

На правах рукописи

Абу Ршид Ансар



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

*Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и
системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Устинов Денис Анатольевич

Официальные оппоненты:

Попов Максим Георгиевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», высшая школа высоковольтной энергетики, профессор;

Насыров Ринат Ришатович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электроэнергетических систем, доцент.

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2025 г. в 15:30** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 25 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЖУКОВСКИЙ
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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. 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.

Степень разработанности темы исследования

Теме 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., Белякова Ю.С.,

Гондурова С.А., Илюхина Е.В., Небрата И.Л., Обабкова В.К., Сапункова М.Л., Шабада М.А., Шалина А.И., 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 защит электротехнических комплексов.

Однако в этих работах не рассмотрены особенности функционирования дистанционной защиты 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.

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 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 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.

5. Результаты диссертации использованы в производственной деятельности ООО «Академия «КЭТ» (акт внедрения №03-А от 12.02.2024 г.) 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 чувствитель-

ность 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 в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных: XVII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения» (25-29.11.2024 г., г. Томск); I Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровые технологии и платформенные решения для управления развитием электроэнергетики» (23 марта 2023 г., г. Севастополь); Всероссийская научно-практическая конференция «ЭЛЭТ-2022: Электроэнергетика и электротехника» (21-23 декабря 2022 г., г. Саратов); Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (1 мая 2023 г., г. Санкт-Петербург); 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 в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

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

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, доценту Устинову Денису Анатольевичу за научное руководство над работой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ состояния и тенденций развития релейной защиты в сетях с распределенной генерацией, рассмотрены научно-технические проблемы обеспечения селективности и чувствительности действия защит электротехнических комплексов в сетях с распределенной генерацией. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе было изучено влияние распределенной генерации на селективность и чувствительность действия дистанционной защиты. Выполнен анализ алгоритмов действия

дистанционной защиты в сетях распределенной генерации и проведено сравнение производительности каждого из них в аварийных режимах при двух- и трехфазных замыканиях. 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. Разработан алгоритм определения повреждения для распределительных систем с РГ с использованием нейронной сети.

В третьей главе проведено исследование действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. Разработан алгоритм функционирования многоуровневой искусственной нейронной сети. С целью проверки эффективности алгоритма защиты в условиях возникновения коротких замыканий в распределительной сети было выполнено имитационное моделирование в программном комплексе *MatLab Simulink*. Выполнен сбор данных для обучения и тестирования нейронной сети. Представлены результаты проведенного обучения и тестирования.

В четвертой главе выполнена оценка эффективности действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. Разработана структура устройства защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией. Выполнена оценка показателей надежности защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. Выполнена оценка чувствительности действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией.

В заключении обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Применение нейронных сетей в дистанционных защитах электротехнических комплексов позволяет повысить чув-

ствительность и селективность защит, работающих в системе распределенной генерации.

Выполнен анализ существующих алгоритмов действия дистанционных защит электротехнических комплексов с распределенной генерацией: с учетом поправочного коэффициента, учитывающего подпитывающий эффект от дополнительных источников (метод 1); с учетом выявленных зависимостей расстояния до точки повреждения от сопротивления с учетом подпитывающего эффекта (метод 2); алгоритма, основанного на эквивалентном преобразовании расчетной схемы методом Тевенина (метод 3); алгоритма, основанного на преобразовании Стоквелла (метод 4). Расчетная схема электротехнического комплекса с распределенной генерацией показана на рисунке 1а. На рисунке 2 приведены графики, показывающие влияние параметров нагрузки, источников питания, величины переходного сопротивления в месте КЗ на погрешность в определении места КЗ. Показано, что защиты, реализующие данные алгоритмы, не всегда способны обеспечить требуемые селективность и чувствительность в условиях распределенной генерации. 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. Предложено применение искусственных нейронных сетей для повышения чувствительности и обеспечения селективности дистанционной защиты в данных условиях.

Разработана модель исследования действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией в программном комплексе MatLab Simulink. Функциональная схема электротехнического комплекса с распределенной генерацией показана на рисунке 1б. Блок-схема электротехнического комплекса с распределенной генерацией в программном комплексе MatLab Simulink показана на рисунке 2. С помощью данной модели выполнен сбор данных для обучения и те-

стирования нейронной сети: значения тока и напряжения в местах установки защиты.

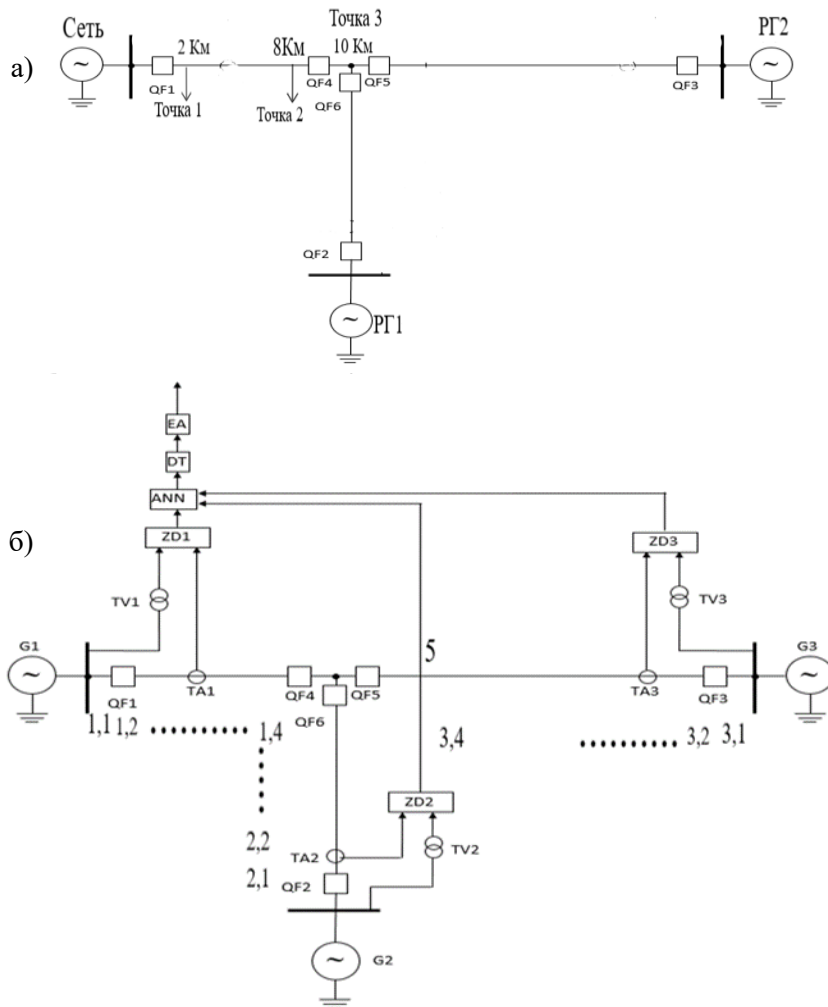


Рисунок 1 - Схема рассматриваемой модели

При этом были рассмотрены различные типы повреждений (двух- и трехфазные короткие замыкания), точки повреждения, из-

менения величины нагрузки, значения переходного сопротивления в месте повреждения принималось равным $R_f = 0 \text{ Ом}, 2 \text{ Ом}, 4 \text{ Ом}, 6 \text{ Ом}$.

Предложено использовать многоуровневую искусственную нейронную сеть (рисунок 3). Полученный набор данных был поделен: 70 % набора приходится на обучение, 15 % на проверку и 15 % на тестирование. На рисунке 4 видно, что по мере увеличения количества нейронов в скрытом слое ошибка оценки расстояния уменьшается, и такое поведение показывает, что для большого количества нейронов в скрытом слое точность оценки расстояния может возрасти.

Установлены зависимости коэффициента чувствительности от переходного сопротивления в точке повреждения. Установлено влияние параметров нагрузки на сопротивление срабатывания пускового органа защиты.

Выполнена оценка чувствительности действия защиты электротехнических комплексов на основе нейронных сетей в системе с распределенной генерацией. Показано, что коэффициент чувствительности защит с применением нейронных сетей принимает значения выше 1.5, что соответствует необходимым требованиям (рисунок 5).

Выполнена оценка погрешности действия дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией при различных значениях угла нагрузки (рисунок 6). При увеличении угла нагрузки до 30° погрешность действия дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией может достигать 15 %. При применении ИНС в алгоритме действия защиты данная погрешность снижается практически до 0.

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

Выполнен анализ статистических данных Национального центра энергетических исследований Республики Сирия о работе распределительных сетей.

На основе этих данных были определены показатели надежности: SAIDI (System Average Interruption Frequency Index, индекс средней продолжительности отключений), SAIFI (System Average Interruption Frequency Index, индекс средней частоты отключений), CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index, индекс средней продолжительности отключения одного потребителя). Установлено, что применение ИНС в составе защиты электротехнических комплексов с распределенной генерацией способствует улучшению указанных показателей до 9 раз (рисунок 7).

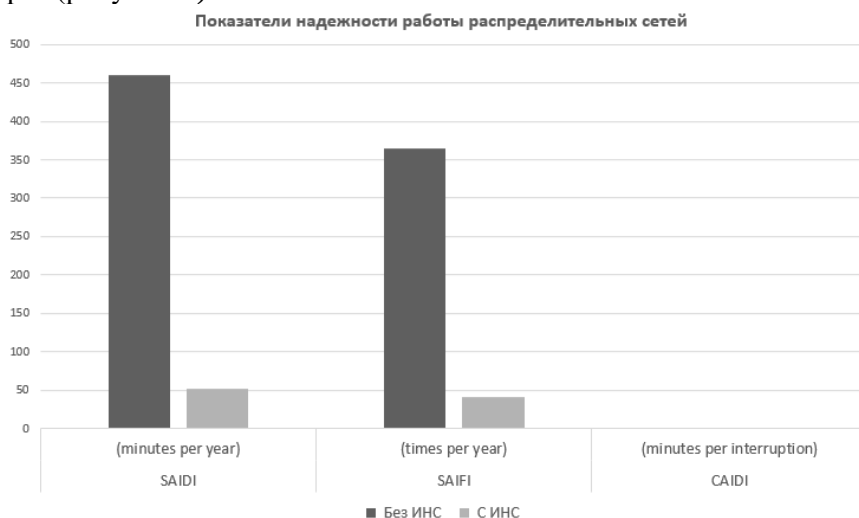


Рисунок 7- Показатели надежности работы распределительных сетей

Предложено устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией (рисунок 8). Устройство состоит из следующих элементов: 1 – линия распределительной сети; 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 двустороннего обмена информацией; 9 – первый сумматор; 10 – преобразователь тока в напряжение; 11 – второй сумматор; 12 – измери-

тельный 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.

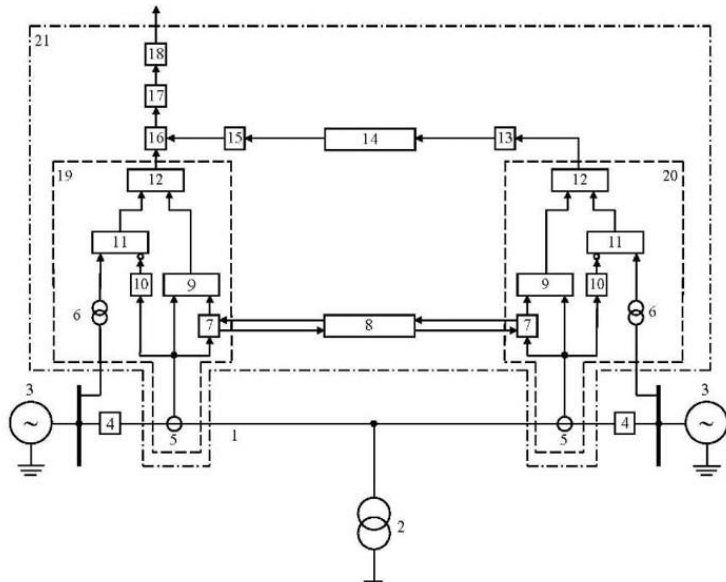


Рисунок 8 - Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией

Технический результат достигается тем, что в устройство дополнительно установлены комплект элементов, расположенных в противоположном конце защищаемой линии, блок двустороннего обмена информацией, входы и выходы которого соединены входами и выходами с устройствами приема-передачи сигналов, устройство передачи сигналов, выход которого соединен с входом блока одностороннего обмена информацией, выход которого соединен с входом устройства приема сигналов, выход которого соединен с входом

блока нейронных сетей. Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной генерацией состоит из симметрично установленного комплекта элементов, установленных в месте установки защиты и комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии. 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 со вторых сумматоров и первых сумматоров соединены с входами измерительных органов сопротивления. Выходы и входы устройств приема-передачи сигналов соединены со входами и выходами блока двухстороннего обмена информацией. Выход измерительного органа сопротивления комплекта элементов, установленных в противоположном конце защищаемой линии, соединен со 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 со входами блока нейронных сетей, выход которого соединен со входом органа выдержки времени. Выход органа выдержки времени соединен со входом исполнительного органа, выход которого соединяется выходом устройства в целом. В блоке нейронных сетей осуществляется анализ сигналов измерительных органов сопротивления комплекта элементов, установленных в месте установки защиты, и комплекта элементов, размещенных в противоположном конце защищаемой линии, сравниваются сигналы с характеристикой срабатывания и формируется сигнал на вход органа выдержки времени, если сигналы оказываются в области срабатывания защиты. Устройство дистанционной защиты линий электропередач в сети с распределенной ге-

нерацией за счет установки дополнительного комплекта элементов в противоположном конце защищаемой линии для определения сопротивления, а также блока нейронных сетей позволяет повысить чувствительность дистанционной защиты к коротким замыканиям.

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 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), 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 в различных системах защиты в сетях с объектами распределенной генерации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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. – EDN CPSBBY.

2. Устинов, Д.А. Исследование алгоритмов работы дистанционной защиты в системах распределенной генерации / Д.А. Устинов, **А.Р. Айсар** // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2023. – № 2(59). – С. 41-55. – DOI 10.17212/1727-2769-2023-2-41-55. – EDN VPFPVT.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. 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. – EDN EPDDYO.

4. 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. – EDN: DEUMCI.

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

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент на изобретение № 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. Айсар**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». - 13 с.: 1 ил.

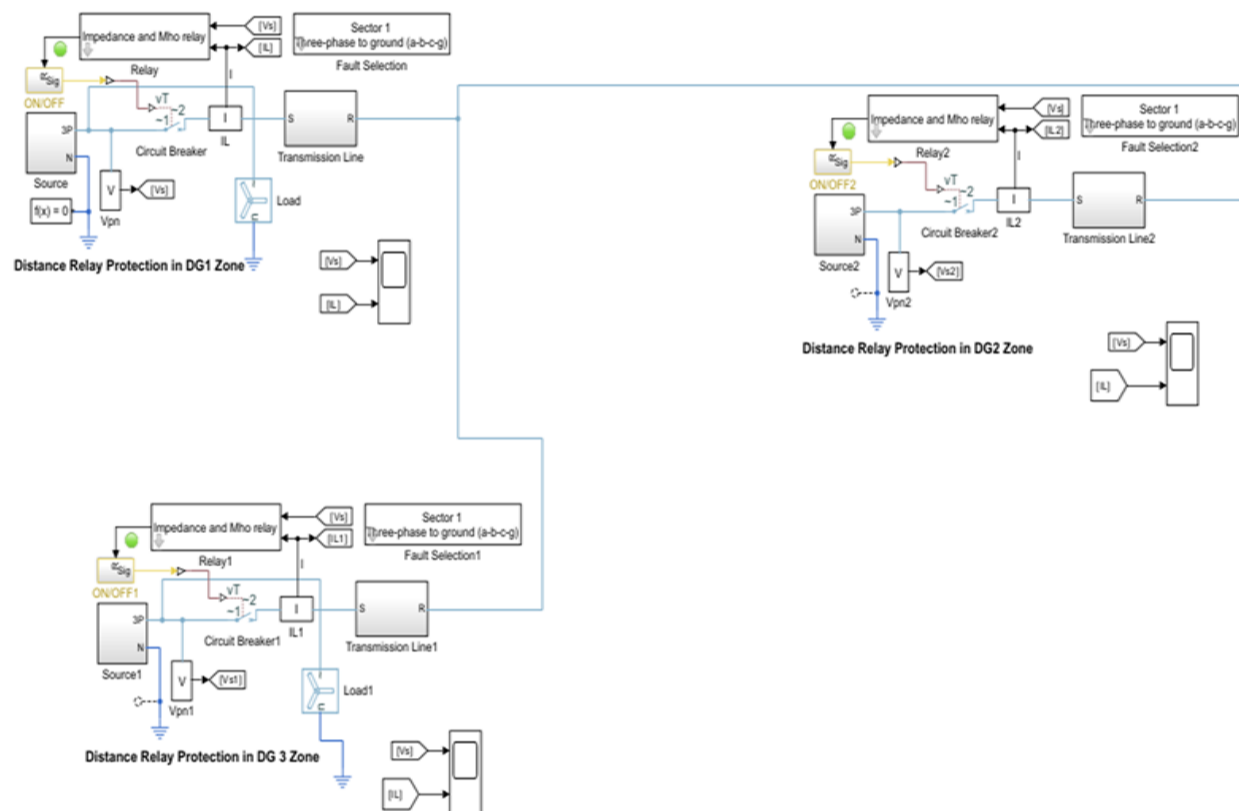


Рисунок 1 - Блок – схема электротехнического комплекса

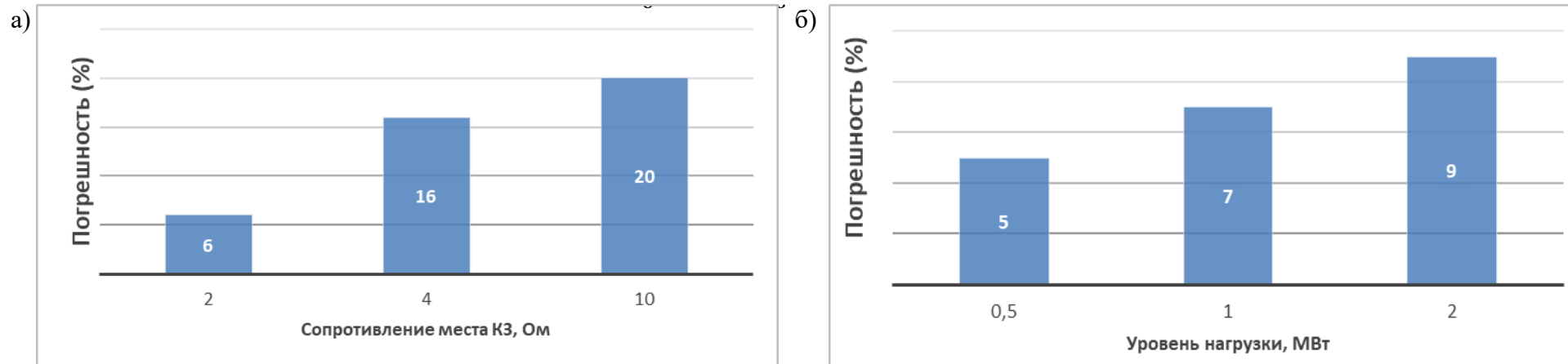


Рисунок 2 - Влияние параметров нагрузки и источников питания на погрешность в определении места КЗ:

а) Уровень нагрузки = 1 МВт, уровень генерации РГ1 = 4 МВт, РГ2 = 2 МВт, точка 1

б) РГ1 = 2 МВт, РГ2 = 2 МВт. Сопротивление места КЗ= 10 Ом, точка 2

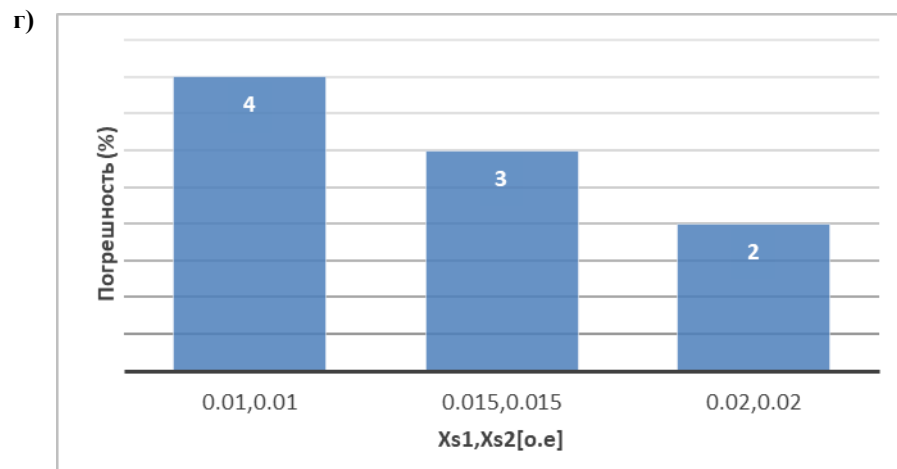
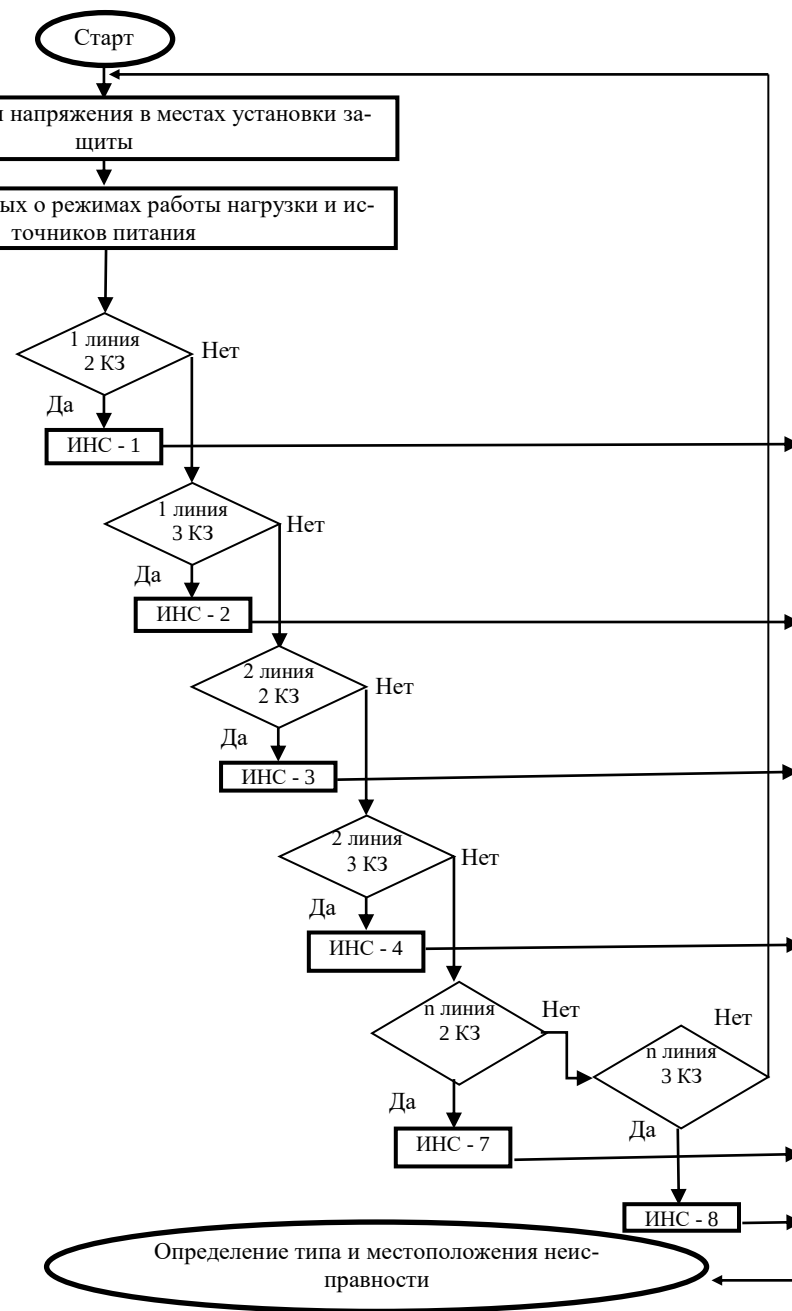


Рисунок 2 – Влияние параметров нагрузки и источников питания на погрешность в определении места КЗ (продолжение):
 в) Уровень подготовки = 2 МВт, сопротивление места КЗ = 10 Ом, точка 1
 г) Уровень подготовки = 1 МВт, сопротивление места КЗ = 10 Ом, точка 3



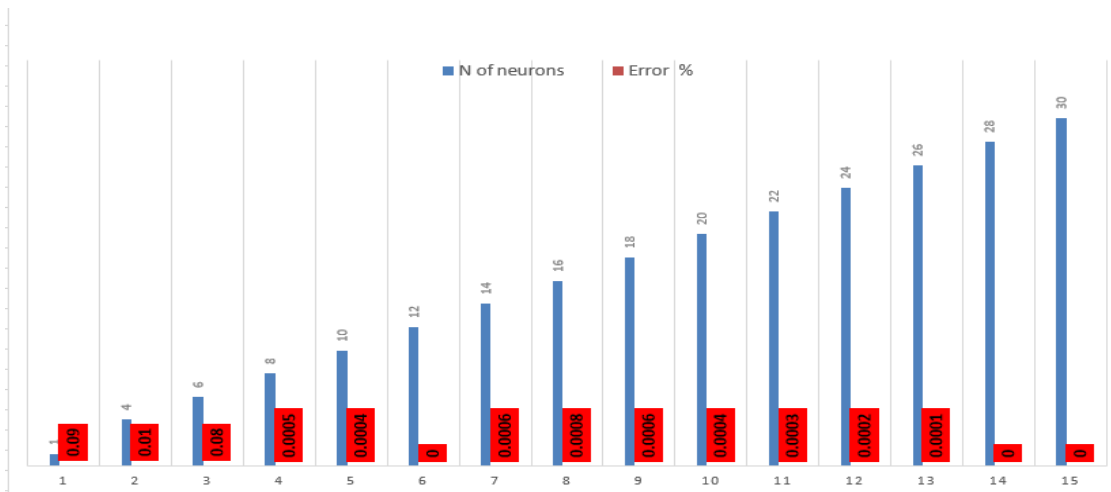


Рисунок 4 - Средняя абсолютная ошибка оценки расстояния до точки повреждения с учетом различного количества нейронов

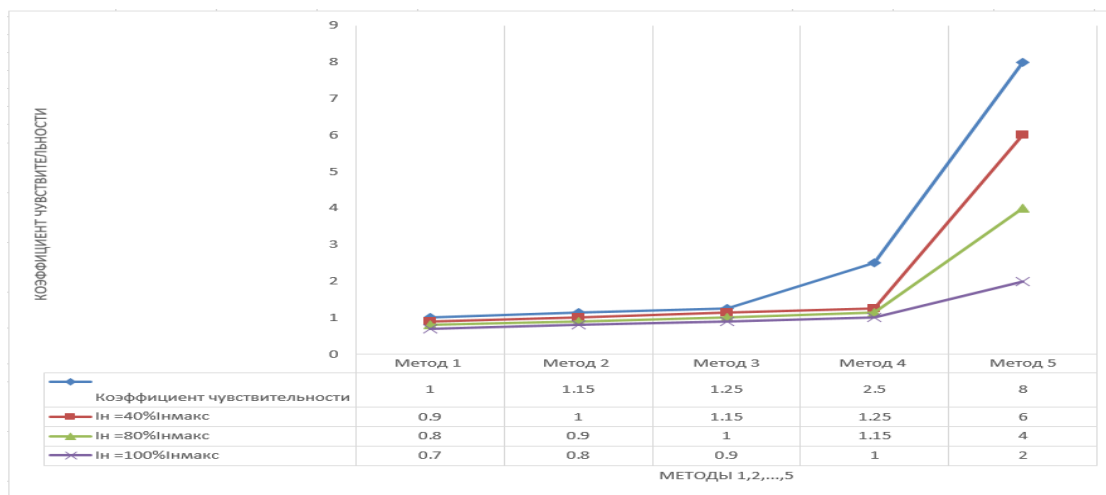


Рисунок 5 - Значения коэффициента чувствительности при изменении нагрузки

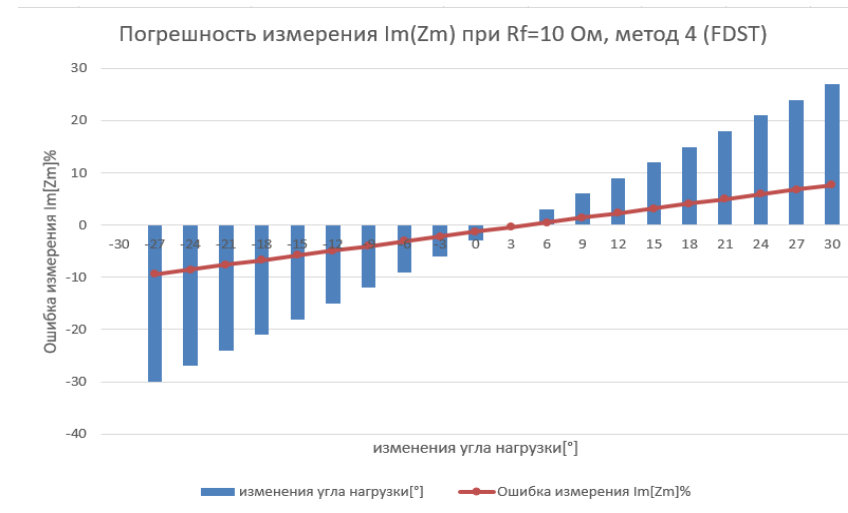
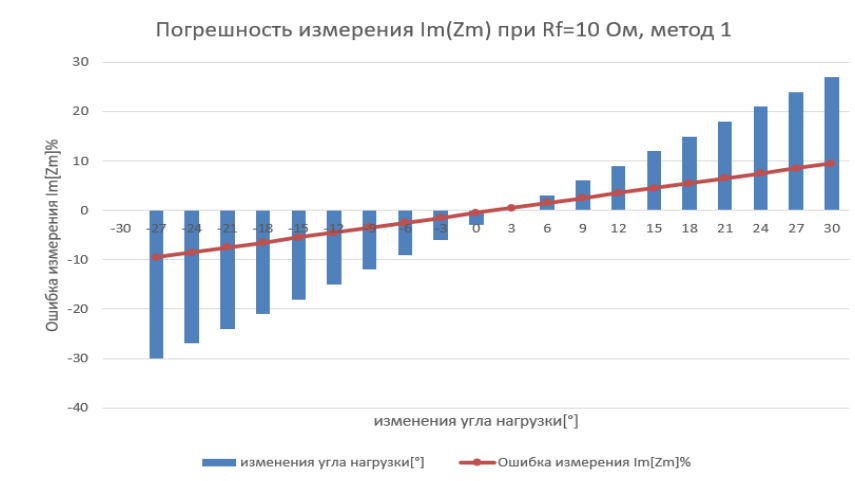


Рисунок 6 - Погрешности действия дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией при различных значениях угла

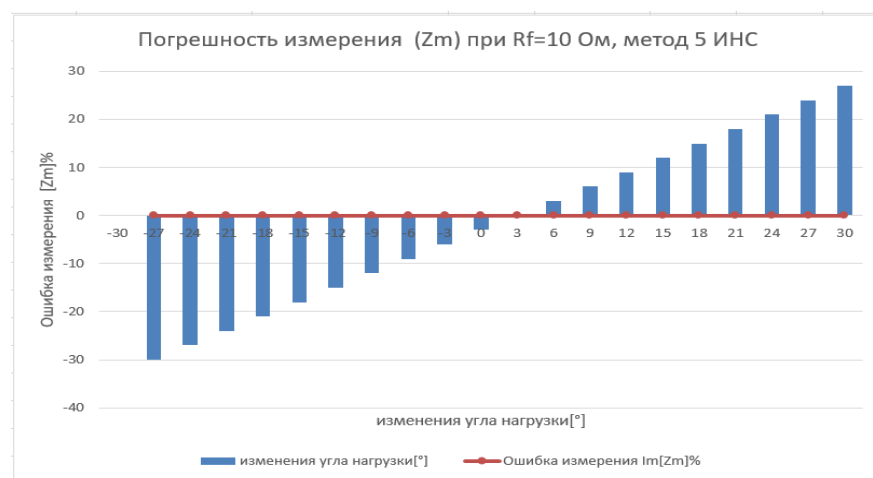
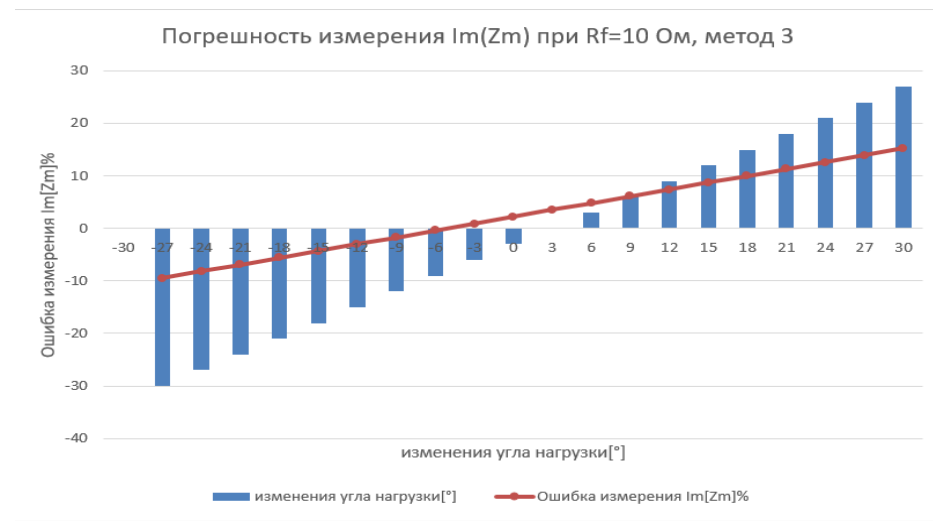
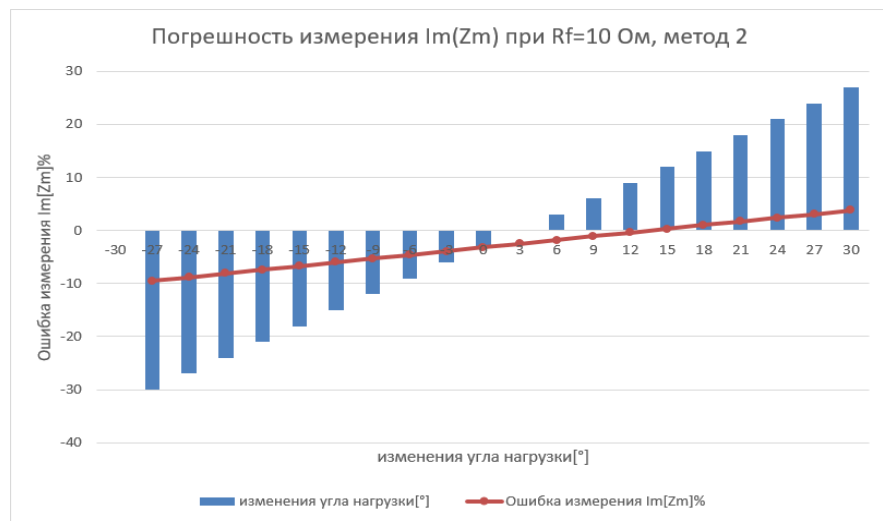


Рисунок 6 - Погрешности действия дистанционной защиты электротехнических комплексов в системе с распределенной генерацией при различных значениях угла нагрузки (продолжение)