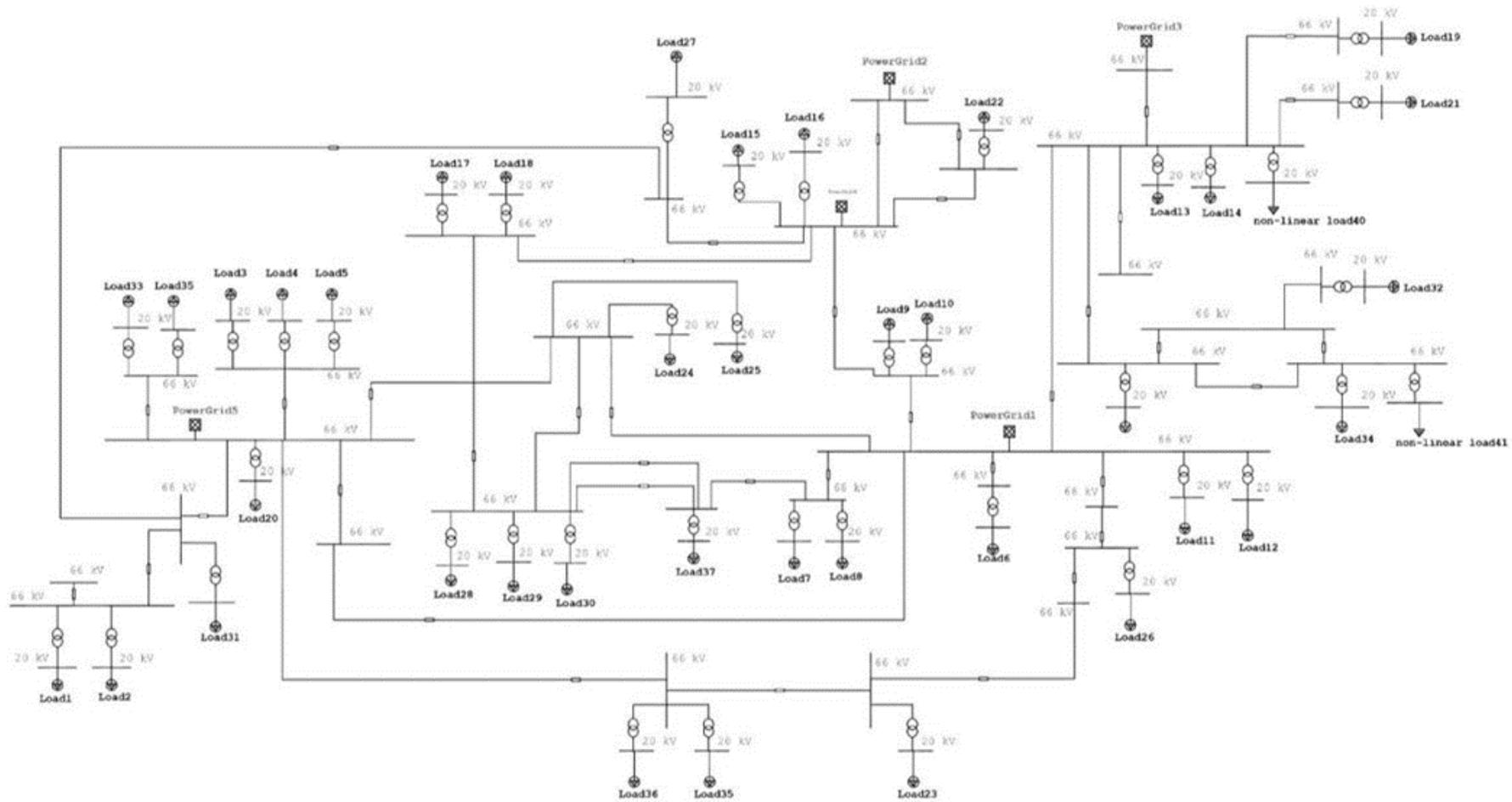


Рисунок Г.1 – Схема Южного сектора Республики Сирия