

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

На правах рукописи

ПЕЛЕНЕВ ДЕНИС НИКОЛАЕВИЧ

**ИНВАРИАНТНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ С
АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
доктор технических наук,
профессор Абрамович Б.Н.

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 кВ	11
1.1. Общие требования к защитах от однофазных замыканий на землю	11
1.2. Индивидуальные защиты отходящих присоединений	13
1.3. Централизованные защиты.....	22
1.4. Анализ причин неселективного действия защит от однофазных замыканий на землю	24
1.5. Цели и задачи диссертационной работы.....	30
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ В УСЛОВИЯХ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.....	32
2.1. Зависимости напряжения и токов нулевой последовательности от параметров контура нулевой последовательности.....	32
2.2. Диапазоны вариации параметров контура нулевой последовательности ..	44
2.3. Определение характеристик срабатывания защиты от однофазных замыканий в условиях вариации параметров контура нулевой последовательности	53
2.4. Разработка методики определения чувствительности действия защиты в условиях однофазных замыканий через переходное сопротивление.....	62
Выводы по главе 2:	65
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНВАРИАНТНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ПРИ НЕПОЛНЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ ...	67
3.1. Способы повышения чувствительности действия защиты в условиях замыкания через переходное сопротивление.....	67
3.2. Разработка алгоритмов автоматической коррекции входных параметров защиты от однофазных замыканий	68

3.3. Исследование эффективности действия защиты с автоматической коррекцией входных параметров	76
Выводы по главе 3:	98
ГЛАВА 4. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИНВАРИАНТНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	100
4.1. Структурная схема и реализация комплекса инвариантной защиты от ОЗЗ отдельных присоединений	100
4.2. Исследование инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты отдельных присоединений в условиях вариации переходного сопротивления в месте повреждения	105
4.3. Разработка аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от однофазных замыканий	109
4.4. Анализ чувствительности действия инвариантной защиты от замыканий на землю	116
Выводы по главе 4:	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ В ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Г ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В структуре электротехнических комплексов (ЭТК) промышленных предприятий России большое значение имеют электроустановки среднего класса напряжения 6-35 кВ, от надежной и бесперебойной работы которых зависит эффективность технологических процессов на производстве.

Выполненный анализ эксплуатационных данных об аварийности электроустановок в ЭТК 6-35 кВ показал, что подавляющее большинство повреждений связано с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ), доля которых составляет 75-80% от общего числа аварийных случаев. Режим однофазного замыкания сопровождается значительными экономическими ущербами вследствие выхода из строя ответственного электрооборудования и характеризуется возникновением ситуаций, связанных с высокой опасностью поражения обслуживающего персонала электрическим током.

Для минимизации ущербов в ЭТК 6-35 кВ по причине однофазных замыканий на землю необходимо применять эффективные средства релейной защиты и автоматики, позволяющие селективно выявлять поврежденное присоединение и своевременно устранять возникшее ОЗЗ путем отключения поврежденного участка сети. Однако нестационарность конфигурации ЭТК, многофакторность процессов при однофазных замыканиях на землю, многообразие режимов ОЗЗ определяют сложность организации защиты, обладающей необходимой селективностью и независимостью действия в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Эффективность действия защиты от ОЗЗ в значительной мере зависит от способа заземления нейтрали электрической сети. Заземление нейтрали распределительной сети 6-35 кВ через резистор, позволяет повысить селективность действия защиты от ОЗЗ в сравнении с сетями с изолированной нейтралью за счет дополнительного активного тока, протекающего только по поврежденной линии.

Однако применяемые в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью защиты от ОЗЗ обладают низкой селективностью действия в условиях возникновения замыканий на землю через переходное сопротивление, которое как один из параметров контура нулевой последовательности влияет на рабочие сигналы защиты и является причиной неработоспособности защиты от ОЗЗ.

Степень разработанности направления исследований

Изучению вопросов в области разработки и совершенствования защит от однофазных замыканий на землю посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Сирота И.М. обосновал фундаментальные принципы организации защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях среднего класса напряжения [68]. Лихачев Ф.А. внес значительный вклад в развитие теории переходных процессов, протекающих в электрической сети при различных режимах однофазного замыкания на землю [39]. Обабков В.К., разработал методологию оценки параметров, характеризующих переходные процессы при неустойчивых замыканиях на землю в электротехнических комплексах с изолированной и компенсированной нейтралью [41-45]. Шабад М.А. внес значительный вклад в разработку практических рекомендаций по применению устройств защиты от ОЗЗ в зависимости от конфигурации электрических сетей среднего напряжения [81, 82]. Работы Абрамовича Б.Н. связаны с созданием алгоритмов действия направленных защит от однофазных замыканий на землю и устройств выявления поврежденной фазы в электрических сетях 6-35 кВ предприятий минерально-сырьевого комплекса [1, 2]. Совершенствованию способов защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности при неполных замыканиях на землю посвящены исследования Шалина А.И. и Сапункова М.Л. [83-87, 47, 65, 66]. Зарубежные ученые J. Roberts и E. Schweitzer обобщили опыт моделирования и экспериментальных исследований режимов замыкания на землю в электрических сетях среднего напряжения [94-96].

Однако, несмотря на многочисленные исследования и разработки, проведенные в этой области, практически ни одно из наиболее распространенных устройств защиты от ОЗЗ не обладает требуемой селективностью и неизменностью действия в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности. Также отсутствуют зависимости напряжения и токов нулевой последовательности от параметров контура нулевой последовательности в режиме замыкания на землю через переходное сопротивление, позволяющие оценить уровень неполноты замыкания на землю и его влияние на чувствительность действия защит. Это обуславливает необходимость разработки структуры, алгоритмов действия и реализации защиты от однофазных замыканий на землю, позволяющей селективно выявлять поврежденное присоединение в условиях возникновения неполных ОЗЗ и обладающей независимым, т.е. инвариантным действием по отношению к изменяющимся параметрам контура нулевой последовательности.

Цель работы.

Повышение селективности и инвариантности действия защиты от однофазных замыканий на землю электротехнических комплексов напряжением 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Идея работы.

Обеспечение селективного и инвариантного действия защиты от однофазных замыканий на землю в ЭТК среднего класса напряжения с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью при неполных замыканиях на землю достигается путем оценки величины переходного сопротивления в месте повреждения и последующей автоматической коррекции входных параметров защиты с учетом степени неполноты замыкания на землю.

Основные задачи исследований.

1. Выявить закономерности изменения напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в условиях вариации

переходного сопротивления в месте ОЗЗ, позволяющие определить степень неполноты замыкания фазы электрической сети на землю.

2. Установить влияние вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости линий, переходные сопротивления в месте замыкания на землю и параметры системы заземления нейтрали, на эффективность действия защиты от ОЗЗ.

3. Разработать алгоритмы инвариантного действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров, включая сигналы тока нулевой последовательности защищаемых присоединений и уставки на срабатывание.

4. Разработать структуру и реализацию аппаратно-программного комплекса защиты от однофазных замыканий на землю, обеспечивающего селективное выявление поврежденного присоединения в условиях возникновения неполных замыканий на землю и обладающего инвариантным действием по отношению к изменяющимся параметрам контура нулевой последовательности.

Научная новизна.

1. Установлены закономерности изменения напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в ЭТК 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью в условиях вариации параметров контура нулевой последовательности, включая переходное сопротивление в месте замыкания на землю, поперечные проводимости фаз линий относительно земли и параметры системы заземления нейтрали, позволяющие оценить степень неполноты замыкания на землю и ее влияние на чувствительность действия защиты от однофазных замыканий на землю.

2. На основе установленных зависимостей, характеризующих процессы в контуре нулевой последовательности при ОЗЗ через переходное сопротивление, разработан алгоритм действия защиты от однофазных замыканий на землю, предусматривающий оценку уровня неполноты замыкания фазы на землю и последующую автоматическую коррекцию сигналов токов нулевой последовательности защищаемых присоединений до величин, при которых

обеспечивается инвариантность действия защиты в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Положения, выносимые на защиту.

1. Чувствительность действия защиты от однофазных замыканий на землю должна определяться с учетом выявленных зависимостей напряжения и токов нулевой последовательности от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли, переходное сопротивление в месте повреждения и параметры системы заземления нейтрали, позволяющие оценить степень неполноты замыкания на землю.

2. Аппаратно-программный комплекс защиты от однофазных замыканий на землю для электрических сетей с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью должен содержать взаимосвязанные модули, позволяющие определять степень неполноты замыкания на землю и выполнять последующую автоматическую коррекцию сигналов токов нулевой последовательности защищаемых присоединений до уровня, соответствующего расчетному режиму металлического замыкания на землю, при котором обеспечивается селективная идентификация поврежденного присоединения и инвариантность действия защиты в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Практическая ценность.

1. Разработана методика определения чувствительности действия токовых защит от ОЗЗ в условиях неполных однофазных замыканий на землю, позволяющая выявить необходимый уровень коррекции входных сигналов защиты.

2. Разработаны структура и реализация аппаратно-программного комплекса инвариантной защиты от однофазных замыканий на землю, обладающего повышенной селективностью выявления поврежденного присоединения в условиях возникновения ОЗЗ через переходные сопротивления.

Методы исследования.

В работе использованы методы имитационного моделирования в системе MatLab Simulink, численного анализа с использованием пакета MathCAD, экспериментального исследования путем физического моделирования в лабораторных условиях.

Достоверность результатов исследования.

Адекватность моделей и методов, используемых в работе, подтверждается известными фундаментальными теориями и методами исследования электрических процессов при однофазных замыканиях на землю, результатами вычислительных и натурных экспериментов. Сходимость результатов моделирования и экспериментальных исследований не ниже 90%.

Реализация результатов работы.

Разработанная в диссертации методика коррекции входных параметров защиты рекомендована к использованию при эксплуатации и модернизации защиты от однофазных замыканий на землю в ЭТК 6-35 кВ ПАО «Уралкалий», о чем получен акт внедрения основных результатов работы.

Личный вклад автора.

Установлено влияние вариации параметров контура нулевой последовательности при ОЗЗ через переходное сопротивление на эффективность действия защиты от замыканий на землю. Разработана методика определения чувствительности действия токовой защиты от ОЗЗ в условиях неполных однофазных замыканий. Разработан алгоритм, обеспечивающий инвариантность действия защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности. Разработан аппаратно-программный комплекс защиты от однофазных замыканий на землю для ЭТК с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью, обладающий необходимой селективностью выявления поврежденного присоединения при замыканиях на землю через переходное сопротивление.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались следующих конференциях: международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва 2013, 2014, 2016 гг.), 54 международная конференция студентов и молодых ученых «Mining division student research group conference» (г. Краков, Польша, 2013 г.), международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность энергетического оборудования» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), юбилейная 70-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ 2016» (г. Москва, 2016 г.), международная межвузовская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые - наукам о земле» (г. Москва, 2016 г.), конференция молодежного инновационного центра ПАО «ЛЕНЭНЕРГО» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.), 2-ая международная научная школа академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (г. Москва, 2016 г.), III-я международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано всего 10 печатных работ, в том числе 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 56 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 97 наименований. Общий объем диссертации 143 страницы.

ГЛАВА 1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 кВ

1.1. Общие требования к защитам от однофазных замыканий на землю

Многообразие видов защит от однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ обусловлено, в большей степени, применяемыми в этих сетях режимами заземления нейтрали: изолированная, резистивно-заземленная и компенсированная [11, 19, 22, 28, 63, 64]. В отдельных случаях предлагается применять режим комбинированного заземления нейтрали, представляющего собой сочетание резистора и дугогасящего реактора в цепи нейтрали [34, 35, 63, 40]. При выборе режима заземления нейтрали одним из наиболее важных критериев является возможность организации эффективной защиты от ОЗЗ, способной надежно функционировать при различных видах замыкания на землю.

Эффективность действия защит от однофазных замыканий на землю в условиях существования ОЗЗ в сети зависит от выполнения ряда основных требований [3, 4, 36, 77]:

- селективность (избирательность) действия защиты, определяющая способность защиты отключать только поврежденный участок электрической сети с однофазным замыканием, а неповрежденные – оставлять в работе;
- чувствительность защиты, характеризующая способность защиты разделять предельно допустимый режим работы и аварийный;
- надежность действия, характеризующая способность защиты обеспечивать стопроцентную правильность ее работы при возникновении условий на срабатывание;
- быстродействие защиты, определяющее способность защиты за минимальное время выявить поврежденное присоединение и сгенерировать сигнал на отключение поврежденного присоединения.

Выполнение этих основных требований, предъявляемых к защите от ОЗЗ, позволит минимизировать ущербы в распределительных электрических сетях 6-35 кВ, связанные с нарушениями электроснабжения по причине выхода из строя электрооборудования вследствие неправильного функционирования защиты от ОЗЗ.

Однако известно, что 80% подстанций России среднего класса напряжения не оснащены устройствами селективной защиты от однофазных замыканий на землю, а имеют только сигнализацию ОЗЗ по напряжению нулевой последовательности [8, 18]. Эффективность действия защит от ОЗЗ, используемых на оставшихся 20% подстанций является крайне низкой [9].

Многофакторность и непостоянство протекания процессов в электрической сети при различных режимах однофазного замыкания, нестационарность характеристик и параметров самих электрических сетей являются основными причинами сложности организации всережимной селективной защиты от ОЗЗ.

В качестве защиты от однофазных замыканий на землю на объектах распределительных сетей 6-35 кВ России наибольшее распространение получили устройства сигнализации ОЗЗ, выполняющие функцию контроля состояния изоляции отходящих присоединений. Возникновение однофазного замыкания на землю на одном из отходящих присоединений фиксируется по признаку появления в сети напряжения нулевой последовательности U_0 . Для выполнения этих функций используются трансформаторы типа НТМИ, имеющие первичную обмотку высшего напряжения и две вторичные (основная и дополнительная). Дополнительная вторичная обмотка выполнена по схеме разомкнутого треугольника и предназначена для измерения напряжения нулевой последовательности, максимальное значение которого в установившемся режиме ОЗЗ не будет превышать 100 В.

Исполнительным органом данного устройства защиты является реле напряжения, которое при появлении напряжения U_0 в сети формирует сигнал о возникновении замыкания на землю. Ввиду наличия небалансов по напряжению в электрической сети, вызванных различными видами несимметрии параметров

контура нулевой последовательности уставка реле напряжения обычно выставляется в пределах 10-15 В [80, 82].

Однако такой способ выявления поврежденного присоединения в распределительной сети связан с высокими эксплуатационными затратами ввиду того, что поиск присоединения с однофазным замыканием на землю осуществляется путем оперативного переключения отходящих от секции шин подстанций линий вплоть до исчезновения сигнала о ОЗЗ. Кроме того, коммутационные переходные процессы, возникающие в электротехнических комплексах в процессе поиска ОЗЗ, создают высокий уровень опасности повреждения электрооборудования, что неприемлемо по условиям эксплуатации.

Ниже представлен аналитический обзор основных способов организации защит от однофазных замыканий на землю в электрических сетях среднего напряжения и приводится сравнительный анализ рассмотренных способов с целью выявления возможности обеспечения селективного действия защиты в условиях ОЗЗ.

1.2. Индивидуальные защиты отходящих присоединений

1.2.1. Защиты, основанные на контроле установившихся токов нулевой последовательности защищаемых линий

В распределительных сетях 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью наибольшее распространение получили токовые ненаправленные защиты нулевой последовательности. Алгоритм действия ненаправленных защит от ОЗЗ основан на контроле токов нулевой последовательности защищаемых присоединений при возникновении в сети однофазного замыкания и сопоставлении их значений с уставками на срабатывание. При этом на поврежденной линии величина рабочего сигнала защиты будет пропорциональна значению суммарного тока нулевой последовательности всех линий сети за вычетом собственного тока нулевой последовательности поврежденной линии, а на неповрежденных линиях – собственным токам нулевой последовательности линий.

Для контроля токов линий используются специальные трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП) или фильтры тока нулевой последовательности (ФТНП). Вариант с ФТНП используется на воздушных линиях, которые не имеют кабельной вставки на выходе выключателя линии, где, как правило, устанавливают ТТНП. Однако использование ФТНП в качестве датчика тока нулевой последовательности предполагает установку в каждой фазе отходящей линии обычного измерительного трансформатора тока.

Селективное действие ненаправленных токовых защит от ОЗЗ возможно в электрических сетях с изолированной нейтралью, где суммарный ток однофазного замыкания на землю превышает собственный ток нулевой последовательности любой линии сети в 4-8 раз и более. Учитывая возможную нестабильность конфигурации сети и, как следствие, непостоянство значения суммарного тока ОЗЗ сети, необходимо с целью обеспечения селективности и требуемой чувствительности действия защиты при выборе уставок на срабатывание принимать условие, при котором суммарный ток ОЗЗ превышал бы собственный ток нулевой последовательности любой линии в 10 раз и более [4, 77].

В распределительных сетях с резистивным заземлением нейтрали условия для обеспечения селективности действия ненаправленных токовых защит улучшаются благодаря увеличению суммарного тока замыкания на землю за счет активной составляющей тока заземляющего резистора. Однако при применении высокоомных резисторов, предназначенных, в первую очередь, для снижения уровня перенапряжений в сети при ОЗЗ, задачу обеспечения рекомендуемых соотношений токов в сетях с неоднородной конфигурацией в ряде случаев решить проблематично.

На сегодняшний день в электрических сетях среднего напряжения применяются ненаправленные токовые защит от ОЗЗ, построенные на микропроцессорных терминалах. Наиболее распространенными терминалами защит являются: SEPAM типа S80 фирмы Schneider Electric [25], SPAC-801-101 SPACOM фирмы «АББ Реле-Чебоксары» [32], Сириус-2-МЛ фирмы ЗАО

«РАДИУС Автоматика» [74], ТЭПМ 2501 фирмы ОАО «ВНИИР» [33], MiCOM P120 фирмы AREVA [71], БМРЗ НТЦ «Механотроника» [7], SIPROTEC 4 7SJ61 фирмы SIEMENS [97] и другие.

1.2.2. Защиты, основанные на контроле направления мощности нулевой последовательности в установившемся режиме ОЗЗ

Защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на направление мощности нулевой последовательности в установившемся режиме однофазного замыкания, обычно применяют в тех случаях, когда не удастся обеспечить чувствительность ненаправленных токовых защит. Алгоритм действия направленных защит основывается на учете направления протекания токов нулевой последовательности отходящих присоединений в режиме однофазного замыкания на землю: на неповрежденных присоединениях токи условно направлены к секции шин, а на поврежденном присоединении – от секции шин к месту ОЗЗ. В соответствии с этим и рабочие сигналы направленных защит в виде мощности нулевой последовательности отходящих присоединений, определяемые по токам нулевой последовательности линий и по напряжению нулевой последовательности, также имеют различное направление [3, 9, 77, 80].

Контроль направления мощности нулевой последовательности направленной защиты от ОЗЗ выполняется специальным фазочувствительным органом, осуществляющим сравнение фаз синусоидального сигнала, пропорционального напряжению нулевой последовательности сети U_0 , и синусоидального сигнала, пропорционального току нулевой последовательности отходящего присоединения I_0 . Однако в режиме однофазного замыкания на землю в напряжении и токах нулевой последовательности содержатся высшие гармонические составляющие, что обуславливает применение избирательных фильтров, выделяющих основную гармонику частотой 50 Гц. Также необходимо осуществить сдвиг по фазе на угол 90° для одного из выходных сигналов [9].

Основным преимуществом защиты от однофазных замыканий, реагирующей на направление мощности нулевой последовательности является

отсутствие необходимости отстройки от собственного тока нулевой последовательности защищаемого присоединения, ввиду того, что главной задачей является контроль фазовых соотношений между векторами тока и напряжения нулевой последовательности для неповрежденных и поврежденного присоединения.

Непостоянство гармонического состава напряжения и токов нулевой последовательности при различных режимах ОЗЗ и, как следствие, нестабильность входных параметров защиты по уровню и по форме являются причиной неселективного действия направленной защиты от ОЗЗ.

Направленные защиты от ОЗЗ широко применяются в сетях с изолированной, резистивно-заземленной и компенсированной нейтралью, работающей в режиме недокомпенсации.

Наиболее распространенными в распределительных сетях 6-35 кВ направленными защитами от ОЗЗ являлись ЗЗП-1 и ЗЗП-1М [9, 31]. Однако опыт эксплуатации этих устройств и проведенные исследования свидетельствует о большом количестве ложных срабатываний защиты по причине фазовых искажений соотношений между сигналами напряжения и токов при перемежающихся замыканиях на землю [27, 80].

Одной из наиболее поздних модификаций направленных защит от ОЗЗ является защита типа ЗЗН, предназначенная для селективного выявления поврежденной линии с однофазным замыканием на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной и резистивной нейтралью.

Во многих многофункциональных микропроцессорных терминалах защиты используются не менее двух различных способов выявления поврежденной линии, необходимых для повышения селективности определения поврежденного присоединения. Примером такого устройства является микропроцессорный терминал БМРЗ (НТЦ «Механотроника»), реализующий направленную и ненаправленную защиты от замыканий на землю [7].

Современные устройства направленной защиты от ОЗЗ, выполненные на микропроцессорных терминалах: реле защиты «ЗЕРО», компании «Объединённая

энергия» (г. Москва) [62], устройство Сириус-МЛ фирмы ЗАО «РАДИУС Автоматика» [75], терминал SEPAM S42 фирмы Schneider Electric [26], защиты MiCOM (модели P125, P126, P127) компании AREVA [67], SPAC-810 фирмы «АББ Реле-Чебоксары» [71] и другие.

1.2.3. Защиты, основанные на использовании высших гармоник в токах нулевой последовательности защищаемых линий

При возникновении ОЗЗ на любой линии распределительной сети нарушается симметрия фаз относительно земли, что обуславливает появление в сети напряжения нулевой последовательности несинусоидального характера. По этой причине токи нулевой последовательности всех линий сети содержат высшие гармоники, причем наибольший уровень высших гармонических составляющих на поврежденном присоединении, по которому протекает суммарный ток нулевой последовательности всех линий электрической сети. Уровень гармоник в токах нулевой последовательности неповрежденных линий значительно меньше и определяется емкостью фаз относительно земли этих линий. Дуговой характер однофазного замыкания на землю обуславливает резкое повышение уровня высших гармоник в токах нулевой последовательности всех защищаемых присоединений сети. В сетях с резонансным заземлением нейтрали из-за влияния дугогасящего реактора уровень высших гармоник в суммарном токе нулевой последовательности на поврежденном присоединении дополнительно возрастает, а его состав становится еще более сложным [12, 14, 23].

Основной областью применения устройств защиты от ОЗЗ, реагирующих на высшие гармонические составляющие являются компенсированные сети 6-35 кВ. Это связано с тем, что в сетях с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор уровень высших гармоник в токе нулевой последовательности поврежденного присоединения в режиме однофазного замыкания на землю значительно выше, чем в токах неповрежденных присоединений, что позволяет организовать селективную высокочувствительную защиту от ОЗЗ. В электрических сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью эти защиты

характеризуются низкой селективностью действия вследствие нестабильности и случайного характера гармонического состава напряжения и токов нулевой последовательности линий сети [78]. Кроме того, неселективное действие защит связано с соизмеримостью токов нулевой последовательности отдельных присоединений с суммарным током нулевой последовательности сети.

Принцип защиты от однофазных замыканий на землю, основанный на контроле высших гармоник в токах нулевой последовательности защищаемых присоединений, реализуется на устройствах УСЗ-2/2, УСЗ-3, УСЗ-3М. Однако эксплуатационные данные устройства УСЗ-2/2, основанного на использовании способа измерений абсолютных значений сигналов высших гармонических составляющих свидетельствуют о низкой селективности его действия в режиме ОЗЗ [72, 76]. Устройства УСЗ-3 и УСЗ-3М, основанные на принципе относительного измерения уровня гармоник характеризуются более высокой селективностью действия, в сравнении с УСЗ-2/2.

В настоящее время выпускаются микропроцессорные терминалы защит, использующие принцип контроля высших гармонических составляющих в токах нулевой последовательности, такие как Сириус-Л, выпускаемые ЗАО «РАДИУС Автоматика» [74], терминалы SPAC 801-113, SPAC 810 компании «АББ Реле-Чебоксары» [30].

1.2.4. Защиты, основанные на использовании дополнительных «наложенных» токов

Определение поврежденного присоединения с однофазным замыканием на землю в распределительной сети при использовании этого способа защиты осуществляется путем искусственного создания условий для протекания через точку ОЗЗ дополнительного тока с частотой, отличной от промышленной. Выявляя путь протекания этого тока, который включает в себя линию с ОЗЗ, с помощью специального избирательного модуля защиты определяется поврежденная линия.

Для организации защиты от ОЗЗ могут быть использованы «наложенные» как постоянный, так и переменный ток с частотой выше и ниже промышленной [81]. Использование в качестве рабочего сигнала защиты постоянного тока (в большинстве случаев выпрямленного тока) небольшой величины обуславливает необходимость использования в устройстве защиты высокочувствительного элемента, что создает проблему помехозащищенности. При использовании больших величин постоянного тока ухудшаются условия гашения дуги в точке замыкания, если ОЗЗ носит дуговой характер.

Областью использования защит от ОЗЗ на «наложенном» постоянном токе являются карьерные электрические сети до 1 кВ с изолированной нейтралью. «Наложенный» постоянный ток может быть использован для построения устройств контроля сопротивления изоляции [8, 9].

Известны разработки защит от ОЗЗ с использованием источников «наложенного тока» частотой 100 Гц [73] и 300 Гц [6]. Однако недостатком защит, использующих «наложенный» ток частотой выше промышленной, является низкая селективность действия в распределительных сетях, имеющих в своем составе нелинейную нагрузку, которая обуславливает появление высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности линий в нормальном режиме работы, что является сигналом помехи для защиты от ОЗЗ. Другим недостатком этих защит являются ложные срабатывания при соизмеримости емкостей линий.

В качестве рабочего сигнала защит от ОЗЗ может применяться «наложенный» ток с частотой ниже промышленной. Известна разработка Донецкого политехнического института УСЗК-6,25, где в качестве рабочего сигнала используется ток частотой 6,25 Гц, получаемый в результате амплитудной модуляции тока дугогасящего реактора [9]. Однако устройство УСЗК-6,25 неработоспособно при дуговых ОЗЗ.

Наибольшее распространение в кабельных сетях 6-10 кВ с компенсированной нейтралью получили разработки с применением «наложенного» тока с частотой 25 Гц (устройства типа ЗЗС) [4, 16]. В этом

варианте исполнения защиты от ОЗЗ источником контрольного тока является электромагнитный параметрический делитель частоты. Использование для целей защиты от ОЗЗ токов, частотой 25 Гц и ниже по сравнению с токами частотой, выше промышленной представляется целесообразным в силу ряда факторов: возможность измерений высоких значений сопротивления фазной изоляции, лучшие условия помехозащиты от тока частотой 50 Гц, относительная простота получения [73, 88]. Централизованный поиск присоединения с ОЗЗ путем одновременного анализа токов частотой 25 Гц всех защищаемых линий позволит организовать защиту от ОЗЗ с высокой селективностью действия.

Однако использование защит от ОЗЗ, реагирующих на «наложенный» ток частотой 25 Гц, сопряжено с рядом трудностей, таких как: высокие погрешности измерений датчиков тока нулевой последовательности, вследствие уменьшения рабочей частоты; сложность отстройки от гармонических составляющих при дуговых ОЗЗ вне защищаемой зоны и т.д.

1.2.5. Защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса

Переходные процессы, возникающие при однофазном замыкании фазы электрической сети на землю, протекают вследствие перезаряда емкостей поврежденной и неповрежденных фаз всех линий сети, что обуславливает изменение во времени напряжений и токов нулевой последовательности электрической сети. Переходные процессы при ОЗЗ носят стохастический характер и зависят от ряда факторов: момента возникновения ОЗЗ, величины переходного сопротивления в месте повреждения, электромагнитного состояния сети, предшествующего моменту однофазного замыкания [21, 24, 88].

В неоднородных разветвленных сетях ток переходного процесса в месте ОЗЗ представляет собой результирующий ток в виде суммы переходных токов всех присоединений сети. В неповрежденных присоединениях при однофазном замыкании токи нулевой последовательности в переходном режиме имеют вид быстро затухающих колебаний вблизи шин подстанций. Однако при удалении

места ОЗЗ от секции шин переходный процесс по виду стремится к апериодическому вследствие увеличения активных продольных сопротивлений линий [79]. Продолжительность переходного процесса не превышает 3-5 мс, а частота колебаний тока в переходном режиме в месте однофазного замыкания достигает нескольких кГц [39].

Переходные процессы в компенсированных сетях в условиях замыкания на землю имеют практически такой же характер, как и в сетях с изолированной нейтралью [1, 3].

Одним из признаков возникновения однофазного замыкания на землю в распределительной сети, определяемым по характеру переходного процесса является направление (знак) мгновенной мощности линии. На поврежденном присоединении знак мощности волны, возникшей в месте ОЗЗ и распространяющейся от места замыкания к шинам подстанции - отрицательный. В начале всех неповрежденных линий знак мгновенной мощности, которая направлена от секции шин подстанции в линию является положительным [58].

Данный метод контроля параметров переходного процесса был реализован при разработке направленных импульсных защит от ОЗЗ. Одними из наиболее распространенных защит являлись устройства типа ИЗС (ИЗС-М) и УЗС-01, разработанные ЭНИН [59, 88]. Однако анализ эксплуатационных данных устройств ИЗС выявил низкую селективность их действия по причине неправильной фиксации знака мощности. Это связано с искажением фазовых соотношений между током и напряжением, возникающих в момент однофазного замыкания на землю в отраженной от конца защищаемой линии волне [38].

Направленная волновая защита от однофазных замыканий на землю УЗС-01 представляет собой усовершенствованный аналог устройств направленной импульсной защиты воздушных линий 6-35 кВ типа ИЗС и ИЗС-М. Защита УЗС-01 дополнительно снабжена фильтром, позволяющим ограничить верхние частоты входного сигнала и повысить чувствительность действия защиты [69].

Существуют и другие устройства защит от однофазных замыканий, реагирующие на параметры переходного процесса при ОЗЗ. Однако в отличии от

УСЗ-01 алгоритм их действия основан на определении направления мгновенной мощности нулевой последовательности с отдельной фиксацией начальных знаков тока и напряжения и предусматривающий их последующее логическое сравнение. Специально предусмотренная блокировка модулей памяти позволяет выполнять четкое определение начальных знаков тока и напряжения. Такими устройствами являются устройства КЗЗП Донецкого политехнического института и ПЗЗМ-1, разработанного предприятием «НТБЭ» г. Екатеринбург [16, 17]. К зарубежным устройствам, реализующим указанный принцип контроля направления мгновенной мощности в переходном режиме ОЗЗ, относится устройство типа «TRER» [90].

Существенным недостатком защиты от ОЗЗ, использующих в качестве рабочего сигнала направление мгновенной мощности в переходном процессе однофазного замыкания на землю является большое количество ложных срабатываний при коммутационных процессах, которые также сопровождаются переходными процессами. Ввиду того, что в переходном режиме u и i при коммутациях могут быть схожими с сигналами при ОЗЗ, возникает необходимость в отстройке от обычных коммутационных процессов, что на практике представляется трудновыполнимым.

1.3. Централизованные защиты

В распределительных сетях 6-35 кВ применяются централизованные защиты от однофазных замыканий на землю, принцип действия которых основан на сравнении сигналов, характеризующих появление ОЗЗ в сети, поступающих сразу от нескольких отходящих от секции шин присоединений и выявлении на основании анализа сигналов поврежденной линии. При этом в качестве сигналов, контролируемых для целей защиты, используются средние, действующие и амплитудные значения токов нулевой последовательности: установившихся, высших гармонических составляющих, переходных, «наложенных» с частотой, отличной выше и ниже промышленной. Централизованные защиты в зависимости

от вида используемых составляющих сравниваемых токов применяются в сетях с изолированной, компенсированной и резистивно-заземленной нейтралью.

Селективное действия централизованных защит от ОЗЗ может быть обеспечено при условии количества присоединений, отходящих от секции шин подстанции, не менее трёх при условии отсутствия в сети источников дополнительного «наложенного» тока [9].

В отличие от индивидуальных токовых защит, централизованные защиты от однофазных замыканий на землю, не требуется отстраивать от бросков собственных ёмкостных токов защищаемых присоединений, что позволяет обеспечить высокую чувствительность и селективность их действия. Кроме того, в сравнении с направленными защитами централизованные более просты в наладке и обслуживании, что обуславливает значительно меньшие затраты на монтаж и эксплуатацию.

В распределительных сетях 6-35 кВ централизованные защиты от замыканий на землю, использующие принцип относительного сравнения амплитуд токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в аварийном режиме, реализованы на устройствах «Индикатор-1И» и «Индикатор-2И» [70]. При этом эти устройства, функционирующие в режиме параллельно-дискретного (импульсного) сравнения, определяют амплитуды установившегося и переходного тока нулевой последовательности. Селективное действие защит «Индикатор-1И» и «Индикатор-2И» возможно при условии соотношения минимальной величины тока нулевой последовательности в повреждённой линии и максимальной величине тока нулевой последовательности в неповреждённой линии, которое должно быть больше единицы.

Существуют централизованные защиты, определяющие линию с ОЗЗ по наибольшей амплитуде переходного тока, которая выявляется путём параллельного сравнения амплитуд переходных токов всех отходящих присоединений от секции шин. Отходящая линия с наибольшей амплитудой переходного тока нулевой последовательности фиксируется и запоминается устройством защиты на необходимое время. В случае, если мощность нулевой

последовательности направлена к месту ОЗЗ по присоединению с наибольшей амплитудой переходного тока, на выходе устройства защиты генерируется сигнал на отключение этой линии. Указанный алгоритм действия централизованной защиты реализован в устройстве типа СЗВИ [4, 9].

Широко известен принцип организации централизованной защиты от ОЗЗ на основе относительного замера высших гармоник, возникающих в токах нулевой последовательности отходящих от секции шин присоединений при однофазном замыкании на землю. Высшие гармонические составляющие суммируются в повреждённом присоединении, что позволяет создавать устройства защиты с высокой чувствительностью и селективностью действия [12, 88].

Принцип относительного замера высших гармоник тока нулевой последовательности был реализован на устройствах централизованной защиты от однофазных замыканий типа УСЗ-З и УСЗ-ЗМ [72]. Устройство УСЗ-ЗМ имеет в своем составе фильтр, обеспечивающий высокую степень подавления составляющих тока нулевой последовательности промышленной частоты, что позволяет применять это устройство защиты в компенсированных и сетях изолированной нейтралью.

1.4. Анализ причин неселективного действия защит от однофазных замыканий на землю

Широко применяемые в электротехнических комплексах устройства защиты от ОЗЗ, реагирующие на величину напряжения нулевой последовательности и позволяющие осуществлять лишь неселективную сигнализацию появления на одном из отходящих от секции шин присоединения ОЗЗ, не могут быть признаны удовлетворительными по требованиям эксплуатации. Например, на рисунке 1.1 и рисунке 1.3 представлены данные по количеству однофазных замыканий на землю и времени поиска поврежденного присоединения в распределительных сетях 6-10 кВ электротехнических комплексов, согласно которому время, необходимое выявления поврежденного

присоединения составляло от одного часа до нескольких часов. Кроме того, ввиду длительности существования в сети однофазного замыкания на землю и возникновения коммутационных переходных процессов, связанных с оперативными переключениями отходящих линий 30-35% ОЗЗ перешли в междуфазные короткие замыкания с последующими нарушениями электроснабжения по причине выхода из строя ответственного электрооборудования (рисунок 1.2) [5, 51].

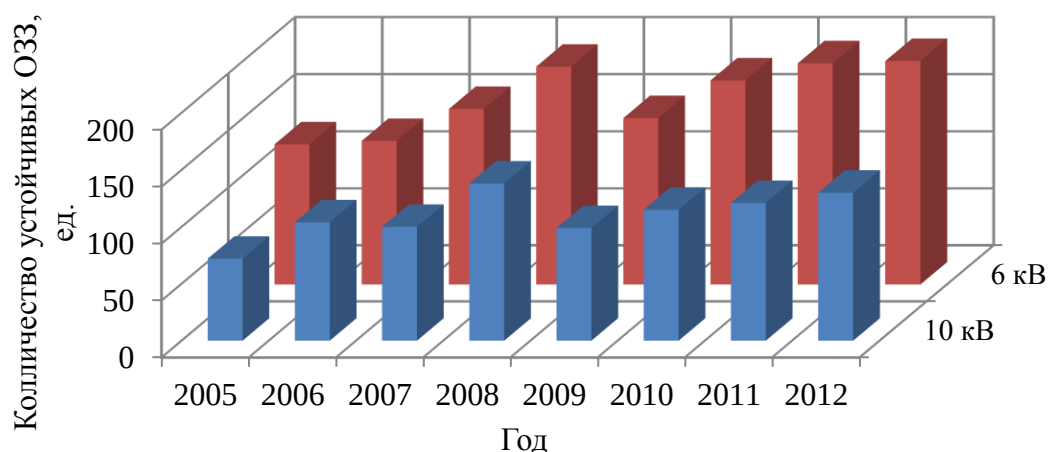


Рисунок 1.1 - Количество однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ за период 2005-2012 гг.

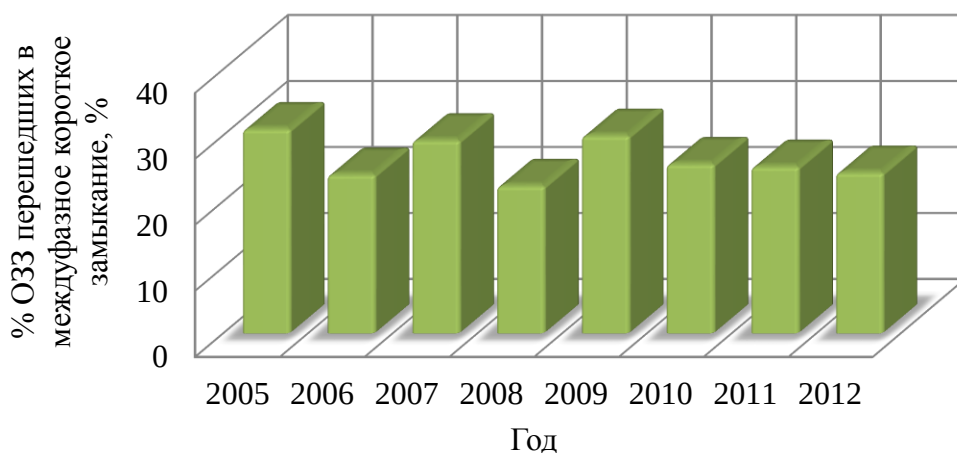


Рисунок 1.2 - Процентное соотношение однофазных замыканий, перешедших в междуфазные короткие замыкания от общего числа ОЗЗ за период 2005-2012 гг.

В распределительных сетях 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью также широко распространены токовые ненаправленные защиты нулевой последовательности, реагирующие на величину тока нулевой последовательности в установившемся режиме ОЗЗ. Однако устойчивость функционирования этих устройств защиты зависит от конфигурации и однородности распределительных сетей, что существенно ограничивает область их применения. Как было отмечено ранее, для обеспечения высокой чувствительности и селективности действия ненаправленных токовых защит в условиях нестационарности и, как следствие, непостоянства параметров и характеристик распределительных сетей 6-35 кВ, необходимо, чтобы суммарный ток однофазного замыкания превышал собственный ток нулевой последовательности любого присоединения сети в 8-10 раз.

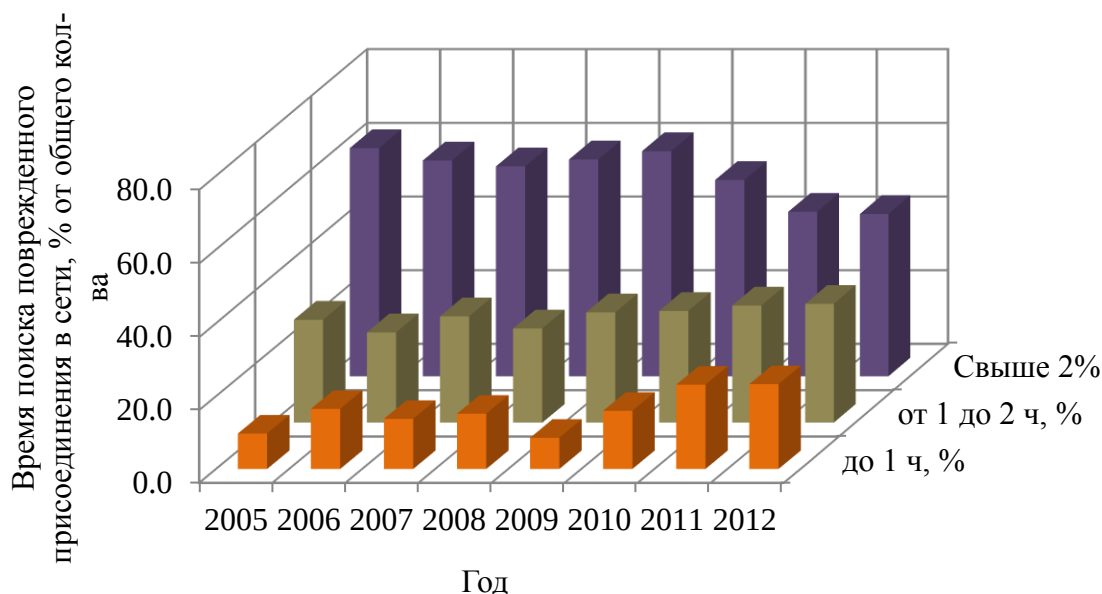


Рисунок 1.3 - Время поиска поврежденного присоединения в сети в процентах от общего количества ОЗЗ за период 2005-2012 гг.

Еще одним существенным недостатком ненаправленных защит от ОЗЗ является потеря устойчивости функционирования при перемежающихся прерывистых замыканиях на землю. Это связано с тем, что при таком режиме ОЗЗ

ток нулевой последовательности носит нестабильный характер и не может быть зафиксирован цепями защиты как сигнал повреждения.

Согласно эксплуатационным данным и проведенным экспериментальным исследованиям было установлено, что основной причиной низкой селективности действия и нарушения устойчивости функционирования защит от ОЗЗ, основанных на контроле величины установившегося тока нулевой последовательности, является неполнота замыкания фазы линии на землю [27, 50, 54-56, 64-66, 83-86]. Режим неполного ОЗЗ сопровождается возникновением в месте замыкания переходного сопротивления, которое как параметр контура нулевой последовательности, понижает значение напряжения нулевой последовательности и, как следствие, сигналов токов нулевой последовательности защищаемых присоединений, контролируемых для целей защиты. Учитывая то, что уставки на срабатывание ненаправленных защит выбраны при условии металлических замыканий (при отсутствии переходного сопротивления в месте ОЗЗ) неполнота замыкания фазы на землю будет являться причиной неработоспособности этих защит в условиях эксплуатации.

Значение переходного сопротивления носит случайный характер и зависит от многих факторов [55, 65, 83]: сопротивления элемента, через который происходит контакт фазы линии с землей (слой снега, льда, упавших листьев и т.д.), сопротивления цепи протекания «обратного» тока однофазного замыкания по земле от точки ОЗЗ до нейтрали сети, полусферы «растекания тока» в месте контакта с землей и т.д. Однако накопленный опыт экспериментальных исследований в этой области позволяет установить возможный диапазон изменения величины переходного сопротивления. Согласно [83] значение переходного сопротивления может достигать 5-7 кОм, в [64] указано, что его значение достигает 5 кОм и более, согласно [94] переходное сопротивление может достигать 10 кОм. В Польше и Канаде значение переходного сопротивления является нормируемой величиной и составляет соответственно 7,5 и 13,5 кОм [95, 96].

Переходное сопротивление является причиной неработоспособности не только ненаправленных токовых защит от ОЗЗ, но и устройств защиты, реагирующих на высшие гармонические составляющие в установившемся токе замыкания на землю. Проведенные исследования по анализу влияния неполноты замыкания фазы на землю на устойчивость функционирования этих защит показали, что при ОЗЗ через переходное сопротивление в несколько Ом уровень высших гармоник резко уменьшается, что снижает селективность и чувствительность действия этих защит [4, 9].

Сравнительно лучшими характеристиками в сравнении с ненаправленными токовыми защитами от ОЗЗ обладают направленные защиты, определяющие направление потока мощности нулевой последовательности в установившемся режиме однофазного замыкания. Однако выполненный анализ эксплуатационных данных устройства защиты ЗЗП-1 свидетельствует о низкой селективности выявления повреждённого присоединения при возникновении неполных ОЗЗ через переходные сопротивления 600-700 Ом при предельной ёмкости распределительной сети в 6,5 мкФ [9]. Кроме того, защиты ЗЗП-1 и ЗЗП-1М характеризуются большим количеством ложных срабатываний в режимах перемежающихся дуговых замыканий на землю.

Устойчивость функционирования защит от ОЗЗ, основанных на определении направления мощности нулевой последовательности в переходном режиме при неполных замыканиях на землю, была исследована путем проведения экспериментальных испытаний устройства защиты типа УСЗ-01 в сети 35 кВ предприятия «Мосэнерго» [36]. В результате испытаний было установлено, что при однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление защита от ОЗЗ не смогла селективно выявить поврежденное присоединение в восьми случаях из восемнадцати и в трех случаях зафиксирован отказ в функционировании [36]. На основании проведенных исследований защиты УСЗ-01 были разработаны рекомендации по уточнению методики выбора уставок на срабатывание с целью повышения чувствительности защиты, согласно которым для срабатывания защиты при однофазном замыкании на землю через переходное

сопротивление в 1 кОм необходимо повысить ее чувствительность в 4 раза по сравнению с металлическим замыканием, а для устойчивого функционирования при ОЗЗ с переходным сопротивлением в 5 кОм - в 10-12 раз [36]. Однако с увеличение чувствительности защиты типа УСЗ-01 серьезно ухудшит ее помехозащищенность, что может повлечь за собой большое количество ложных срабатываний как в нормальном, так и в аварийном режиме.

Устройства защит от ОЗЗ, использующие в качестве рабочего сигнала «наложенный» ток частотой 100 Гц и более, характеризуются низкой селективностью действия в условиях замыкания на землю через переходное сопротивление по причине увеличения доли контролируемого тока, протекающего мимо места замыкания на землю через емкости неповрежденных присоединений сети [77].

Использование в защитах от ОЗЗ тока с частотой 25 Гц и ниже позволило устранить ряд недостатков, присущих защитам от замыканий на землю на «наложенном» токе с частотой выше промышленной, в частности, удалось обеспечить высокую чувствительность действия защиты в условиях неполных замыканий на землю и повысить помехозащищенность измерительных элементов защиты от тока промышленной частоты [8]. Однако указанный вид защит от ОЗЗ не получил широкого распространения в распределительных сетях в виду сложности отстройки от естественных гармонических составляющих в режиме дуговых перемежающихся ОЗЗ, при которых спектральный состав тока определяется параметрами сети, способом заземления нейтрали, местоположением точки ОЗЗ и др. [81, 88].

Устройства централизованной защиты от ОЗЗ, выполненные на относительном сравнении амплитуд или действующих значений токов нулевой последовательности на отходящих от секции шин линий, функционируют не селективно по причине несинхронности или несинфазности контролируемых сигналов [10]. Другим недостатком является ложное действие защиты в нормальном режиме работы электрической сети при появлении на любом из входов измерительного элемента сигналов помехи (токи небаланса).

1.5. Цели и задачи диссертационной работы

Несмотря на многообразие видов защит от однофазных замыканий на землю, применяемых в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной, резистивно-заземленной и компенсированной нейтралью, задача обеспечения селективного и инвариантного действия защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности представляется актуальной. В результате сравнительного анализа различных принципов организации защит от ОЗЗ установлено, что одной из основных причин низкой чувствительности и селективности действия защит является переходное сопротивление в месте замыкания фазы электрической сети на землю, которое, как параметр контура нулевой последовательности, искажает рабочие сигналы защиты и является причиной ее неработоспособности в условиях эксплуатации. Сложность задачи организации селективной защиты от ОЗЗ в условиях вариации неполноты замыкания на землю связана с тем, что величина переходного сопротивления носит стохастический характер и может изменяться в широком диапазоне (от нескольких Ом до десятков кОм). Поэтому возникает необходимость разработки структуры, алгоритмов действия и реализации защиты от однофазных замыканий на землю, позволяющей селективно выявлять поврежденное присоединение в условиях возникновения неполных ОЗЗ и обладающей независимым, т.е. инвариантным действием по отношению к изменяющимся параметрам контура нулевой последовательности.

Целью данной диссертационной работы является повышение селективности и инвариантности действия защиты от однофазных замыканий на землю электротехнических комплексов 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач:

1. Выявить закономерности изменения напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых присоединений в условиях вариации

переходного сопротивления в месте ОЗЗ, позволяющие определить степень неполноты замыкания фазы электрической сети на землю.

2. Установить влияние вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости линий, переходные сопротивления в месте замыкания на землю и параметры системы заземления нейтрали, на эффективность действия защиты от ОЗЗ.

3. Разработать алгоритмы инвариантного действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров, включая сигналы тока нулевой последовательности защищаемых присоединений и уставки на срабатывание.

4. Разработать структуру и реализацию аппаратно-программного комплекса защиты от однофазных замыканий на землю, обеспечивающего селективное выявление поврежденного присоединения в условиях возникновения неполных замыканий на землю и обладающего инвариантностью действия по отношению к изменяющимся параметрам контура нулевой последовательности.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ В УСЛОВИЯХ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

2.1. Зависимости напряжения и токов нулевой последовательности от параметров контура нулевой последовательности

При организации большинства защит от ОЗЗ используются напряжение и токи нулевой последовательности, возникающие в электрической сети при замыкании на землю [4, 9, 77, 88]. Целесообразность использования величин нулевой последовательности для действия защит от ОЗЗ обусловлена тем, что в нормальном режиме работы сети их значения ограничены ГОСТ по качеству электрической энергии [15], а в режиме однофазного замыкания на землю величины нулевой последовательности возрастают, что позволяет обеспечить высокую чувствительность действия защиты [57, 78].

Однако по причине нестабильности характеристик распределительных сетей 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью и непостоянства величины переходного сопротивления в месте повреждения широко применяемые токовые защиты от ОЗЗ характеризуются низкой устойчивостью функционирования в условиях эксплуатации. Поэтому для организации эффективной защиты от однофазных замыканий на землю необходимо учитывать вероятностные значения параметров электрической сети и величин переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

В этой связи, ключевым является вопрос анализа влияния на характеристики срабатывания токовых защит от ОЗЗ вероятностных значений параметров контура нулевой последовательности при различных режимах замыкания на землю.

На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема распределительной сети 6-35 кВ с резистивно-заземленной нейтралью. На рисунке 2.1 обозначены:

- секция шин 6-35 кВ с отходящими линиями;
- трансформатор заземления нейтрали (ТЗН), используемый для подключения заземляющего резистора R_N ;

- выключатели отходящих линий и трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП 1, ТТНП 2, ТТНП k);
- переходное сопротивление в месте замыкания на землю $R_{\text{п}}$;
- блоки защиты от ОЗЗ (БЗ1, БЗ2, БЗk), установленными на каждой линии;
- измерительный трансформатор напряжения (ТН), необходимый для определения линейного напряжения $u_{\text{л}}$ и напряжения нулевой последовательности u_0 .

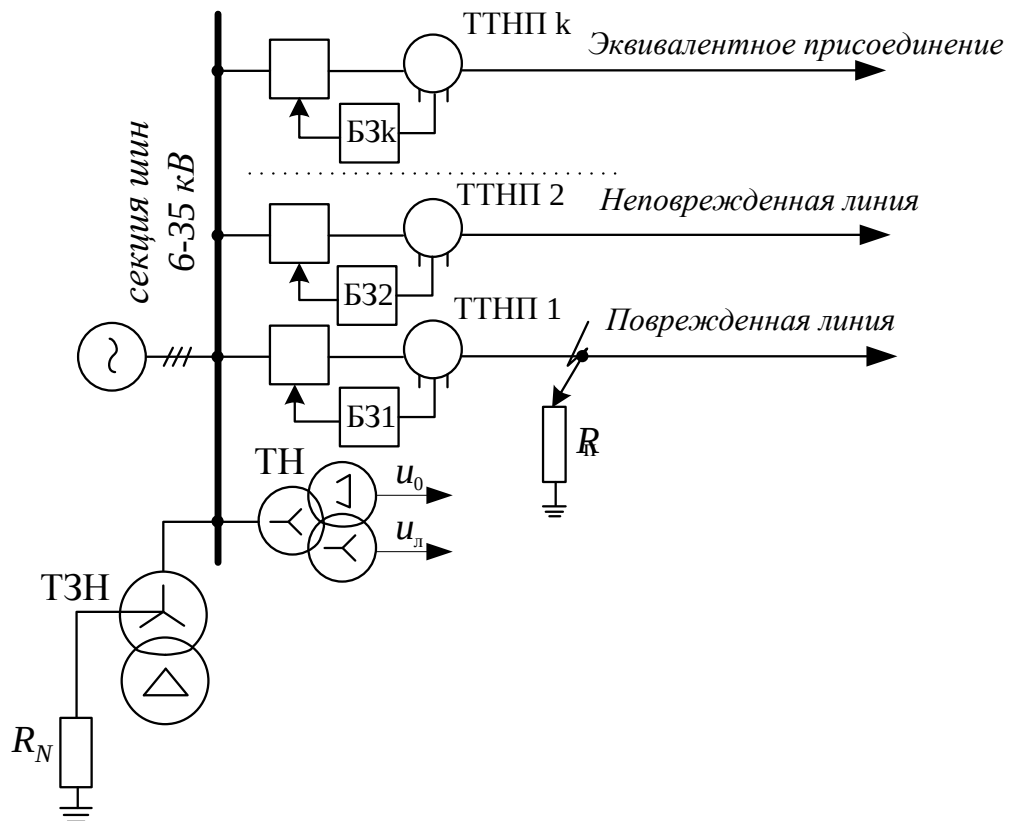


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема распределительной сети 6-35 кВ с резистивно-заземленной нейтралью

Токовые защиты от ОЗЗ (блоки защиты БЗ1, БЗ2 и БЗk), реагируют на ток нулевой последовательности в установившемся режиме замыкания на землю, измеряемый трансформаторами тока нулевой последовательности ТТНП1, ТТНП2 и ТТНПk (рисунок 2.1). Установившийся режим ОЗЗ необходимо рассматривать при следующих допущениях, позволяющих упростить выводы основных соотношений и не влияющих на точность конечных результатов [4, 9, 68, 77, 88]:

- система электродвижущих сил (ЭДС) источника питания симметрична;

- продольные активные и индуктивные сопротивления фаз линий малы и поэтому не учитываются;
- проводимости фаз линий относительно земли приняты в виде сосредоточенных параметров;
- междуфазные емкости не влияют на установившиеся значения величин нулевой последовательности и поэтому не учитываются;
- сопротивления первичной обмотки трансформатора заземления нейтрали (ТЗН) приняты одинаковыми;
- однофазное замыкание на землю происходит через активное переходное сопротивление R_{π} (при металлическом ОЗЗ $R_{\pi}=0$);
- анализ процессов в сети осуществляется путем рассмотрения поврежденной линии и одной из числа неповрежденных линий; вся остальная часть электрически связанной распределительной сети представлена эквивалентным присоединением с активными сопротивлениями и емкостями фаз относительно земли этих линий.

С учетом принятых допущений распределительную сеть, представленную на рисунке 2.1, можно представить эквивалентной расчетной схемой замещения (рисунок 2.2).

Рисунок 2.2 отображает схему распределения токов замыкания на землю фаз линий электрической сети в режиме однофазного замыкания на землю (точка K_1) и содержит следующие обозначения:

$R_{An}, R_{Bn}, R_{Cn}, R_{Aн}, R_{Bн}, R_{Cн}$ - активные сопротивления изоляции фаз относительно земли поврежденной и неповрежденной линии соответственно;

$R_{Aэкв}, R_{Bэкв}, R_{Cэкв}$ - эквивалентные результирующие активные сопротивления изоляции фаз относительно земли остальных неповрежденных линий сети;

$R_{Amp}, R_{Bmp}, R_{Cmp}, X_{Amp}, X_{Bmp}, X_{Cmp}$ - активные и реактивные сопротивления фаз первичной обмотки ТЗН соответственно;

$C_{An}, C_{Bн}, C_{Cн}, C_{Aн}, C_{Bн}, C_{Cн}$ - емкости фаз относительно земли поврежденной и неповрежденной линии соответственно;

$C_{Aэкв}, C_{Bэкв}, C_{Cэкв}$ - эквивалентные результирующие емкости фаз относительно земли остальных неповрежденных линий сети;

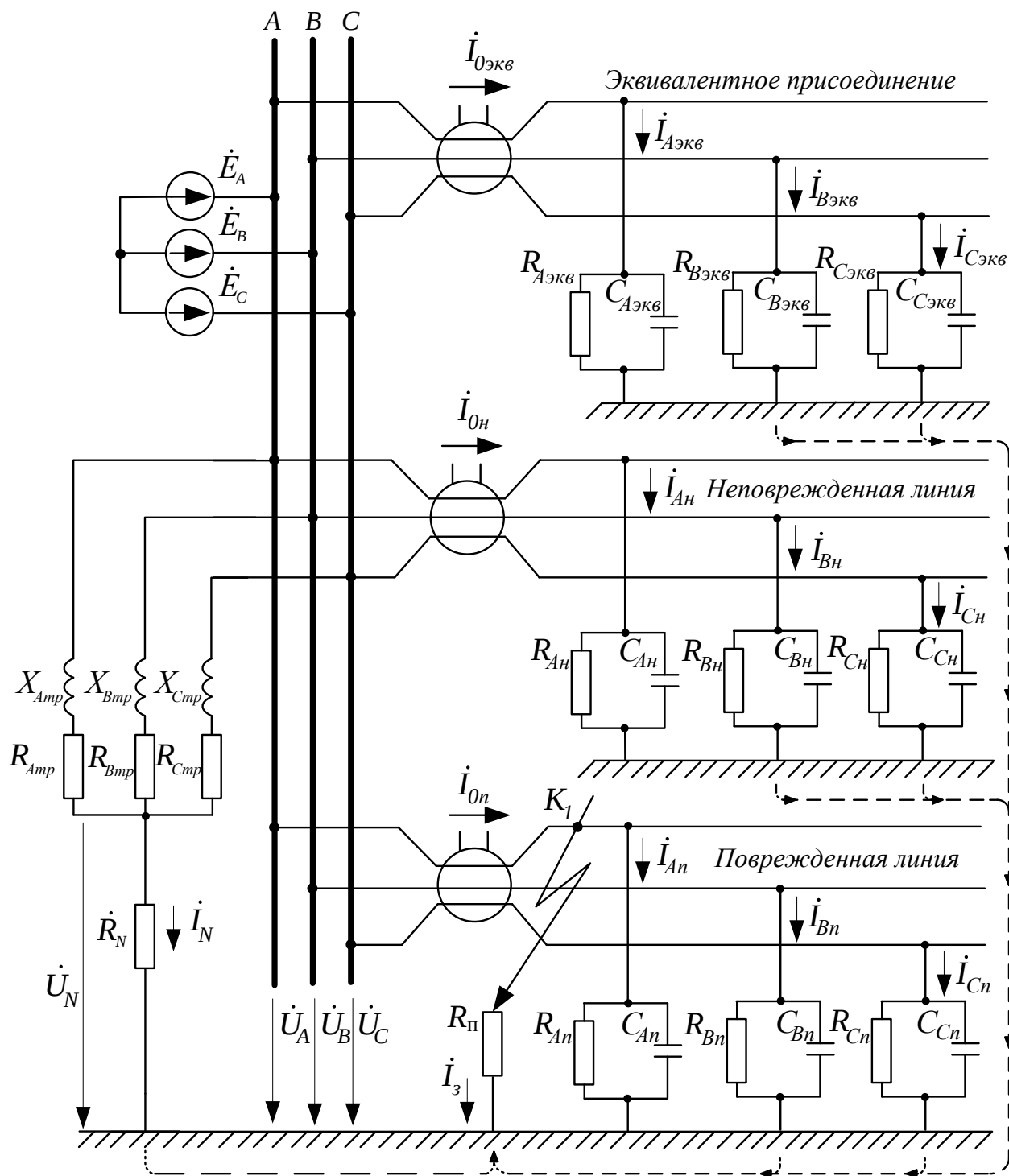


Рисунок 2.2 – Расчетная схема замещения распределительной сети

$I_{An}, I_{Bн}, I_{Cн}, I_{An}, I_{Bн}, I_{Cн}$ - токи замыкания на землю фаз поврежденной и неповрежденной линии соответственно;

$\dot{I}_{A\text{экв}}, \dot{I}_{B\text{экв}}, \dot{I}_{C\text{экв}}$ - эквивалентные результирующие токи замыкания на землю фаз всех неповрежденных линий сети;

$\dot{I}_N$ - активный ток замыкания на землю, обусловленный резистором в нейтрали сети;

$\dot{I}_3$ - ток однофазного замыкания на землю;

$\dot{I}_{0n}, \dot{I}_{0н}$ - токи нулевой последовательности поврежденной и неповрежденной линии соответственно;

$\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ - ЭДС источника питания;

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ - фазные напряжения сети относительно земли;

$\dot{U}_N$ - напряжение на элементе заземления нейтрали (напряжение смещения нейтрали).

Нормальный режим работы электрической сети характеризуется наличием фазных напряжений относительно земли [1, 91]:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= \dot{E}_A + \dot{U}_N; \\ \dot{U}_B &= \dot{E}_B + \dot{U}_N; \\ \dot{U}_C &= \dot{E}_C + \dot{U}_N.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Напряжение на элементе заземления нейтрали в нормальном режиме работы определяется по выражению:

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{E}_A \dot{Y}_{A(p\text{ез})} + \dot{E}_B \dot{Y}_{B(p\text{ез})} + \dot{E}_C \dot{Y}_{C(p\text{ез})}}{\dot{Y}_{A(p\text{ез})} + \dot{Y}_{B(p\text{ез})} + \dot{Y}_{C(p\text{ез})} + \dot{Y}_{N(p\text{ез})}},\tag{2.2}$$

где $\dot{Y}_{A(p\text{ез})}, \dot{Y}_{B(p\text{ез})}, \dot{Y}_{C(p\text{ез})}$ - результирующие комплексные проводимости фаз относительно земли;

$\dot{Y}_{N(рез)}$ - эквивалентная проводимость системы заземления нейтрали.

Для определения результирующих комплексных проводимостей фаз линий сети на землю расчетную схему замещения распределительной сети на рисунке 2.2. необходимо представить в виде рисунка 2.3.

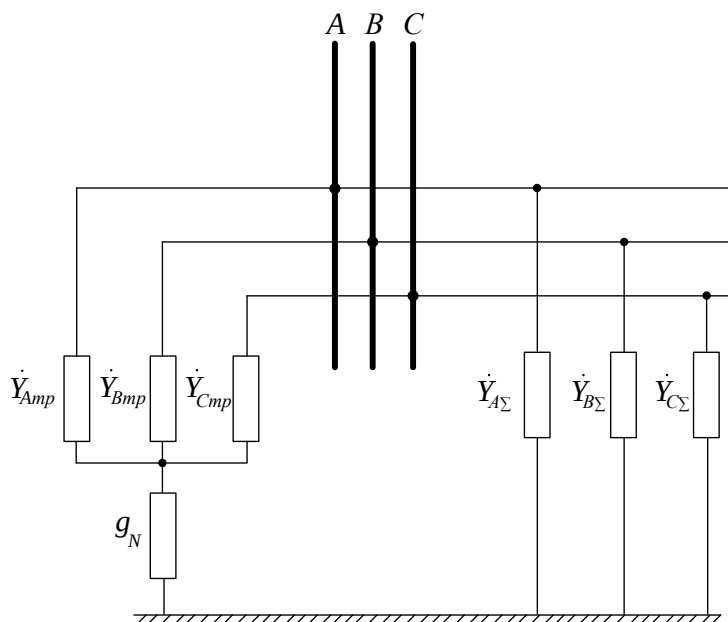


Рисунок 2.3 – Расчетная схема замещения сети для определения результирующих проводимостей фаз линии сети на землю.

На рисунке 2.2 обозначены:

$$\dot{Y}_{Amp} = g_{Amp} - jb_{Amp} = \frac{R_{Amp}}{R_{Amp}^2 + X_{Amp}^2} - j \frac{X_{Amp}}{R_{Amp}^2 + X_{Amp}^2},$$

$$\dot{Y}_{Bmp} = g_{Bmp} - jb_{Bmp} = \frac{R_{Bmp}}{R_{Bmp}^2 + X_{Bmp}^2} - j \frac{X_{Bmp}}{R_{Bmp}^2 + X_{Bmp}^2},$$

$$\dot{Y}_{Cmp} = g_{Cmp} - jb_{Cmp} = \frac{R_{Cmp}}{R_{Cmp}^2 + X_{Cmp}^2} - j \frac{X_{Cmp}}{R_{Cmp}^2 + X_{Cmp}^2} \quad - \quad \text{проводимости фаз}$$

первичной обмотки ТЗН;

$$\dot{Y}_{A\Sigma} = \dot{Y}_{An} + \dot{Y}_{An} + \dot{Y}_{Aэкв},$$

$$\dot{Y}_{B\Sigma} = \dot{Y}_{Bn} + \dot{Y}_{Bn} + \dot{Y}_{Bэкв},$$

$\dot{Y}_{C\Sigma} = \dot{Y}_{Cn} + \dot{Y}_{Cn} + \dot{Y}_{C3\kappa\phi}$ - суммарные проводимости фаз всех линий сети на землю.

Результирующая проводимость системы заземления нейтрали представляет собой суммарную проводимость трех ветвей электрической цепи в виде трех фазных обмоток ТЗН и элемента заземления нейтрали в виде заземляющего резистора и вычисляется при последовательном соединении этих компонентов по выражению [35, 79]:

$$\dot{Y}_{N(pez)} = \frac{g_N \dot{Y}_{\Sigma mp}}{g_N + \dot{Y}_{\Sigma mp}}, \quad (2.3)$$

где $g_N = \frac{1}{R_N}$ - проводимость элемента заземления нейтрали;

$\dot{Y}_{\Sigma mp} = \dot{Y}_{Amp} + \dot{Y}_{Bmp} + \dot{Y}_{Cmp}$ - суммарная проводимость фаз первичной обмотки ТЗН.

Введем следующее обозначение безразмерной комплексной величины [35, 79]:

$$\lambda = \frac{\dot{Y}_{\Sigma mp}}{g_N + \dot{Y}_{\Sigma mp}}. \quad (2.4)$$

С использованием коэффициента λ можно учесть параметры трансформатора заземления.

С учетом выражения (2.4) результирующая проводимость системы заземления нейтрали по (2.3) можно представить в виде:

$$\dot{Y}_{N(pez)} = \lambda g_N. \quad (2.5)$$

Результирующие проводимости фаз линии на землю в сети согласно схеме замещения (рисунок 2.3) будут равны:

$$\dot{Y}_{A(pez)} = \dot{Y}_{A\Sigma} + \lambda_{Amp} g_N,$$

$$Y_{B(pez)} = Y_{B\Sigma} + \lambda_{Bmp} g_N, \quad (2.6)$$

$$Y_{C(pez)} = Y_{C\Sigma} + \lambda_{Cmp} g_N.$$

Согласно выражению (2.2) наличие напряжения смещения нейтрали в нормальном режиме работы сети обусловлено несимметрией проводимостей фаз линий относительно земли и несимметрией фазных ЭДС источника питания, при этом значение напряжения смещения нейтрали зависит от способа заземления нейтрали: изолированная - $Y_{N(pez)} = 0$, резистивно-заземленная - $Y_{N(pez)} \neq 0$. В нормальном режиме работы симметричной трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью напряжение смещения нейтрали равно нулю.

При возникновении в распределительной сети однофазного замыкания на землю через некоторую величину переходного сопротивления R_n (рисунок 2.2, т. K_1) напряжение на элементе заземления нейтрали, определяемое по выражению (2.2) примет вид:

$$U_N = - \frac{E_A (Y_{A(pez)} + g_n) + E_B Y_{B(pez)} + E_C Y_{C(pez)}}{Y_{A(pez)} + Y_{B(pez)} + Y_{C(pez)} + Y_{N(pez)} + g_n}, \quad (2.7)$$

где $g_n = \frac{1}{R_n}$ - проводимость в месте ОЗЗ.

Учитывая, что система ЭДС источника питания симметрична и приняв симметричными результирующие проводимости фаз линий на землю $Y_{A(pez)} = Y_{B(pez)} = Y_{C(pez)}$ с учетом формул (2.5) и (2.7) напряжение смещение нейтрали определяется по выражению:

$$U_N = - \frac{E_A \cdot g_n}{Y_\Sigma + g_n + \lambda g_N}, \quad (2.8)$$

где $Y_\Sigma = Y_{A(pez)} + Y_{B(pez)} + Y_{C(pez)}$ - суммарная проводимость распределительной сети.

Напряжения фаз относительно земли в режиме однофазного замыкания на землю с учетом выражений (2.1) и (2.8) определяются по выражениям:

$$\begin{aligned}
U_A^{(1)} &= \dot{E}_A + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_A \cdot (\dot{Y}_\Sigma + \lambda g_N)}{\dot{Y}_\Sigma + g_n + \lambda g_N}, \\
U_B^{(1)} &= \dot{E}_B + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_B \cdot (\dot{Y}_\Sigma + \lambda g_N) - \dot{E}_A g_n}{\dot{Y}_\Sigma + g_n + \lambda g_N}, \\
U_C^{(1)} &= \dot{E}_C + \dot{U}_N = \frac{\dot{E}_C \cdot (\dot{Y}_\Sigma + \lambda g_N) - \dot{E}_A g_n}{\dot{Y}_\Sigma + g_n + \lambda g_N}.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

В частном случае в сети с изолированной нейтралью ($\lambda g_N = 0$) при металлическом замыкании на землю ($g_n = \infty$), фазные напряжения относительно земли:

$$\begin{aligned}
U_A^{(1)} &= 0, \\
U_B^{(1)} &= \dot{E}_B - \dot{E}_A = \dot{E}_{BA} = \dot{U}_{BA}, \\
U_C^{(1)} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{E}_{CA} = \dot{U}_{CA}.
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Согласно выражениям (2.10) в режиме устойчивого металлического ОЗЗ напряжение поврежденной фазы уменьшится до нуля, а напряжения двух других неповрежденных фаз увеличатся до значений междуфазных напряжений, что соответствует общепринятым понятиям о характере изменения напряжений фаз сети относительно земли при однофазном замыкании на землю.

Напряжение нулевой последовательности определяется как сумма напряжений трех фаз относительно земли и с учетом выражения (2.10) равно:

$$3\dot{U}_0 = \dot{U}_A^{(1)} + \dot{U}_B^{(1)} + \dot{U}_C^{(1)} = -3\dot{E}_A = 3\dot{U}_N. \tag{2.11}$$

Рабочими сигналами токовых защит от ОЗЗ, позволяющими селективно выявлять поврежденную линию в распределительной сети являются токи нулевой последовательности $\dot{I}_{0H}$ и $\dot{I}_{0n}$.

Согласно рисунку 2.2 ток нулевой последовательности $\dot{I}_{0н}$, протекающий по неповрежденной линии распределительной сети в режиме однофазного замыкания на землю, с учетом (2.11) определяется по выражению:

$$\dot{I}_{0н} = \dot{I}_{Bн} + \dot{I}_{Cн} = (3g_n + j\omega 3C_n) \cdot \dot{E}_A = (3g_n + j\omega 3C_n) \cdot \dot{U}_0 = \dot{I}_{л.с.}, \quad (2.12)$$

где $3g_n = \frac{3}{R_{An}}$ - активная проводимость фаз относительно земли неповрежденной линии;

ω - круговая частота.

Из выражения (2.12) следует, что ток нулевой последовательности любой неповрежденной линии распределительной сети зависит от активных и емкостных проводимостей фаз этой линии относительно земли и напряжения нулевой последовательности сети (напряжения смещения нейтрали).

Ток нулевой последовательности $\dot{I}_{0н}$, протекающий по поврежденной линии распределительной сети в режиме однофазного замыкания на землю, согласно рисунку 2.2, определяется по выражению:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0н} &= -(\dot{I}_{Bн} + \dot{I}_{Cн} + \dot{I}_{Bн} + \dot{I}_{Cн} + \dot{I}_{BэКВ} + \dot{I}_{CэКВ}) + \dot{I}_{Bн} + \dot{I}_{Cн} - \dot{I}_N = \\ &= -((3g_n + j\omega 3C_n) \cdot \dot{U}_0 + (3g_n + j\omega 3C_n) \cdot \dot{U}_0 + (3g_{эКВ} + j\omega 3C_{эКВ}) \cdot \dot{U}_0) + \\ &+ (3g_n + j\omega 3C_n) \cdot \dot{U}_0 - \dot{U}_0 \lambda g_N = -(\dot{I}_{0н} + \dot{I}_{0н} + \dot{I}_{0эКВ}) + \dot{I}_{0н} - \dot{I}_N = \\ &= -\dot{I}_{0\Sigma} + \dot{I}_{0н} - \dot{I}_N \end{aligned}, \quad (2.13)$$

где $3g_{эКВ}$ - активная проводимость фаз относительно земли эквивалентного присоединения сети;

$3g_n = \frac{3}{R_{An}}$ - активная проводимость фаз относительно земли поврежденной линии.

$\dot{I}_{0\Sigma} = \dot{I}_{0н} + \dot{I}_{0н} + \dot{I}_{0эКВ}$ - суммарный ток нулевой последовательности всей электрически связанной сети.

Согласно формуле (2.13) ток нулевой последовательности, протекающий по поврежденному присоединению в режиме ОЗЗ зависит от суммарного тока нулевой последовательности всей электрически связанной сети $\dot{I}_{0\Sigma}$, обусловленного активными и емкостными проводимостями фаз линий относительно земли и активного тока замыкания на землю, создаваемого заземляющим резистором в цепи нейтрали сети $\dot{I}_N$ за вычетом собственного тока нулевой последовательности поврежденной линии $\dot{I}_{0n}$.

Для определения тока замыкания на землю распределительной сети в точке K_1 с учетом принятых ранее допущений симметричную трехфазную электрическую сеть можно представить в виде расчетной однофазной схемы замещения (рисунок 2.4).

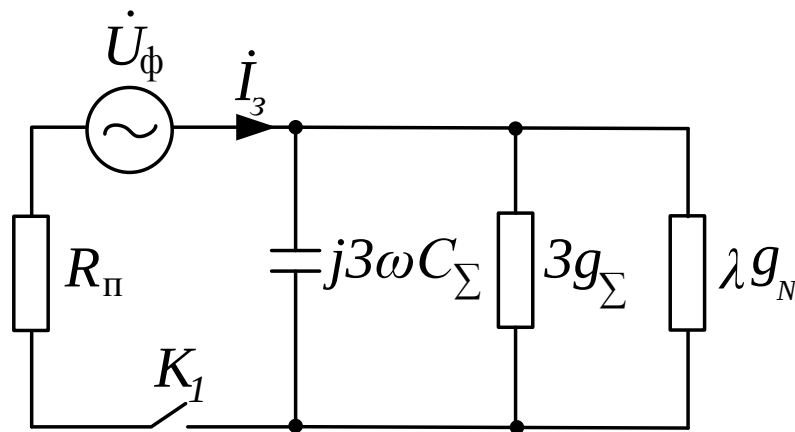


Рисунок 2.4 – Расчетная однофазная схема замещения распределительной сети.

где $3g_\Sigma = \frac{3}{R_\Sigma}$ - суммарная активная проводимость фаз линий относительно земли всей электрически связанной сети;

$C_\Sigma = C_n + C_n + C_{\text{экр}}$ - суммарная емкость фаз линий относительно земли всей сети.

Под фазным напряжением $\dot{U}_\phi$ понимается напряжение поврежденной фазы относительно земли в момент, предшествующий возникновению повреждения.

Согласно рисунку 2.4 ток однофазного замыкания на землю определяется по выражению:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_\phi}{R_n + \frac{1}{3g_\Sigma + \lambda g_N + j3\omega C_\Sigma}}. \quad (2.14)$$

Используя в качестве базисной величины суммарную емкостную проводимость сети $3\omega C_\Sigma$, выражение (2.14) примет вид:

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_\phi j3\omega C_\Sigma (tg\delta + \lambda d_N + j)}{R_n 3\omega C_\Sigma (tg\delta + \lambda d_N + j) + 1}, \quad (2.15)$$

где $tg\delta = \frac{3g_\Sigma}{3\omega C_\Sigma}$ - тангенс угла диэлектрических потерь, характеризующий соотношение между активной проводимостью изоляции фаз сети и емкостной;

$d_N = \frac{g_N}{3\omega C_\Sigma}$ - коэффициент, учитывающий выбор величины сопротивления заземляющего резистора по отношению к емкостному сопротивлению сети. Для коэффициента d_N также справедливо $d_N = \frac{I_N}{I_{C\Sigma}}$, т.е. он позволяет устанавливать соотношение между активным током заземляющего резистора I_N и емкостным током сети $I_{C\Sigma}$.

Напряжение нулевой последовательности, определяемое по выражению (2.8) с учетом принятой базисной величины и полученных коэффициентов:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_\phi}{tg\delta R_n 3\omega C_\Sigma + \lambda d_N R_n 3\omega C_\Sigma + 1 + jR_n 3\omega C_\Sigma}. \quad (2.16)$$

Таким образом, установлены зависимости тока замыкания на землю и напряжения нулевой последовательности в режиме однофазного замыкания на землю виде выражений (2.15) и (2.16) от параметров контура нулевой последовательности, включая проводимости фаз линий на землю, переходное сопротивление в месте повреждения и параметров системы заземления нейтрали,

учитывающих влияние параметров нейтралеобразующего трансформатора и элемента заземления нейтрали.

2.2. Диапазоны вариации параметров контура нулевой последовательности

Для определения влияния параметров контура нулевой последовательности на рабочие сигналы токовых защит от ОЗЗ, применяемых в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью необходимо установить диапазоны их вариации.

Согласно [60, 61] максимальная емкость фаз сети относительно земли может достигать в сетях напряжением 6 кВ – 9,2 мкФ, в сетях напряжением 10 кВ – 3,7 мкФ, в сетях напряжением 35 кВ – 0,5 мкФ, исходя из условия наибольшего значения тока металлического замыкания на землю, при котором допускается работа электрической сети без компенсации тока замыкания на землю. На основе этих ограничений, для общего случая диапазон вариации суммарной емкости фаз сети относительно земли составляет $0,01 \leq C_{\Sigma} \leq 9,2$ мкФ [10, 13].

Для учета активных проводимостей фаз линий сети относительно земли используется тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ [13]. На основе экспериментальных исследований, проведенных в распределительных сетях 6-35 кВ горных предприятий, установлено, что тангенс угла диэлектрических потерь сети изменяется в широких пределах от 0,02 до 3,5 [10]. Увеличение $tg\delta$ связано с увлажнением изоляции линий, особенно в осенне-весенний периоды года. Полученные данные являются вполне адекватными ввиду того, что отношение сухоразрядного сопротивления к мокроразрядному составляет примерно 250 для изоляторов воздушных линий электропередачи [1]. Таким образом, в дальнейших исследованиях диапазон вариации коэффициента демпфирования сети примем $0,02 \leq tg\delta \leq 3,5$.

Влияние параметров системы заземления нейтрали на величины нулевой последовательности определяется с помощью двух компонентов: коэффициента

d_N , характеризующего режим работы нейтрали и безразмерного комплексного показателя λ , учитывающего параметры трансформатора заземления нейтрали.

На рисунке 2.5 представлены схемы подключения заземляющего резистора в нейтраль электрической сети [29, 35, 63]. При отсутствии выведенной нейтрали на силовом трансформаторе возникает необходимость искусственного создания нейтральной точки распределительной сети для подключения заземляющего резистора. В качестве трансформаторов заземления нейтрали (нейтралеобразующих) используются обычные силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток звезда с нулевым проводом – треугольник (рисунок 2.5 б), а также фильтры присоединений (ФМЗО), имеющие только одну первичную обмотку, соединенную в зигзаг (рисунок 2.5 в).

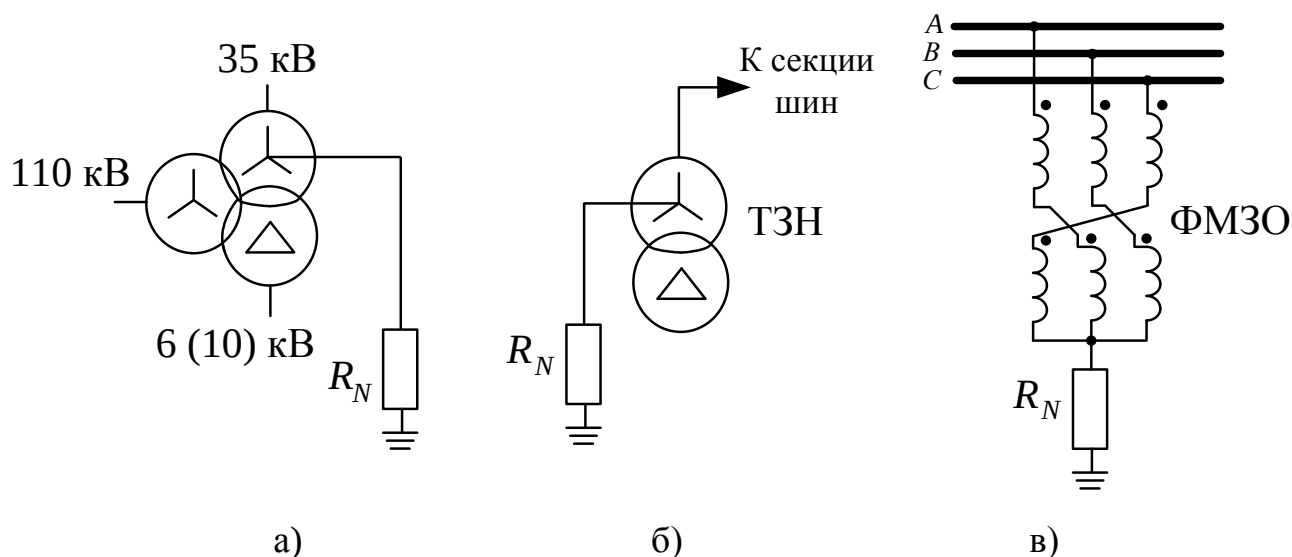


Рисунок 2.5 – Схемы подключения заземляющего резистора в нейтраль сети:

- а) – с помощью выведенной нейтрали силового трансформатора со схемой соединения обмоток Y_0/Y_0 ;
- б) - с помощью трансформатора со схемой соединения обмоток Y_0/Δ ;
- в) – с помощью ФМЗО.

Расчетные параметры трансформаторов заземления нейтрали представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Расчетные параметры трансформаторов заземления нейтрали

Тип трансформатора	$I_{ном}$, А	U_K , %	$P_{кз}$, кВт	P_{xx} , кВт	I_{xx} , %	R_m , Ом	X_m , Ом	$Y_{\Sigma mp}$, См
ТМ-250/6	24	4,5	3,7	0,65	1,2	2,13	6,5	0,146
ТМ-400/6	38,5	4,5	5,5	0,81	1,1	1,23	4,1	0,234
ТМ-250/10	14,5	4,5	3,7	0,65	1,2	5,92	18,1	0,052
ФМЗО-200/11	25,2	4,2	3	0,25	1,8	4,72	18,3	0,053

С учетом таблицы 2.1 безразмерный комплексный показатель λ , приняв R_N в диапазоне 500-2000 Ом (высокоомное заземление нейтрали) [19, 78, 87], определяемый по выражению (2.4):

- для ТМ-250/6:

$$\lambda_{(R_N=500)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,146}{0,002 + 0,146} = 0,986,$$

$$\lambda_{(R_N=2000)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,146}{0,0005 + 0,146} = 0,996.$$

- для ТМ-400/6:

$$\lambda_{(R_N=500)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,234}{0,002 + 0,234} = 0,99,$$

$$\lambda_{(R_N=2000)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,234}{0,0005 + 0,234} = 0,99.$$

- ФМЗО-200/11:

$$\lambda_{(R_N=500)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,053}{0,002 + 0,053} = 0,96,$$

$$\lambda_{(R_N=2000)} = \frac{Y_{\Sigma mp}}{g_N + Y_{\Sigma mp}} = \frac{0,027}{0,0005 + 0,027} = 0,98.$$

На основе полученных выражений установлено, что значение безразмерного комплексного показателя λ находится в пределах 0,96-0,99.

Коэффициент d_N позволяет моделировать режим заземления нейтрали, а также условие выбора доли активного тока замыкания на землю по отношению к емкостному току сети. Например, в сети с изолированной нейтралью $d_N = 0$, в резистивно-заземленной сети при выборе значения сопротивления резистора в нейтрали исходя из условия равенства суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ активному току, создаваемому элементом заземления нейтрали I_N коэффициент $d_N = 1$. В ряде работ для обеспечения надежного функционирования защит от ОЗЗ рекомендовано выбирать величину сопротивления резистора в нейтрали исходя из условия $I_N = (2 - 4) \cdot I_{C\Sigma}$ [19, 63, 87], т.е. относительная проводимость элемента заземления нейтрали составит $d_N = 2$ и $d_N = 4$ соответственно.

Значение переходного сопротивления в месте замыкания на землю, как было отмечено в главе 1, носит вероятностный характер и может изменяться в пределах от единиц Ом до нескольких кОм. На рисунке 2.6 приведены экспериментальные данные, характеризующие взаимосвязь количества ОЗЗ и величины переходного сопротивления в месте повреждения в условиях грунта с высоким удельным сопротивлением (Карелия) [91]. Из рисунка 2.6 видно, что наибольшее количество ОЗЗ происходит через переходное сопротивление, значение которого находится в пределах $1 \leq R_{\Pi} \leq 7000$ Ом.

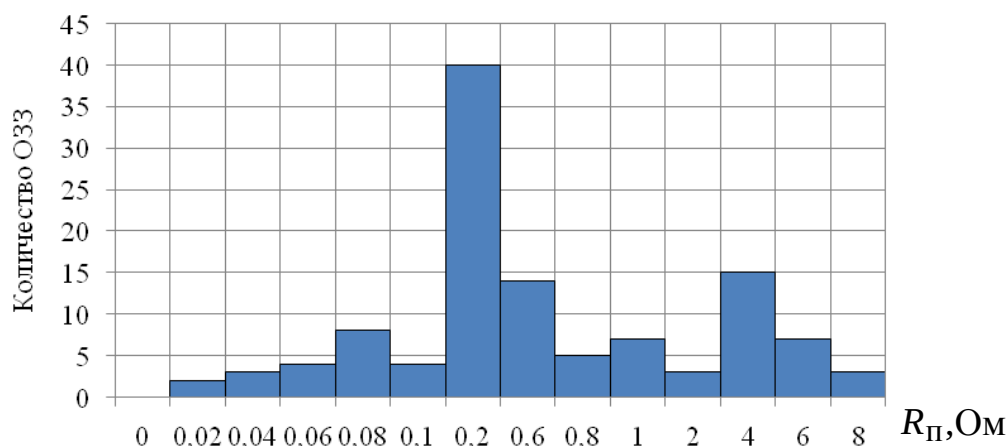


Рисунок 2.6 – Взаимосвязь количества ОЗЗ и величины переходного сопротивления в месте повреждения в электрической сети 10 кВ.

Схожие результаты по исследованию вероятностных значений переходного сопротивления в месте повреждения получены в [83], где отмечено, что величина переходного сопротивления может достигать 5-7 кОм. В [89] указано, что его значение достигает 5 кОм и более. Поэтому представляется целесообразным выбрать диапазон вариации переходного сопротивления в месте ОЗЗ $1 \leq R_n \leq 7000 \text{ Ом}$.

Приняв за базисную величину предельное значение из выбранных диапазонов вариации суммарной емкости сети, тангенса угла диэлектрических потерь, переходного сопротивления получим $0,001 \leq C_\Sigma^* \leq 1$, $0,006 \leq tg\delta^* \leq 1$, $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$ соответственно.

Для определения влияния параметров контура нулевой последовательности на ток замыкания на землю, напряжение нулевой последовательности и напряжения неповрежденных фаз сети преобразуем выражения (2.9), (2.15) и (2.16) к следующему виду:

- ток замыкания на землю:

$$I_3 = \frac{U_\phi 3\omega C_\Sigma \sqrt{tg^2 \delta + \lambda^2 d_N^2 + 1}}{\sqrt{(tg\delta R_n 3\omega C_\Sigma + \lambda d_N R_n 3\omega C_\Sigma + 1)^2 + (R_n 3\omega C_\Sigma)^2}}. \quad (2.17)$$

- напряжение нулевой последовательности сети:

$$U_0 = \frac{E_\phi}{\sqrt{(tg\delta R_n 3\omega C_\Sigma + \lambda d_N R_n 3\omega C_\Sigma + 1)^2 + (R_n 3\omega C_\Sigma)^2}}. \quad (2.18)$$

- напряжения неповрежденных фаз сети:

$$U_C^{(1)} = E_\phi \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{tg\delta R_n 3\omega C_\phi + \lambda d_N R_n 3\omega C_\phi + 1}{(tg\delta R_n 3\omega C_\phi + \lambda d_N R_n 3\omega C_\phi + 1)^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{tg\delta R_n 3\omega C_\phi}{(tg\delta R_n 3\omega C_\phi + \lambda d_N R_n 3\omega C_\phi + 1)^2 + R_n 3\omega C_\phi}\right)^2}. \quad (2.19)$$

$$U_B^{(1)} = E_\phi \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \frac{tg\delta R_n 3\omega C_\phi + d_N R_n 3\omega C_\phi + 1}{(tg\delta R_n 3\omega C_\phi + \lambda d_N R_n 3\omega C_\phi + 1)^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{tg\delta R_n 3\omega C_\phi}{(tg\delta R_n 3\omega C_\phi + \lambda d_N R_n 3\omega C_\phi + 1)^2 + R_n 3\omega C_\phi}\right)^2}.$$

На рисунке 2.7 представлены зависимости напряжения нулевой последовательности сети и напряжений неповрежденных фаз от переходного сопротивления в месте ОЗЗ при различном значении коэффициента d_N .

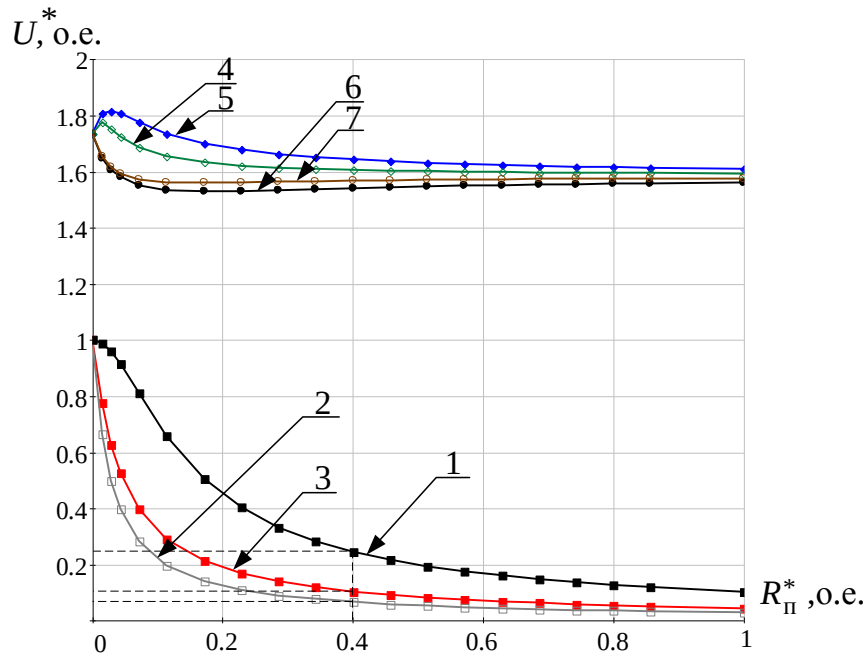


Рисунок 2.7 – Зависимости напряжения нулевой последовательности и напряжений неповрежденных фаз при ОЗЗ через переходное сопротивление в сети с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью при различной величине сопротивления резистора в цепи нейтрали:

1, 2, 3 – напряжение нулевой последовательности сети; 4, 5 – напряжение на фазе С; 6, 7 – напряжение на фазе В; 1- в сети с изолированной нейтралью; 3, 5, 7 – построены при $d_N = 1$; 2, 4, 6 – построены при $d_N = 2$.

Из рисунка 2.7 видно, что в режиме металлического однофазного замыкания на землю (фаза А) напряжения неповрежденных фаз равны линейным значениям и по мере увеличения переходного сопротивления в месте ОЗЗ снижаются. Напряжение нулевой последовательности сети с увеличением переходного

сопротивления также снижается, а его значение при одной и той же величине переходного сопротивления в месте ОЗЗ в сети с резистивно-заземленной нейтралью будет меньше по сравнению с сетью с изолированной нейтралью. Например, при замыкании на землю через переходное сопротивление $R_n^* = 0,4$ значение напряжения нулевой последовательности в сети с изолированной нейтралью составит 0,25, при $d_N = 1$ - 0,1, при $d_N = 2$ - 0,08 по отношению к своему значению в режиме металлического ОЗЗ.

На основе выражения (2.17) построены зависимости тока замыкания на землю от величины переходного сопротивления при различном выборе величины резистора в нейтрали сети (рисунок 2.8). Из рисунка 2.8 следует, что с увеличением переходного сопротивления в месте ОЗЗ ток замыкания на землю снижается и, следовательно, снижаются и величины сигналов токов нулевой последовательности, контролируемые цепями защиты от ОЗЗ в поврежденной и неповрежденных линиях, что является причиной низкой селективности ее действия в таких условиях. Переход от режима изолированной нейтрали к режиму заземления через резистор позволит повысить значение тока замыкания на землю за счет активной составляющей, обусловленной элементом заземления нейтрали. Например, при металлическом замыкании на землю ($R_n^* \approx 0$) ток замыкания на землю при выборе резистора в нейтрали из условия $d_N = 1$ увеличится в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с режимом изолированной нейтрали, при $d_N = 2$ - в $\sqrt{5}$ раз.

Из рисунка 2.9, где представлены зависимости тока нулевой последовательности от угла диэлектрических потерь при различном переходном сопротивлении в месте повреждения, следует, что в режиме металлического ОЗЗ повышение $tg\delta^*$ приводит к пропорциональному увеличению тока замыкания на землю. Однако с увеличением переходного сопротивления в месте ОЗЗ повышение $tg\delta^*$ не влияет на значение тока замыкания на землю.

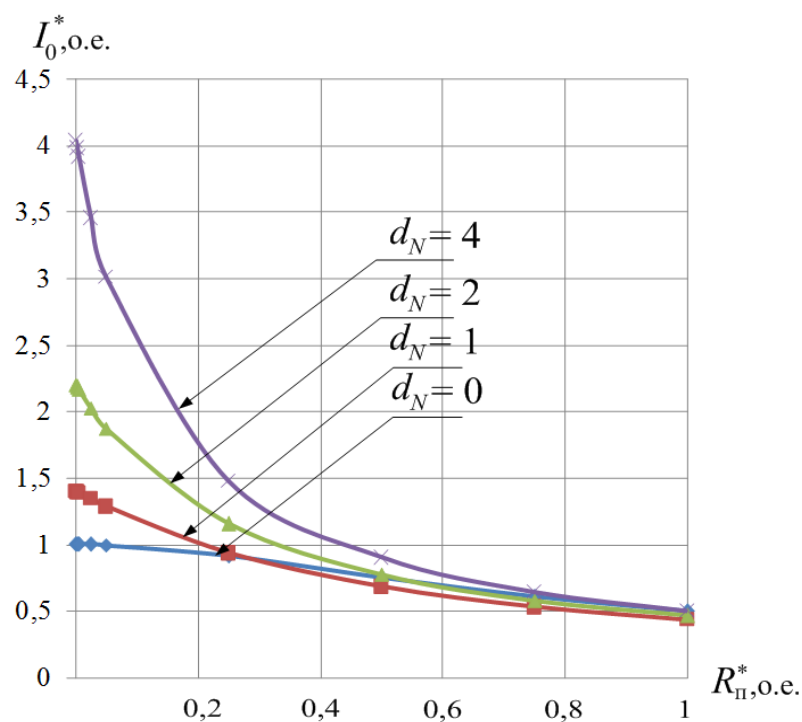


Рисунок 2.8 – Зависимости тока замыкания на землю от величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ при различной относительной проводимости цепи нейтрали

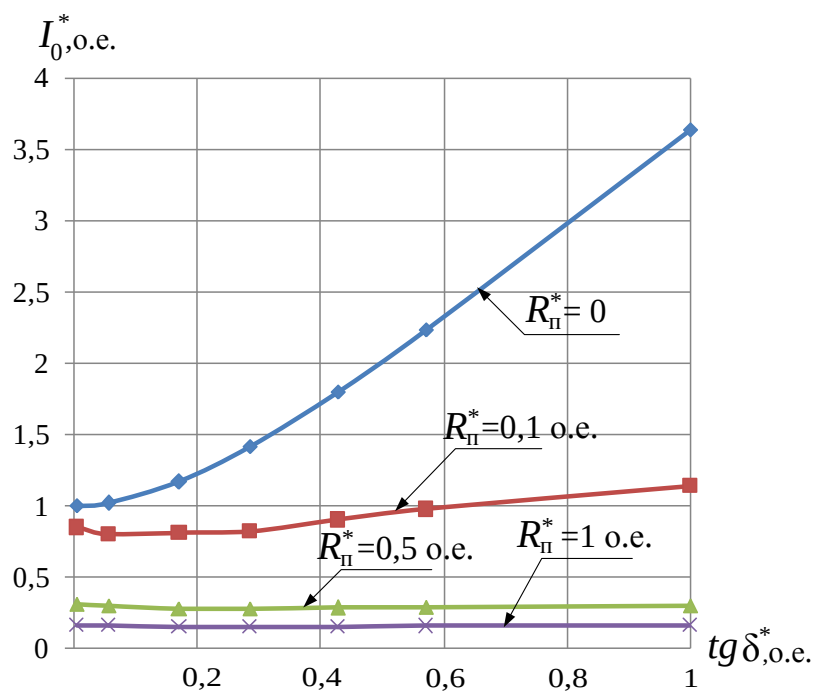


Рисунок 2.9 – Зависимости тока нулевой последовательности от угла диэлектрических потерь при различном переходном сопротивлении в месте повреждения

Степень снижения величин нулевой последовательности в условиях возникновения в электрической сети ОЗЗ через переходное сопротивление по сравнению с их значениями в режиме металлического замыкания характеризует коэффициент неполноты замыкания на землю [46, 52, 66, 92, 93], который с учетом выражений (2.17) и (2.18) определяется по выражению:

$$n = \frac{1}{\sqrt{(tg\delta R_n 3\omega C_\Sigma + \lambda d_N R_n 3\omega C_\Sigma + 1)^2 + (R_n 3\omega C_\Sigma)^2}}. \quad (2.20)$$

На основании (2.20), приняв $tg\delta^* = 0,006$ (нормальное состояние изоляции), получены зависимости коэффициента неполноты замыкания на землю от величины переходного сопротивления в месте повреждения и суммарной емкости для сети с изолированной нейтралью (рисунок 2.10).

Из рисунка 2.10 и выражения (2.20) следует, что значение коэффициента неполноты замыкания изменяется в пределах $0 \leq n \leq 1$ и при увеличении переходного сопротивления в месте ОЗЗ будет снижаться.

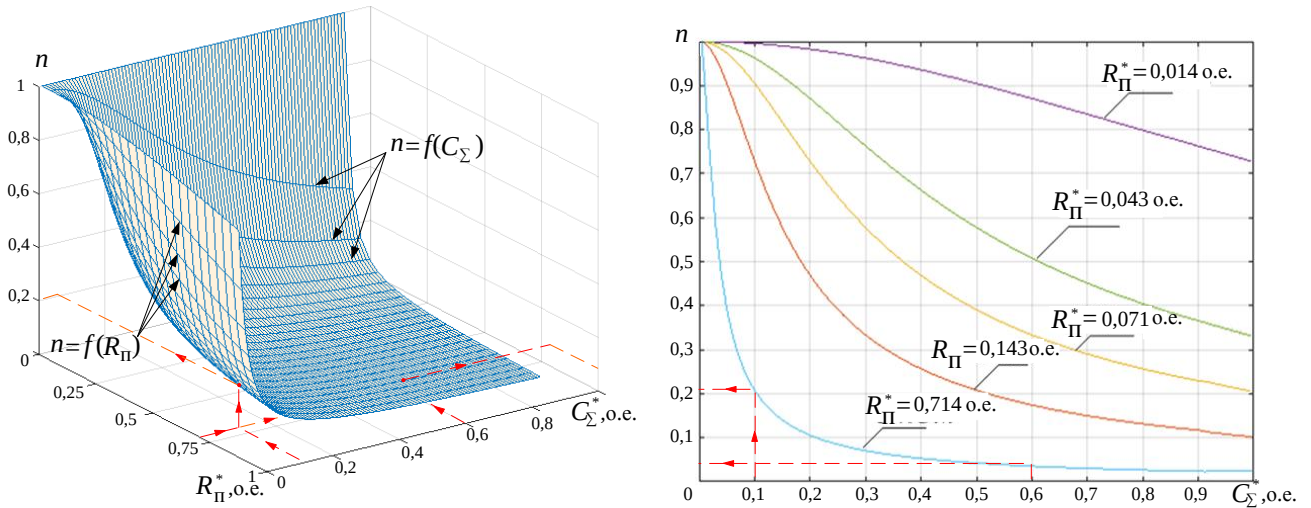


Рисунок 2.10 – Зависимости коэффициента неполноты замыкания на землю от переходного сопротивления в месте ОЗЗ и суммарной емкости сети с изолированной нейтралью ($d_N = 0$).

Кроме того, с увеличением параметров контура нулевой последовательности, включая суммарную емкость сети, тангенс угла

диэлектрических потерь, переходное сопротивление и коэффициент d_N градиент снижения коэффициента неполноты замыкания имеет наибольшее значение. Например, при $R_n^* = 0,714$ и $C_\Sigma^* = 0,1$ значение коэффициента неполноты составит 0,21, а при $R_n^* = 0,714$ и $C_\Sigma^* = 0,6$ - 0,05.

Таким образом, выполненный анализ установил, что снижение тока и напряжения нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление по сравнению с режимом металлического ОЗЗ происходит пропорционально коэффициенту неполноты замыкания на землю, значение которого зависит от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз относительно земли, переходное сопротивление в месте повреждения и параметров системы заземления нейтрали. Это необходимо учитывать при выборе уставок на срабатывание токовых защит от однофазных замыканий на землю.

2.3. Определение характеристик срабатывания защиты от однофазных замыканий в условиях вариации параметров контура нулевой последовательности

Эффективность действия защит от однофазных замыканий на землю зависит от выбора уставок на срабатывание, цель которого обеспечить несрабатывание защиты на неповрежденных линиях и срабатывание защиты на поврежденном присоединении. Рассмотрим существующую методику по выбору уставок срабатывания и проверке чувствительности действия защиты от ОЗЗ [82, 86].

На рисунке 2.11 представлена упрощенная схема электрической сети, которая содержит две распределительные подстанции и шесть отходящих линий, три из которых обеспечивают электроснабжение высоковольтных двигателей и две - комплектные трансформаторные подстанции (КТП) 10/04 кВ. Питание на первую подстанцию поступает через трансформатор Т1, а трансформатор

заземления нейтрали (ТЗН) служит для искусственного вывода нейтральной точки сети с целью подключения заземляющего резистора R_N .

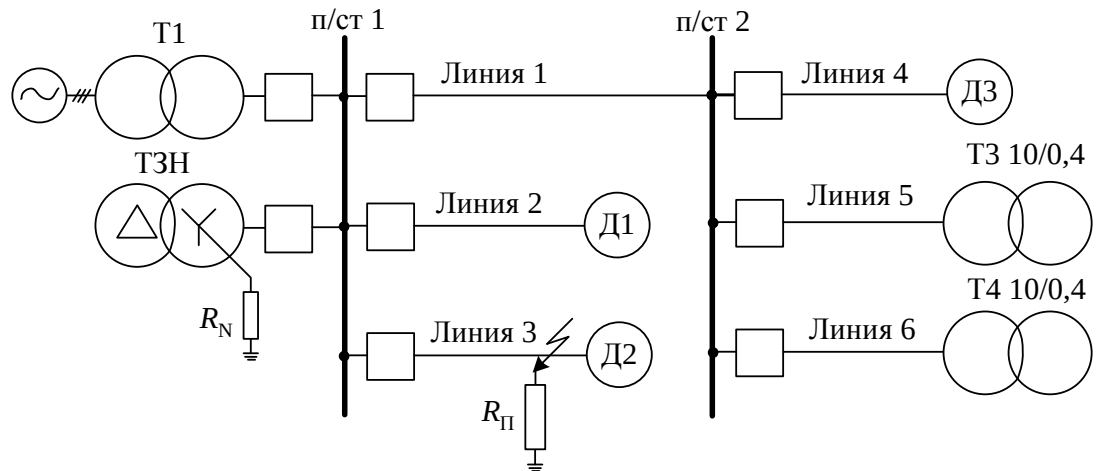


Рисунок 2.11 – Упрощенная схема электрической сети.

Для определения токов нулевой последовательности, протекающих по защищаемым линиям в режиме ОЗЗ необходимо представить схему электрической сети на рисунке 2.11 в виде схемы замещения нулевой последовательности сети (рисунок 2.12).

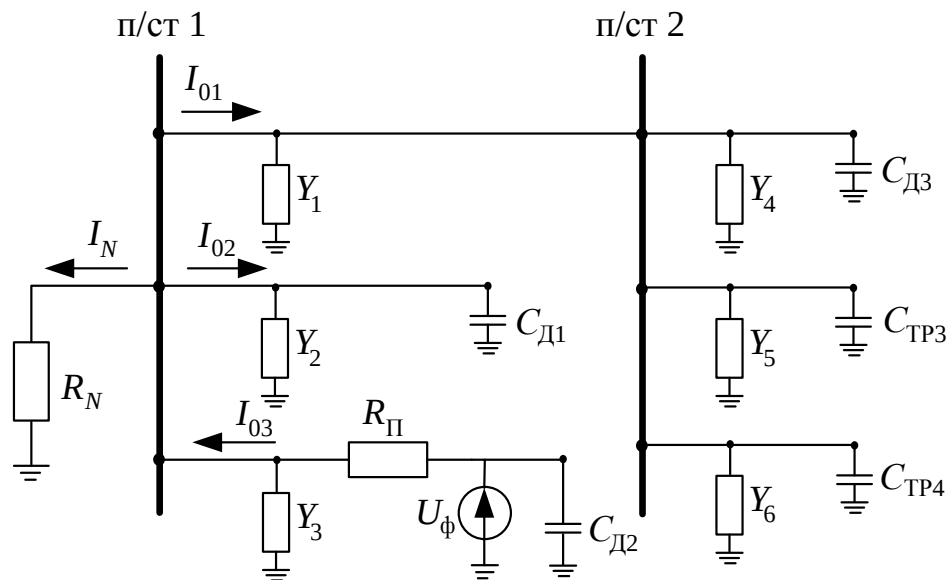


Рисунок 2.12 – Схема замещения нулевой последовательности электрической сети

Уставка по току срабатывания защиты от однофазных замыканий $I_{уст}$ выбирается по следующему условию [82]:

$$I_{уст} \geq k_n k_{бр} I_{0л.с.} , \quad (2.21)$$

где $k_n=1,2-1,3$ - коэффициент надежности, учитывающий погрешность реле, ошибки расчета $I_{0л.с.}$ [3];

$k_{бр.} = 1,2-1,3$ – коэффициент «броска», учитывающий бросок емкостного тока в момент возникновения замыкания на землю, а также способность реагировать на него защиты от ОЗЗ [4];

$I_{0л.с.}$ – собственный ток нулевой последовательности линии, определяемый ее параметрами относительно земли.

Выбор уставки по току срабатывания комплектов индивидуальной защиты от ОЗЗ на всех присоединениях электрической сети осуществляется путем определения линии с наибольшим собственным током нулевой последовательности, который вычисляется по выражению:

$$I_{0л.с.} = 3U_{\phi}Y_{\Sigma}, \quad (2.22)$$

где Y_{Σ} - суммарная проводимость поврежденного присоединения, которая, например, для линии 1 в соответствии с рисунком 2.12 составит: $Y_{\Sigma} = Y_1 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + \omega (C_{тр3} + C_d + C_{тр4})$.

Вычисление емкостей относительно земли статорных обмоток высоковольтных двигателей осуществляется по выражениям [77]:

$$C_d = \frac{3 \cdot 0,0187 \cdot S_{ном.} \cdot 10^{-6}}{1,2 \sqrt{U_{ном.}} (1 + 0,08 \cdot U_{ном.})} \quad - \quad \text{для асинхронных двигателей с}$$

короткозамкнутым ротором и неявнополюсных синхронных двигателей, Ф,

$$C_d = \frac{40^4 \sqrt{S_{ном.}^3} \cdot 10^{-9}}{(U_{ном.} + 3,6)^3 \sqrt{n_{ном.}}} \quad - \quad \text{для остальных типов двигателей, Ф,}$$

где $U_{ном.}$ – номинальное напряжение электродвигателя, кВ;

$S_{ном.}$ – номинальная полная мощность электродвигателя, МВА;

$n_{ном.}$ – номинальная частота вращения ротора двигателя, об/мин.

Для приблизительного определения емкостей относительно земли первичных обмоток трансформаторов используется выражение [36]:

$$C_{TP} \approx \frac{I_{уд}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \omega \cdot 10^{-6}},$$

где $I_{уд}$ - удельный емкостной ток трансформатора, А/шт (таблица 2.2).

Таблица 2.2. - Значения удельного емкостного тока первичной обмотки трансформаторов $I_{уд}$ при различной мощности и напряжении сети

Мощность трансформатора, кВА	Удельный емкостной ток $I_{уд}$, А/шт.	
	6 кВ	10 кВ
До 1000	0,02	0,03
Свыше 1000	0,04	0,06

После выбора уставок на срабатывание защиты от ОЗЗ необходимо проверить чувствительность ее действия, которая оценивается с помощью коэффициента чувствительности $K_{\text{ч}}$, определяемого по выражению [78, 81]:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{0н.л.}}{I_{\text{уст}}}, \quad (2.23)$$

где $I_{0н.л.}$ – ток нулевой последовательности, протекающий по поврежденному присоединению в режиме ОЗЗ.

Ток нулевой последовательности $I_{0н.л.}$ в режиме металлического замыкания на землю с учетом выражений (2.13) и (2.17) определяется по выражению:

$$I_{0н.л.мет} = U_{\phi} 3\omega C_{\Sigma} \sqrt{tg^2 \delta + \lambda^2 d_N^2 + 1} - U_{\phi} 3\omega C_{л.с.} \sqrt{tg^2 \delta + 1}. \quad (2.24)$$

Для сетей с резистивно-заземленной нейтралью выбор уставок токовой защиты от ОЗЗ основывается на двойном неравенстве [82]:

$$\frac{I_{0н.л.}}{K_{\text{ч}}} \geq I_{\text{уст}} \geq K_{\text{отс}} \cdot I_{0л.с.}. \quad (2.25)$$

Согласно [61] коэффициент чувствительности для защит от ОЗЗ, устанавливаемых на кабельных линиях должен быть не менее 1,25, а для защит от

ОЗЗ на воздушных линиях – не менее 1,5. В [78, 84] указано, что для обеспечения надежного функционирования защит от однофазных замыканий на землю необходимо, чтобы коэффициент чувствительности был не менее 2. Однако по причине возникновения переходного сопротивления в месте замыкания на землю (рисунок 2.12) снизится ток нулевой последовательности, протекающий по поврежденному присоединению, что приведет к снижению коэффициента чувствительности и возникнет опасность в отказе функционирования защиты от ОЗЗ.

При ОЗЗ через переходное сопротивление ток нулевой последовательности в поврежденной линии снижается пропорционально снижению коэффициента неполноты замыкания на землю и с учетом (2.17) и (2.20) определяется по выражению:

$$I_{0н.л.} = (U_{\phi} 3\omega C_{\Sigma} \sqrt{tg^2 \delta + \lambda^2 d_N^2 + 1} - U_{\phi} 3\omega C_{л.с.} \sqrt{tg^2 \delta + 1}) \cdot n = n \cdot I_{0н.л.мет.} \quad (2.26)$$

На основании (2.25) коэффициент чувствительности защиты:

$$K_{\chi} \leq \frac{I_{0н.л.}}{K_{отс} \cdot I_{0л.с.}} \quad (2.27)$$

С учетом (2.26) и (2.27) коэффициент чувствительности защиты при неполном ОЗЗ:

$$K_{\chi.н} \leq \frac{n \cdot I_{0н.л.мет.}}{K_{отс} \cdot I_{0л.с.}} \quad (2.28)$$

Из сравнения (2.27) и (2.28) соотношение коэффициентов чувствительности при неполном и металлическом ОЗЗ с учетом (2.24):

$$K_{\chi.н} = \frac{3\omega U_{\phi} (C_{\Sigma} - C_{л.с.}) \sqrt{tg^2 \delta + \lambda^2 d_N^2 + 1}}{K_{отс} U_{\phi} 3\omega C_{л.с.} \sqrt{tg^2 \delta + 1}} \cdot n \quad (2.29)$$

Учитывая то, что величина коэффициента n находится в пределах $0 \leq n \leq 1$ при $R_{\Pi} > 0$, то согласно выражению (2.29) неполнота замыкания фазы на землю всегда будет понижать чувствительность защиты от ОЗЗ, что будет являться причиной ее неработоспособности в условиях эксплуатации.

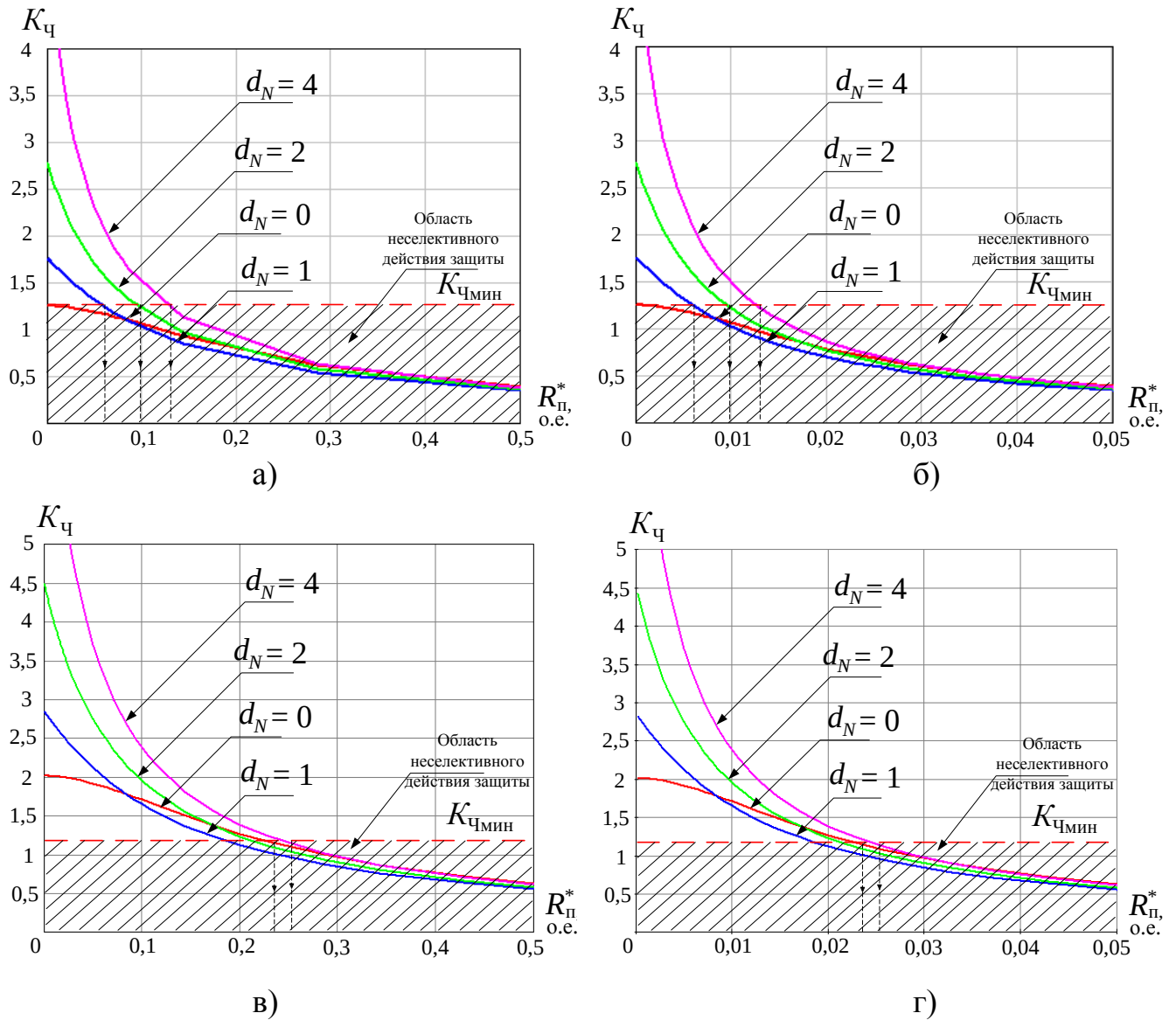


Рисунок 2.13 – Зависимости коэффициентов чувствительности защиты от ОЗЗ от величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ от суммарной емкости сети и относительном значении активной составляющей тока ОЗЗ d_N :

а) – $C_{\Sigma}^* = 0,1$; б) – $C_{\Sigma}^* = 1$ при $K_{\text{ч}} = 1,25$;

в) – $C_{\Sigma}^* = 0,1$; г) – $C_{\Sigma}^* = 1$ при $K_{\text{ч}} = 2$.

Используя выражение (2.29) приняв $\text{tg} \delta^* = 0,006$, построим зависимости коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ от величины переходного

сопротивления в месте повреждения при различной суммарной емкости электрической сети напряжением 6 кВ в условиях вариации d_N (рис. 2.13).

Согласно рисунку 2.13 а, при условии обеспечения нормированного коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ кабельных линий с изолированной нейтралью 1,25 [31], защита будет способна селективно выявлять поврежденное присоединение в сети суммарной емкостью $C_\Sigma^* = 0,1$ при замыкании на землю через переходное сопротивление не более 100-150 Ом. В сети с суммарной емкостью $C_\Sigma^* = 1$ при тех же условиях – не более нескольких десятков Ом (рисунок 2.13 б).

Из рисунка 2.13 в следует, что в условиях вариации переходного сопротивления в месте повреждения с учетом того, что коэффициент чувствительности в режиме металлического замыкания равен двум [78, 86], а значение суммарной емкости сети $C_\Sigma^* = 0,1$, защита от однофазных замыканий на землю способна селективно выявить поврежденное присоединение в сети с изолированной нейтралью ($d_N = 0$) при переходном сопротивлении в месте ОЗЗ не более $R_n^* = 0,23$. Повышение чувствительности действия защиты от ОЗЗ в сети с резистивно-заземленной нейтралью достигается путем выбора необходимой величины сопротивления заземляющего резистора в цепи нейтрали. Например, при выборе величины сопротивления заземляющего элемента по условию $d_N = 1$ чувствительность действия защиты в режиме металлического ОЗЗ может быть повышена на 44%, а при $d_N = 2$ - на 130%. Однако при увеличении переходного сопротивления, приняв максимальное значение $d_N = 4$, защита от ОЗЗ позволит селективно выявлять поврежденное присоединение при максимальном $R_n^* = 0,27$.

Из рисунка 2.13 г видно, что токовые защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью с суммарной емкостью $C_\Sigma^* = 1$ позволяют селективно выявлять

поврежденное присоединение при максимальном переходном сопротивлении в месте ОЗЗ $R_n^* = 0,026$.

Более низкая чувствительность действия защиты от ОЗЗ при одном и том же переходном сопротивлении в месте повреждения в электрических сетях с относительно высоким значением суммарной емкости фаз линий на землю в сравнении с сетями с небольшим значением суммарной емкости связана с тем, что градиент снижения коэффициента неполноты замыкания с увеличением суммарной емкости сети и переходного сопротивления в месте ОЗЗ имеет наибольшее значение. Повышение чувствительности защиты путем введения в контур нулевой последовательности дополнительного активного тока, создаваемого элементом заземления нейтрали, позволит увеличить значение $K_{\text{ч}}$ в режиме металлического ОЗЗ. Однако, несмотря на это, с увеличением переходного сопротивления в месте повреждения величина коэффициента чувствительности защиты снижается до недопустимых значений, как и в сети с изолированной нейтралью.

Для обеспечения надежного функционирования защиты от однофазных замыканий на землю еще на стадии проектирования необходимо определить значение коэффициента чувствительности, при котором защита способна селективно выявить поврежденное присоединение при ОЗЗ через переходное сопротивление определенной величины. Минимальное значение коэффициента чувствительности в режиме металлического ОЗЗ, при котором токовая защита сработала при таком значении величины коэффициента неполноты замыкания, определяется по выражению:

$$K_{\text{ч}_{\text{мин}}} = \frac{1}{n}. \quad (2.30)$$

С учетом (2.20) выражение (2.30) примет вид:

$$K_{\text{ч}_{\text{мин}}} = \sqrt{(tg\delta R_n 3\omega C_{\Sigma} + \lambda d_N R_n 3\omega C_{\Sigma} + 1)^2 + (R_n 3\omega C_{\Sigma})^2}. \quad (2.31)$$

Выражение (2.31) позволяет рассчитать коэффициент чувствительности, который должна иметь защита от замыканий на землю в режиме металлического

ОЗЗ для того, чтобы селективно выявить поврежденное присоединение в условиях замыкания через переходное сопротивление определенной величины. На рисунке 2.14 приведены зависимости минимальных коэффициентов чувствительности защиты от переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

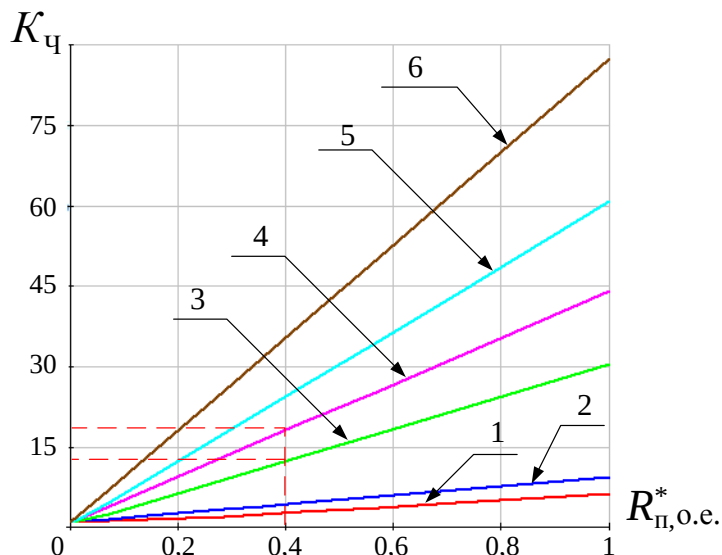


Рисунок 2.14 – Зависимости минимальных коэффициентов чувствительности защиты от переходного сопротивления в месте ОЗЗ:

1, 3, 5 – построены при $d_N = 0$; 2, 4, 6 – построены при $d_N = 1$; 1, 2 – при $C_\Sigma^* = 0,1$; 3, 4 – при $C_\Sigma^* = 0,5$; 5, 6 – при $C_\Sigma^* = 1$

Из рисунка 2.14 видно, что, например, в электрической сети с изолированной нейтралью ($d_N = 0$) и суммарной емкостью $C_\Sigma^* = 0,5$ защита от ОЗЗ должна иметь в режиме металлического замыкания минимальный коэффициент чувствительности 13 для того, чтобы селективно выявить присоединение с ОЗЗ через переходное сопротивление в $R_n^* = 0,4$, а в сети с резистивно-заземленной нейтралью ($d_N = 1$) при тех же условиях – 18. С увеличением емкости сети значения минимальных коэффициентов чувствительности возрастают.

Таким образом, существующая методика по выбору уставок и проверке чувствительности защит от замыканий на землю, согласно которой ток в

повреждённом присоединении определяется в режиме металлического ОЗЗ, не позволяет учесть снижение рабочих сигналов защиты при замыканиях на землю через переходные сопротивления, что приводит к неселективному действию токовых защит от ОЗЗ. Поэтому возникает необходимость в разработке методики определения чувствительности действия токовых защит от ОЗЗ в условиях возникновения неполных однофазных замыканий на землю.

2.4. Разработка методики определения чувствительности действия защиты в условиях однофазных замыканий через переходное сопротивление

Проверка чувствительности действия защиты от ОЗЗ должна осуществляться с учетом возможного снижения тока нулевой последовательности в повреждённой линии при возникновении в месте повреждения переходного сопротивления. Кроме того, необходимо анализировать конфигурацию электрической сети, т.е. оценивать количество присоединений, которые постоянно находятся в работе.

В случае, если возможно оценить количество отходящих от секции шин присоединений, постоянно находящихся в работе, определять коэффициент чувствительности защиты в режиме ОЗЗ через переходное сопротивление следует с учетом коэффициента неполноты замыкания по выражению (2.29).

Однако на стадии проектирования зачастую не представляется возможным определить количество присоединений, которые будут постоянно находиться в работе. Поэтому оценивать чувствительность защит в рассматриваемом случае необходимо по следующему выражению:

$$K_{ч.н} = \frac{I_N}{I_{уст.}} \cdot n. \quad (2.32)$$

Значение коэффициентов чувствительности, рассчитанных с учетом коэффициента неполноты замыкания на землю по выражениям (2.29) и (2.32) для защит от ОЗЗ в сетях с воздушными ЛЭП должно быть не ниже 1,5, а в кабельных сетях – не менее 1,25 [31]. На рисунке 2.15 представлен блок схема алгоритма

выбора уставок и проверки чувствительности действия защиты от ОЗЗ в условиях неполных замыканий на землю.

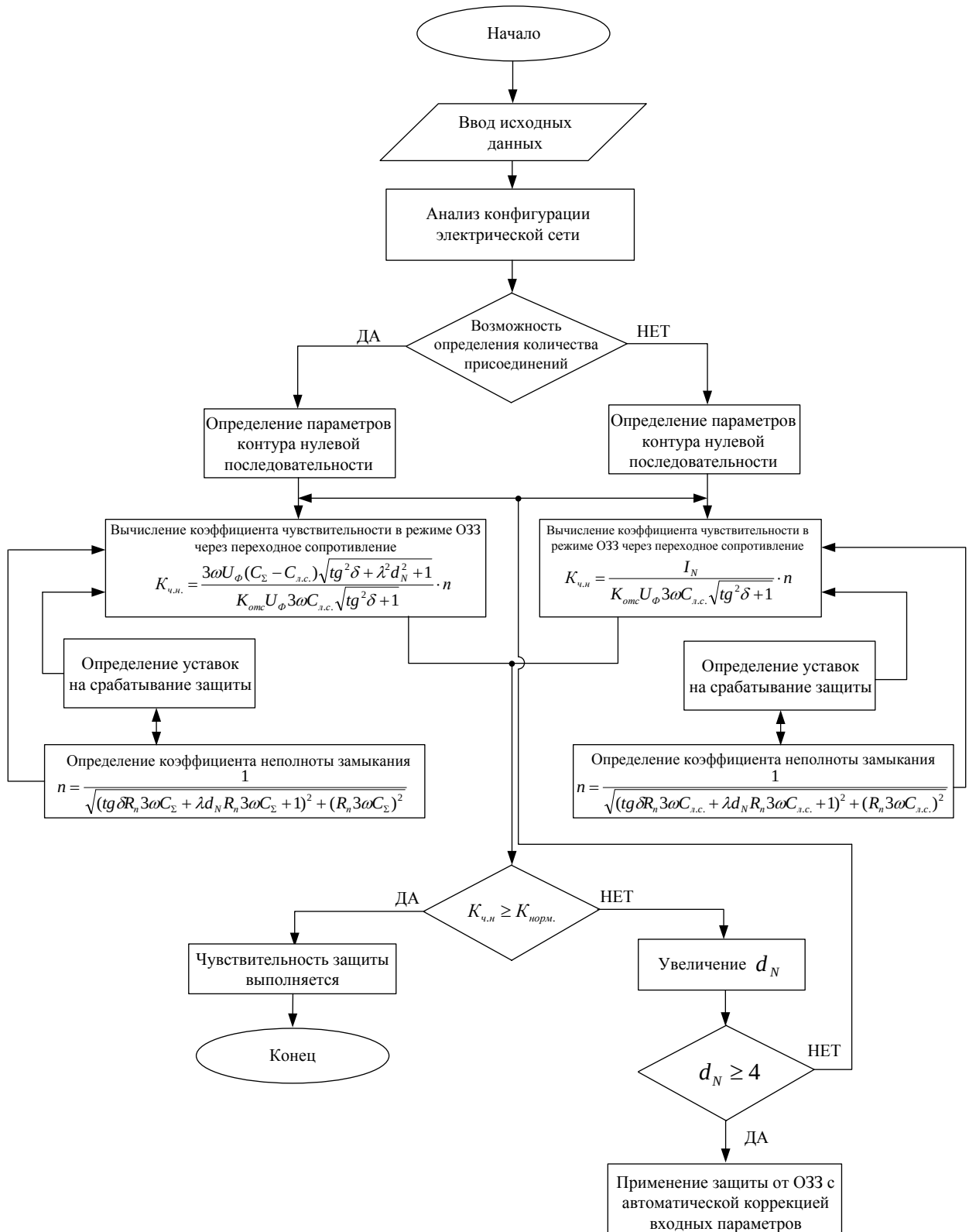


Рисунок 2.15 – Блок схема алгоритма выбора уставок и проверки чувствительности действия защиты от ОЗЗ в условиях неполных замыканий на землю

Алгоритм выбора уставок и проверки чувствительности действия защиты от ОЗЗ в условиях неполных замыканий на землю предполагает выполнение анализа конфигурации электрической сети с целью определения количества присоединений постоянно находящихся в работе. Следующим шагом является определение параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости линий относительно земли, возможное переходное сопротивление в месте ОЗЗ, которое может возникнуть на рассматриваемом участке, и параметры системы заземления нейтрали. С учетом рассчитанных параметров выбираются уставки по току срабатывания защиты исходя из режима металлического ОЗЗ и определяется коэффициент неполноты замыкания на землю. Причем, в случае, если не удастся определить количество присоединений постоянно находящихся в работе, коэффициент неполноты замыкания на землю определяется по выражению:

$$n = \frac{1}{\sqrt{(tg\delta R_n 3\omega C_{л.с.} + \lambda d_N R_n 3\omega C_{л.с.} + 1)^2 + (R_n 3\omega C_{л.с.})^2}},$$

где $C_{л.с.}$ - емкость относительно земли линии, на которой устанавливается проверяемая защита.

Следующим шагом является определение коэффициента чувствительности защиты в режиме замыкания через переходное сопротивление и сравнение полученного значения с нормированным значением $K_{ч\text{ норм.}}$. В случае, если условие $K_{ч} \geq K_{ч\text{ норм.}}$ выполняется, то чувствительность защиты от ОЗЗ считается удовлетворительной. Если коэффициент чувствительности оказывается меньше нормированного значения, тогда следует увеличить значения тока нулевой последовательности за счет увеличения доли активного тока заземляющего резистора в цепи нейтрали d_N . В случае, если в результате увеличения d_N до предельного значения 4 вышеуказанное условие не выполняется, следует перейти к использованию более совершенных защит от ОЗЗ.

Разработанная методика позволяет осуществлять выбор уставок и проверку чувствительности действия защиты от ОЗЗ в условиях замыкания через

переходное сопротивление, а также оценку необходимого уровня коррекции входных параметров защиты в зависимости от степени неполноты замыкания на землю.

Выводы по главе 2:

1. Получены зависимости напряжения и тока нулевой последовательности и напряжений неповрежденных фаз линий сети от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли, переходное сопротивление в месте повреждения и параметры системы заземления нейтрали, позволяющие оценить степень неполноты замыкания на землю.

2. Установлены диапазоны вариации параметров контура нулевой последовательности, включая суммарную емкость фаз линий сети относительно земли, изменяющуюся в пределах от 0,1 мкФ до 9,2 мкФ ($0,001 \leq C_{\Sigma}^* \leq 1$) тангенс угла диэлектрических потерь – от 0,02 до 3,5 ($0,006 \leq \operatorname{tg}^* \delta \leq 1$) переходное сопротивление в месте замыкания на землю – от 1 до 7000 Ом ($0,00014 \leq R_n^* \leq 1$), коэффициент, учитывающий параметры нейтралеобразующего трансформатора $0,96 \leq \lambda \leq 0,99$, коэффициент, учитывающий долю активной составляющей тока замыкания на землю в суммарном токе замыкания - $0 \leq d_N \leq 4$.

3. Показано, что снижение тока и напряжения нулевой последовательности сети при замыкании на землю через переходное сопротивление по сравнению с режимом металлического ОЗЗ происходит пропорционально коэффициенту неполноты замыкания, значение которого находится в пределах от 0 до 1 и зависит от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий на землю, переходное сопротивление в месте повреждения и параметры системы заземления нейтрали. Например, при $R_n^* = 0,71$

и $C_{\Sigma}^* = 0,1$ значение коэффициента неполноты составит 0,21, а при $R_n^* = 0,71$ и $C_{\Sigma}^* = 0,6 - 0,05$.

4. Установлено, что при вариации переходного сопротивления в месте повреждения и коэффициенте чувствительности защиты от ОЗЗ $K_{\text{ч}}=2$ в сети с изолированной нейтралью и суммарной емкостью $C_{\Sigma}^* = 0,1$ токовые защиты от однофазных замыканий на землю позволяют селективно выявлять поврежденное присоединение при переходном сопротивлении в месте замыкания не более $R_n^* = 0,23$. Повышение чувствительности действия защиты достигается путем увеличения тока нулевой последовательности, протекающего по поврежденному присоединению, за счет увеличения доли активной составляющей тока заземляющего резистора и при максимальном значении коэффициента $d_N = 4$ позволяет увеличить зону селективного действия защиты до $R_n^* = 0,27$. При значении суммарной емкости электрической сети $C_{\Sigma}^* = 1$ защита окажется неработоспособной при однофазном замыкании на землю через переходное сопротивление в $R_n^* = 0,026$.

5. Выявлено, что для обеспечения необходимой селективности действия защиты от ОЗЗ в условия вариации переходного сопротивления в пределах $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$ коэффициенты чувствительности защиты в режиме металлического замыкания в зависимости от сопротивления нейтрали и суммарной емкости сети в диапазоне $0,001 \leq C_{\Sigma}^* \leq 1$ должны составлять от 6 до 88, что на практике является практически недостижимым.

6. Разработана методика оценки чувствительности действия токовой защиты от ОЗЗ в условиях замыкания через переходное сопротивление, позволяющая минимизировать ущербы в электротехнических комплексах напряжением 6-35 кВ за счет определения характеристик срабатывания защиты на этапе проектирования. Полученная методика также позволяет выполнить оценку необходимого уровня коррекции входных параметров защиты в зависимости от степени неполноты замыкания на землю.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНВАРИАНТНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ПРИ НЕПОЛНЫХ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

3.1. Способы повышения чувствительности действия защиты в условиях замыкания через переходное сопротивление

На сегодняшний день накоплен большой опыт в области повышения чувствительности действия защит от ОЗЗ в условиях замыкания фазы электрической сети через переходное сопротивление [19, 42, 46, 70, 78, 91]. Однако, несмотря на многочисленные исследования и разработки, проведенные в этом направлении, практически ни одно из наиболее распространенных устройств защиты от ОЗЗ не обладает требуемой селективностью и инвариантным действием в широком диапазоне вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли и переходное сопротивление в месте повреждения. Многие из них труднореализуемы на практике в силу сложности разработанных алгоритмов действия и необходимостью использования дорогостоящего оборудования. Поэтому наиболее целесообразным представляется совершенствование широко применяемой в сетях 6-35 кВ ненаправленной токовой защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующей на ток нулевой последовательности в установившемся режиме ОЗЗ.

Как было установлено в главе 2, сигнал тока нулевой последовательности защищаемой линии, контролируемый цепями защиты от ОЗЗ по причине возникновения переходного сопротивления в месте замыкания снижается относительно своего значения, определяемого в режиме металлического ОЗЗ, пропорционально коэффициенту неполноты замыкания на землю и с учетом (2.26):

$$I_{0нп} = n \cdot I_{0мет}, \quad (3.1)$$

где $I_{0нп}$ - ток нулевой последовательности в режиме неполного замыкания на землю.

Коэффициент чувствительности токовой защиты от ОЗЗ при возникновении замыкания через переходное сопротивление с учетом (2.29) определяется по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{n \cdot I_{0_{\text{мет.}}}}{I_{\text{уст}}}. \quad (3.2)$$

При вариации переходного сопротивления в месте повреждения значение коэффициента неполноты замыкания на землю зависит от параметров контура нулевой последовательности и согласно (2.20) находится в пределах $0 \leq n \leq 1$. Таким образом, неполнота замыкания фазы на землю будет являться причиной недопустимого снижения коэффициента чувствительности действия защит от ОЗЗ.

Из выражения (3.2) следует, что повышение чувствительности действия защиты в условиях замыкания через переходное сопротивление достигается путем коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии или уставки по току срабатывания защиты с учетом коэффициента неполноты замыкания на землю.

3.2. Разработка алгоритмов автоматической коррекции входных параметров защиты от однофазных замыканий

Входными параметрами ненаправленных токовых защит от ОЗЗ являются токи нулевой последовательности защищаемых присоединений и уставки по току срабатывания защиты, что предопределяет возможность построения двух возможных вариантов алгоритмов коррекции действия защиты.

3.2.1. Защита от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемых линий

Структурно-функциональная схема защиты от однофазных замыканий на землю, алгоритм действия которой предусматривает коррекцию сигнала тока

нулевой последовательности защищаемой линии в режиме ОЗЗ, представлена на рисунке 3.1 [48, 49].

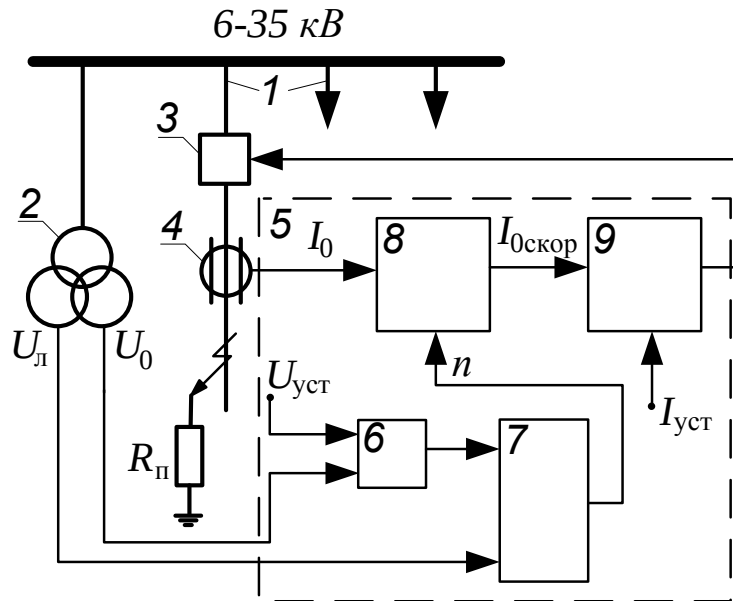


Рисунок 3.1 - Структурно-функциональная схема защиты с коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии

На рисунке 3.1 обозначены: 1 – защищаемые линии сети; 2 – измерительный трансформатор напряжения с двумя вторичными обмотками; 3 – автоматический выключатель; 4 – датчик тока нулевой последовательности, в виде фильтра тока нулевой последовательности или трансформатора тока нулевой последовательности; 5 – блок защиты линии; 6 – пороговый орган защиты по напряжению нулевой последовательности; 7 – модуль вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю; 8 – модуль коррекции тока нулевой последовательности защищаемой линии; 9 – логический элемент защиты.

Функционирование защиты с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом действия, который представлен на рисунке 3.2.

Защита от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности работает следующим образом. В нормальном режиме работы электрической сети при несимметрии параметров защищаемых линий 1 и

появлении небаланса по напряжению нулевой последовательности с измерительного трансформатора напряжения 2 поступает сигнал виде U_0 на вход порогового (пускового) элемента 6 блока защиты 5, в котором осуществляется операция сравнения его значения с уставкой на пропускание сигнала $U_{уст}$. Ввиду того, что уставка порогового органа защиты 6 выбрана, исходя из отстройки от возможной несимметрии в сети, сигнал с порогового органа не поступает на модуль 7 блока защиты 5. Таким образом, коррекции сигнала тока нулевой последовательности не происходит и модуль 9 блока защиты 5 не осуществляет генерацию сигнала на отключение автоматического выключателя 3 защищаемой линии 1, т.е. не происходит ложных срабатываний защиты по причине появления несимметрии сети в нормальном режиме работы.

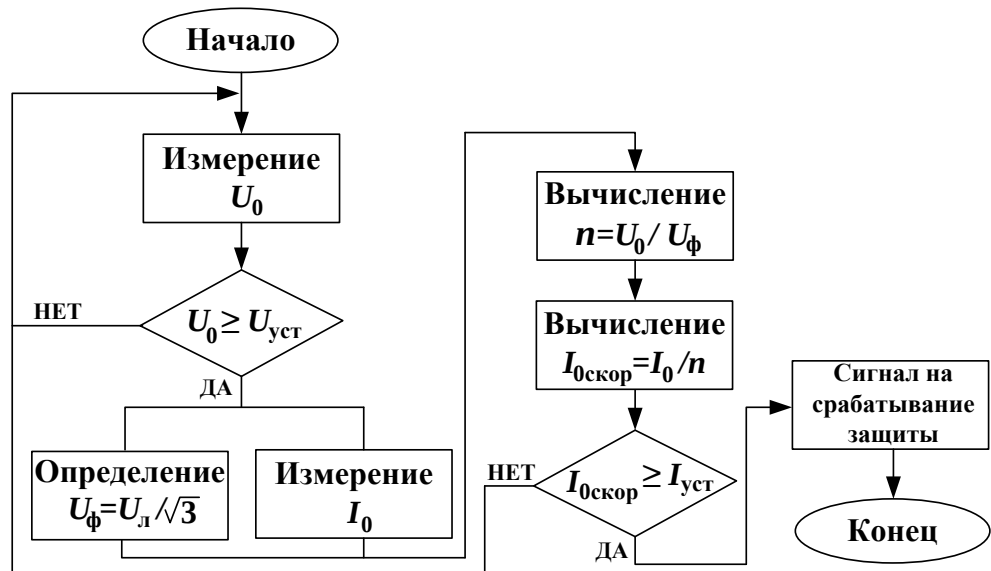


Рисунок 3.2 - Алгоритм действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии

В режиме однофазного замыкания на землю защищаемой линии 1, происходящем через некоторую величину переходного сопротивления R_Π , с трансформатора напряжения 2 поступают сигналы в виде U_0 и U_Δ на входы порогового органа защиты 6 и модуля вычисления коэффициента неполноты замыкания 7 блока защиты 5 соответственно. Пороговый элемент 6 осуществляет операцию сравнения напряжения нулевой последовательности с уставкой $U_{уст}$ и

передает сигнал по напряжению нулевой последовательности на первый вход модуля 7. Модуль 7 выполняет операцию вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю путем:

$$n = \frac{U_0}{U_\phi}. \quad (3.3)$$

Сигнал с выхода модуля вычисления коэффициента неполноты замыкания 7 поступает на второй вход модуля коррекции контролируемого тока нулевой последовательности 8 блока защиты 5, на первый вход которого поступает сигнал с датчика тока нулевой последовательности 4 в виде I_0 . Модуль 8 осуществляет операция вычисления сигнала скорректированного тока нулевой последовательности путем:

$$I_{0\text{скор}} = \frac{I_0}{n}. \quad (3.4)$$

На вход модуля 9 блока защиты 5 поступает сигнал в виде скорректированного тока нулевой последовательности, где осуществляется сравнение $I_{0\text{скор}}$ с заданной уставкой на срабатывание защиты $I_{\text{уст}}$, выбранной, исходя из условия глухого «металлического» замыкания, при превышении которой осуществляется генерация сигнала на отключение автоматического выключателя 3 защищаемой линии 1 [48, 49].

Все математические операции, предусмотренные в разработанном алгоритме коррекции действия защиты, выполняются с использованием действующих значений измеренных величин линейного напряжения сети, напряжения и тока нулевой последовательности защищаемой линии. Это обуславливает необходимость использования функционального модуля, обеспечивающего определение действующих значений по каждому каналу измерения. Ввиду того, что в результате возникновения ОЗЗ фазные напряжения сети изменяются относительно своих значений, соответствующих нормальному режиму работы электрической сети определение их значений измерительным трансформатором напряжения и использование для работы защиты не представляется возможным. Поэтому вычисление коэффициента неполноты

замыкания на землю в разработанном алгоритме действия защиты от ОЗЗ осуществляется путем деления сигналов напряжения нулевой последовательности и линейного напряжения сети, сигнал которого преобразован в сигнал фазного напряжения путем деления на $\sqrt{3}$. В этой связи возникает необходимость использования функционального модуля, выполняющего операцию преобразования измеренного сигнала линейного напряжения сети в сигнал фазного напряжения.

С учетом разработанных рекомендаций функциональная схема защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности представлена на рисунке 3.3.

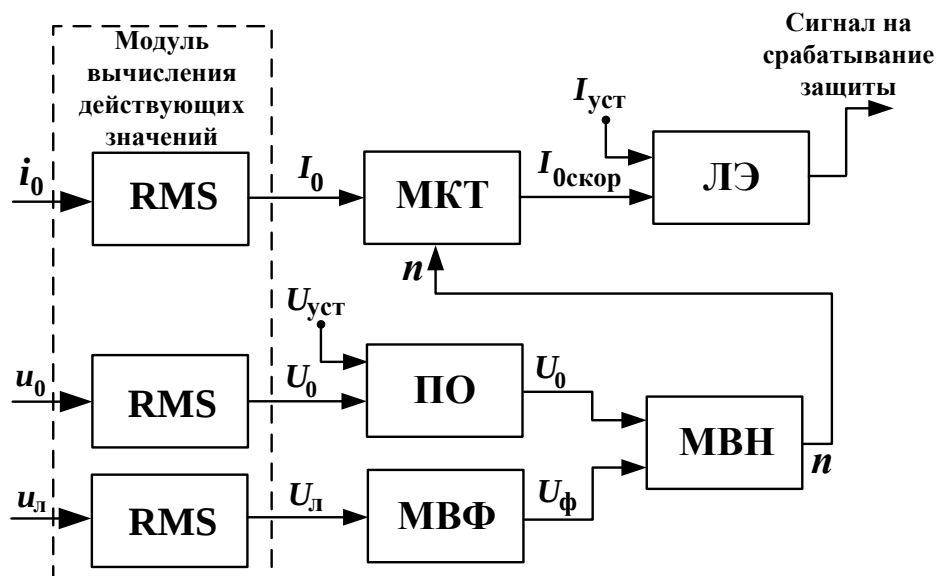


Рисунок 3.3 - Функциональная схема защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности

Из рисунка 3.3 следует, что функциональная схема защиты содержит в своем составе модуль вычисления действующих значений измеренных мгновенных величин тока нулевой последовательности защищаемой линии i_0 , напряжения нулевой последовательности u_0 и линейного напряжения сети $u_{\text{л}}$, представленный отдельными функциональными блоками RMS на каждом измерительном канале защиты; пороговый (пусковой) орган защиты ПО с заданной уставкой $U_{\text{уст}}$ на пропускание сигнала по напряжению нулевой

последовательности U_0 ; модуль вычисления фазного напряжения сети МВФ, реализующий операцию $U_{\phi}/\sqrt{3}$; модуль вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю МВН, функционирующий в соответствии с выражением (3.3); модуль МКТ автоматической коррекции измеренного сигнала тока нулевой последовательности I_0 защищаемой линии, функционирующий в соответствии с выражением (3.4); логический элемент защиты, выполняющий функцию сравнения скорректированного сигнала тока нулевой последовательности с уставкой на срабатывание $I_{0\text{сбор}} \geq I_{\text{уст}}$ и при выполнении условия, генерацию дискретного сигнала на срабатывание защиты [52, 53, 92].

Разработанные структурно-функциональная и функциональная схема защиты от ОЗЗ и алгоритм ее действия, предусматривающий оценку степени неполноты замыкания на землю и последующую автоматическую коррекцию сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии до значения, соответствующего режиму металлического однофазного замыкания позволяют обеспечить независимость, т.е. инвариантность действия защиты в условиях ОЗЗ через переходные сопротивления.

3.2.2. Защита от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания

Возможен второй вариант построения защиты от ОЗЗ, описанный в [47], где в отличие от первого варианта, в соответствии с величиной коэффициента неполноты замыкания на землю осуществляется коррекция уставки на срабатывание защиты $I_{\text{уст}}$, которая выбрана при условии металлического замыкания. Дополним представленную структуру защиты от ОЗЗ [47] пороговым (пусковым) органом по напряжению нулевой последовательности с целью исключения ложных срабатываний защиты по причине появления несимметрии сети в нормальном режиме ее работы. С учетом дополнительного модуля структурно-функциональная схема защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания примет вид, представленный на рисунке 3.4.

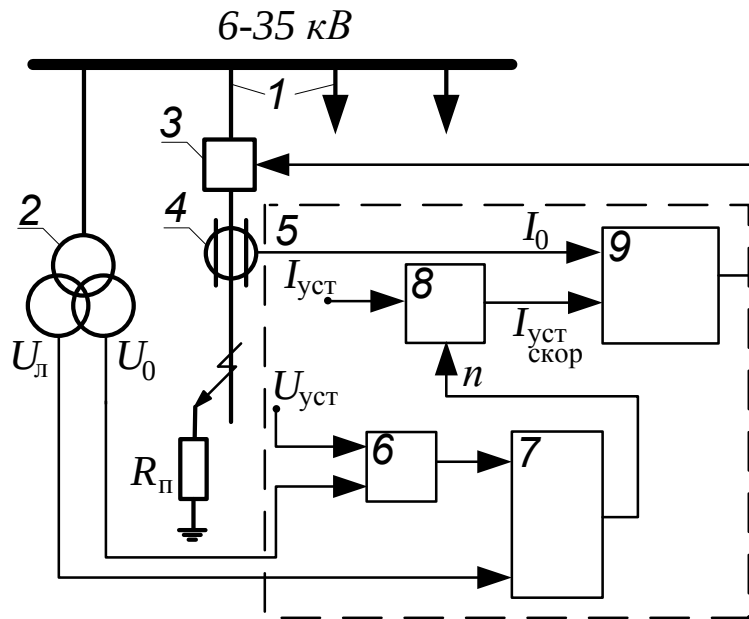


Рисунок 3.4 – Структурно-функциональная схема защиты с коррекцией уставки по току срабатывания

Из рисунка 3.4 структурно-функциональная схема защиты от ОЗЗ содержит: 1 – защищаемые линии сети; 2 – измерительный трансформатор напряжения с двумя вторичными обмотками; 3 – автоматический выключатель; 4 – датчик тока нулевой последовательности, в виде фильтра тока нулевой последовательности или трансформатора тока нулевой последовательности; 5 – блок защиты линии; 6 – пороговый орган защиты по напряжению нулевой последовательности; 7 – модуль вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю; 8 – модуль коррекции уставки по току срабатывания защиты; 9 – логический элемент защиты.

Функционирование защиты с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом действия (рисунок 3.5), в котором предусмотрена автоматическая коррекция уставки по току срабатывания защиты с учетом степени неполноты замыкания на землю до уровня, при котором обеспечивается восстановление соотношения между током нулевой последовательности и уставкой на срабатывание защиты как в режиме металлического замыкания.

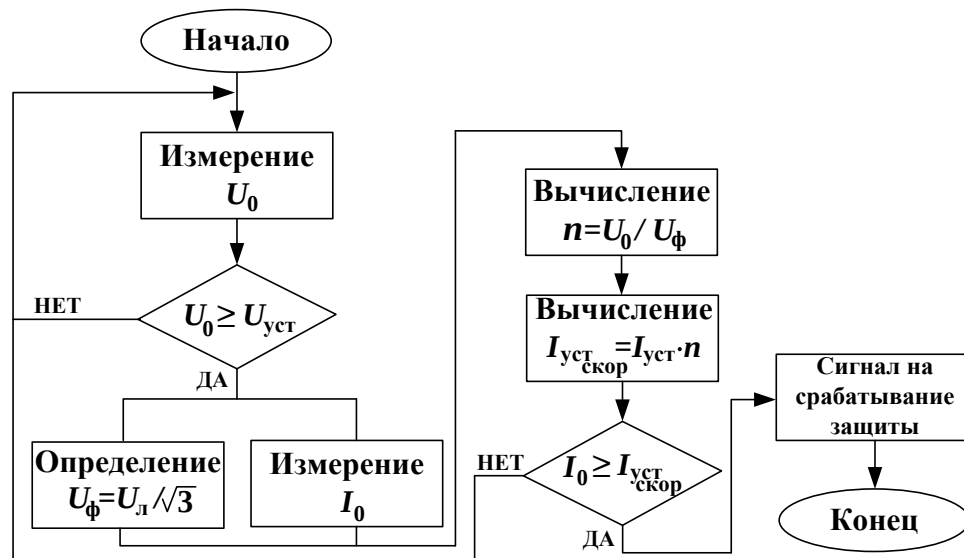


Рисунок 3.5 - Алгоритм действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания

Из рисунка 3.4 следует, что автоматическая коррекция уставки по току срабатывания осуществляется в модуле 8, который формирует на своем выходе сигнал в виде:

$$I_{уст.скор} = n \cdot I_{уст} \quad (3.5)$$

В свою очередь, модуль 9 осуществляет операцию сравнения сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с величиной скорректированной уставки на срабатывание защиты $I_0 \geq I_{уст. скор}$, и в случае выполнения условия, генерирует дискретный сигнал на срабатывание защиты.

Функциональная схема защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания (рисунок 3.6), в отличие от первого варианта исполнения защиты, содержит в своем составе модуль коррекции уставки (МКУ), функционирующий согласно выражению (3.5). Все остальные элементы функциональной схемы на рисунке 3.6 выполняют те же операции, что и функциональные модули защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией тока нулевой последовательности защищаемой линии, представленной на рисунке 3.3.

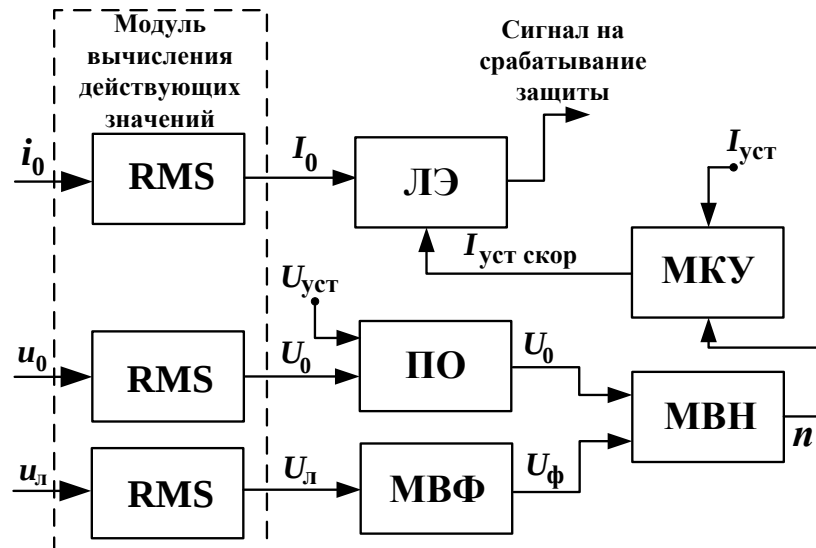


Рисунок 3.6 - Функциональная схема защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания

Разработанные структурно-функциональная и функциональная схема защиты от ОЗЗ и алгоритм ее действия, предусматривающий оценку уровня неполноты замыкания на землю и последующую автоматическую коррекцию уставки по току срабатывания защиты, так же как и в первом варианте организации защиты, позволяют обеспечить независимость, т.е. инвариантность действия защиты в условиях ОЗЗ через переходные сопротивления.

3.3. Исследование эффективности действия защиты с автоматической коррекцией входных параметров

Исследование эффективности действия защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров, включая сигнал тока нулевой последовательности защищаемой линии и уставку по току срабатывания защиты, при замыканиях на землю через переходное сопротивление проводилось путем имитационного моделирования в программном пакете MatLab Simulink.

С использованием экспериментальных данных, случая возникновения ОЗЗ в распределительной сети 6 кВ ОАО «КИНЕФ» (приложение А, рисунок 1), была рассмотрена схема установки комплектов индивидуальной инвариантной защиты в распределительной сети (рисунок 3.7).

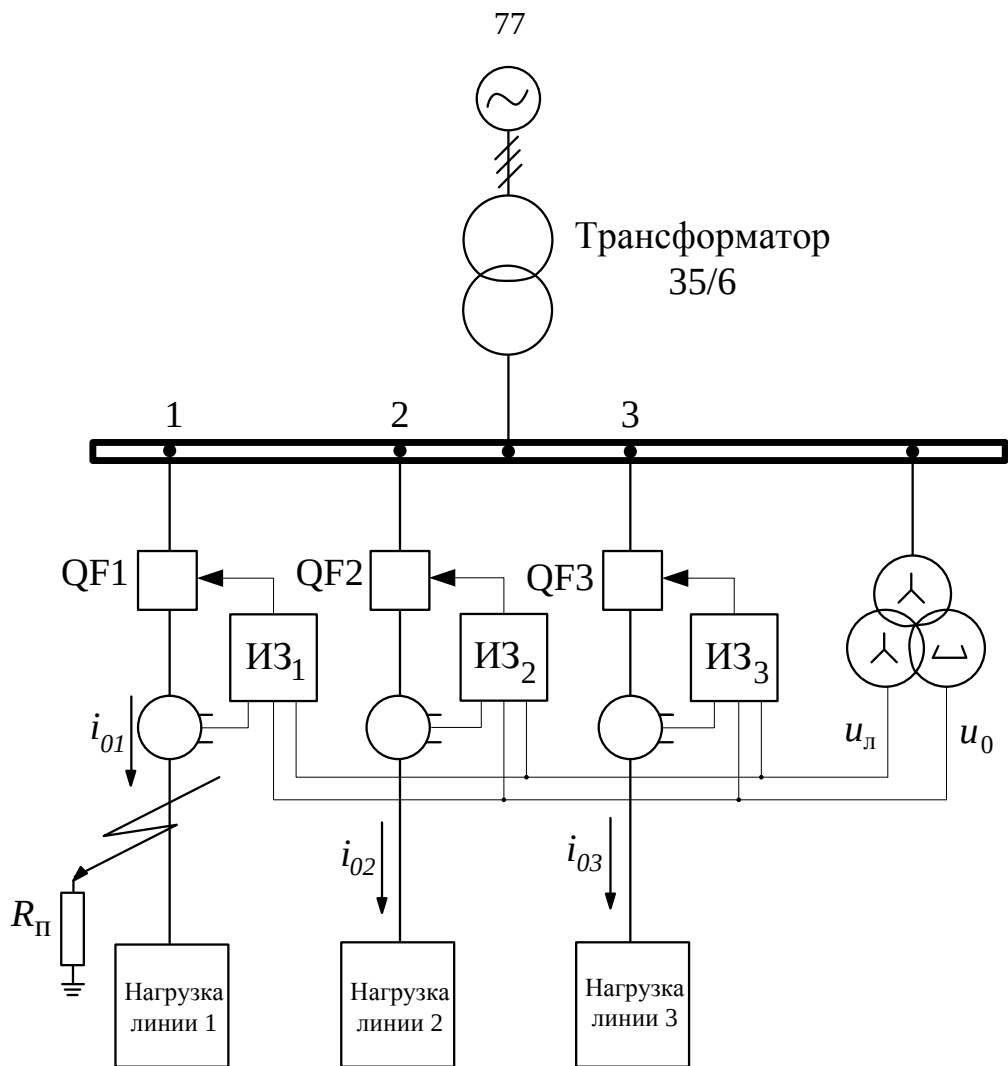


Рисунок 3.7. - Схема распределительной сети 6 кВ с индивидуальными комплектами инвариантной защитой от ОЗЗ

На рисунке 3.7 обозначены: QF_1 , QF_2 , QF_3 – автоматические выключатели, ТН – измерительный трансформатор напряжения, i_{01} , i_{02} , i_{03} – токи нулевой последовательности в защищаемых линиях, u_0 , $u_л$ – напряжение нулевой последовательности и линейное напряжение сети, $R_П$ – переходное сопротивление в месте ОЗЗ, ИЗ₁, ИЗ₂, ИЗ₃ – индивидуальные комплекты инвариантной защиты от ОЗЗ.

На основе схемы, представленной на рисунке 3.7, с использованием расчетных параметров отходящих линий и электрических нагрузок (приложение А, таблица 1) в программном пакете MatLab Simulink была построена модель электрической сети 6 кВ с изолированной нейтралью (рисунок 3.9).

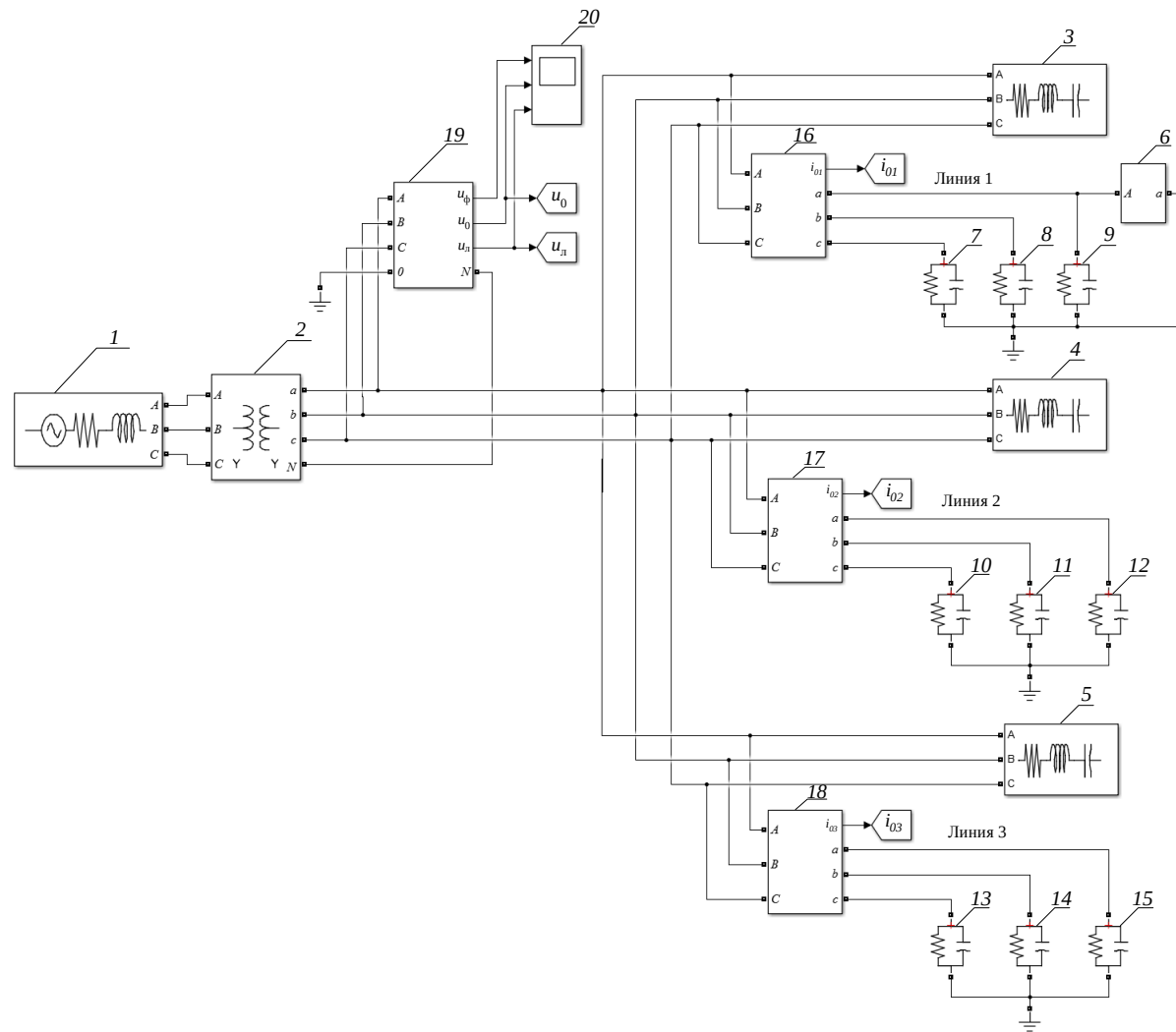


Рисунок 3.9 - Модель электрической сети 6 кВ с изолированной нейтралью
в среде программирования Matlab Simulink

На рисунке 3.9 обозначены: 1 – трехфазный источник питания 35 кВ; 2 – силовой трансформатор 35/6 кВ; 3, 4, 5 – электрическая нагрузка линий 1, 2, 3 соответственно; 6 – блок моделирования однофазного замыкания на землю фазы А линии 1; 7, 8, 9 – активные и емкостные сопротивления фаз линии 1 относительно земли; 10, 11, 12 – активные и емкостные сопротивления фаз линии 2 относительно земли; 13, 14, 15 – активные и емкостные сопротивления фаз линии 3 относительно земли; 16, 17, 18 – модули измерения токов нулевой последовательности защищаемых линий; 19 – модуль измерения фазных напряжений, линейного напряжения сети и напряжения нулевой последовательности; 20 – модуль вывода измеренных сигналов напряжений.

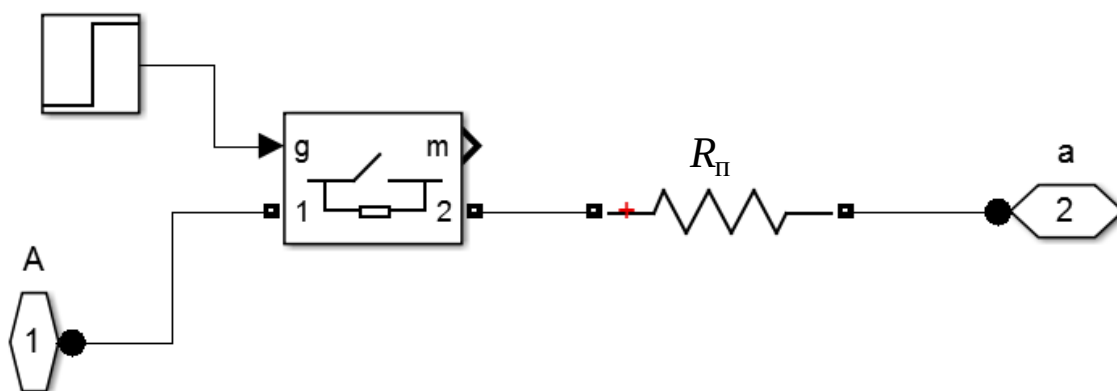


Рисунок 3.8 - Блок моделирования ОЗЗ через переходное сопротивление

Блок моделирования однофазного замыкания на землю 6 имитирует ОЗЗ фазы А с через активное переходное сопротивление и позволяет осуществлять вариацию его значения (рисунок 3.8).

3.3.1. Исследование эффективности действия инвариантной защиты с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности

В программном пакете Matlab Simulink, с использованием функциональной схемы на рисунке 3.3 были построены модели инвариантной защиты от ОЗЗ [92], реализующей алгоритм автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности поврежденной линии сети (линия 1) и неповрежденной линии (линия 2), представленные на рисунках 3.10 и 3.11.

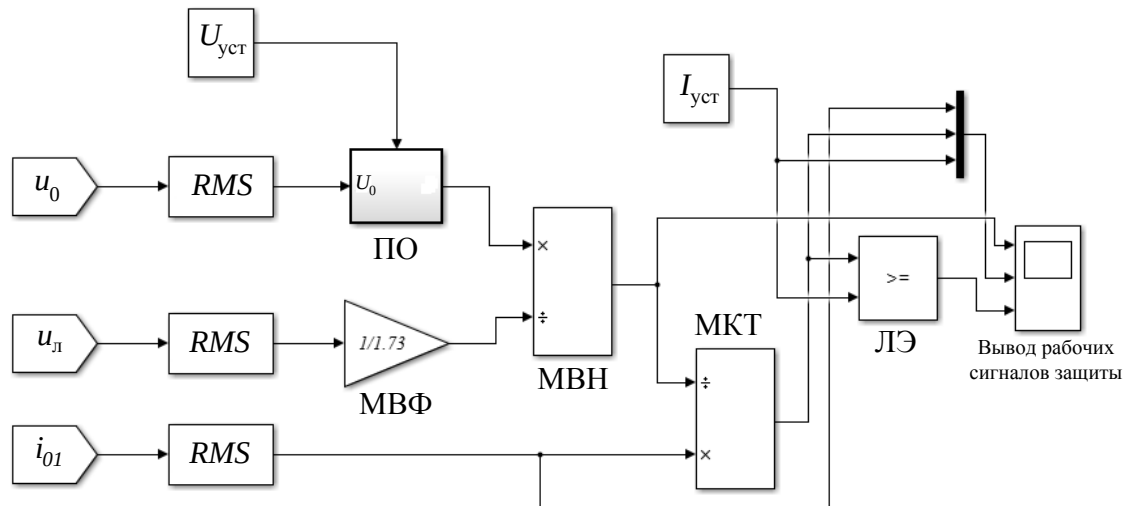


Рисунок 3.10 - Модель токовой защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности поврежденной линии (линии 1) в среде программирования Matlab Simulink

Выбор уставки по току срабатывания защиты основывался на методике, описанной во 2 главе, и применительно для рассматриваемой сети, с учетом расчетных параметров и выражения (2.21) ток уставки всех комплектов индивидуальной инвариантной защиты от ОЗЗ:

$$I_{уст} = k_n k_{бр} I_{л.с. макс.} = 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1,086 = 1,56 \text{ A.} \quad (3.6)$$

Моделирование работы защиты проводилось при следующих условиях:

- 1) линейные напряжения источника питания симметричны, их величина составляла $U_{л}=6,3 \text{ кВ}$;
- 2) поперечные проводимости фаз линий относительно земли симметричны;
- 3) продольные проводимости линий ввиду их малой протяженности не учитывались;
- 4) междофазные проводимости линий не учитывались;
- 5) вариация параметров контура нулевой последовательности осуществлялась в диапазоне: суммарная емкость сети - $0,001 \leq C_{\Sigma}^* \leq 1$, переходное сопротивление в месте замыкания на землю – $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$.

Ввиду того, что при заданных условиях моделирования работы инвариантной защиты несимметрия в распределительной сети отсутствует, не требуется выставление уставки по напряжению нулевой последовательности.

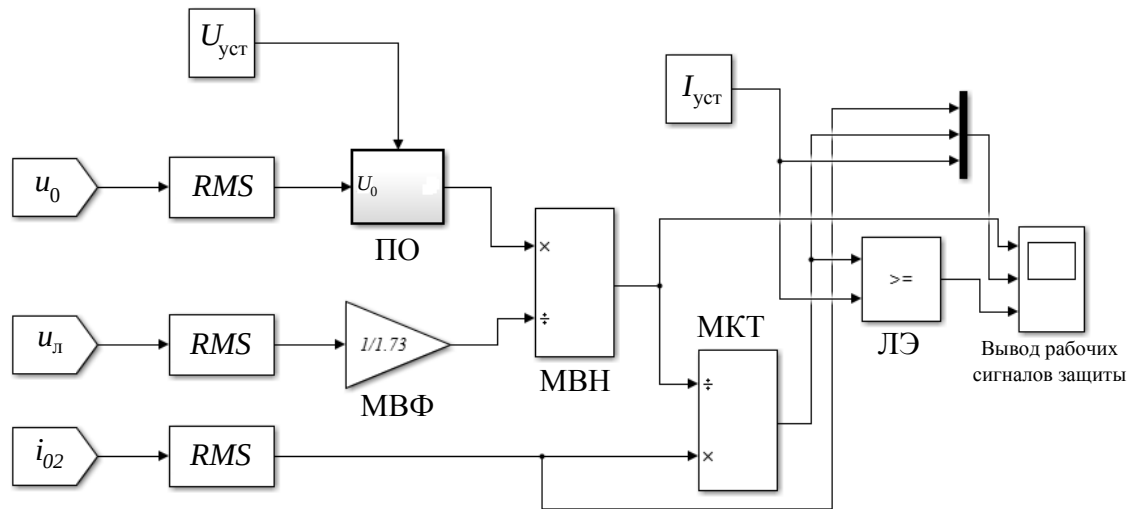


Рисунок 3.11 - Модель токовой защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности неповрежденной линии (линии 2) в среде программирования Matlab Simulink

На представленных моделях был проведен ряд исследований, в ходе которых осуществлялась вариация параметров контура нулевой последовательности и регистрировались основные сигналы, характеризующие работу инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности на поврежденной и неповрежденной линии сети. Результаты моделирования инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности представлены на рисунках 3.12 – 3.13.

Из рисунка 3.12 видно, что при «металлическом» ОЗЗ фазы А коэффициент неполноты замыкания равен 1, что соответствует проведенным ранее исследованиям, а значения измеренного тока нулевой последовательности и скорректированного тока нулевой последовательности поврежденной линии равны по величине и превышают уставку на срабатывание защиты. В этом случае логический элемент защиты ЛЭ генерирует дискретный сигнал в виде логической

единицы во вторичные цепи автоматического выключателя с целью отключения поврежденной линии.

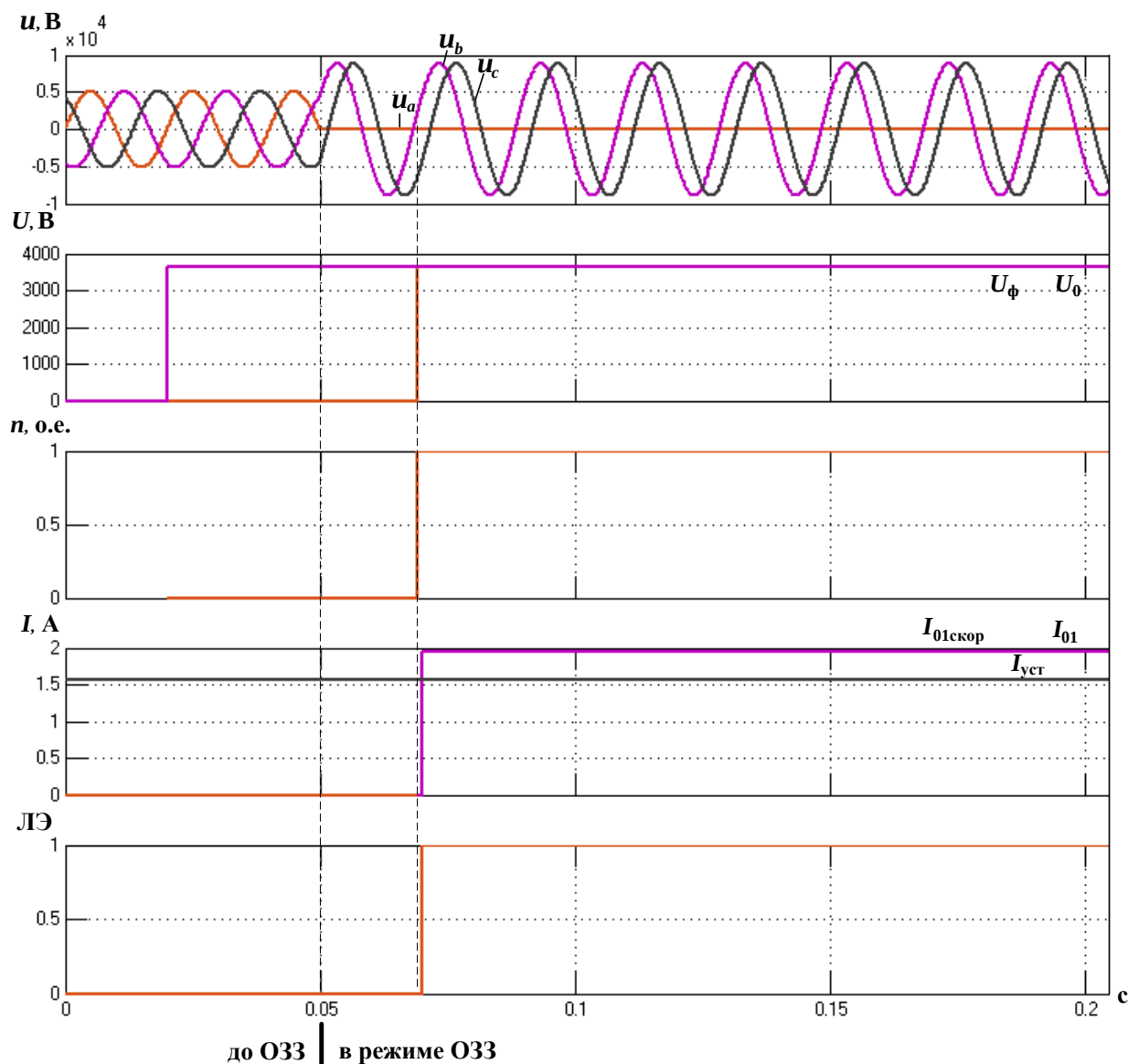


Рисунок 3.12 - Зависимости u_a , u_b , u_c , U_0 , U_ϕ , n , I_{01} , $I_{01\text{скор}}$ от времени, характеризующие работу инвариантной защиты от ОЗЗ на поврежденной линии сети при металлическом замыкании на землю

Согласно рисунку 3.13, сигналы тока нулевой последовательности и скорректированного тока нулевой последовательности на неповрежденной линии также равны, ввиду того что коэффициент неполноты равен 1. Однако сигнал скорректированного тока нулевой последовательности не превышает уставку на срабатывание защиты, выбранную по выражению (3.6) и позволяющую отстроить

работу защиты от собственного тока нулевой последовательности линии при внешнем ОЗЗ. Поэтому логический элемент защиты ЛЭ не генерирует сигнал на отключение неповрежденной линии, что обеспечивает выполнение условий селективности действия.

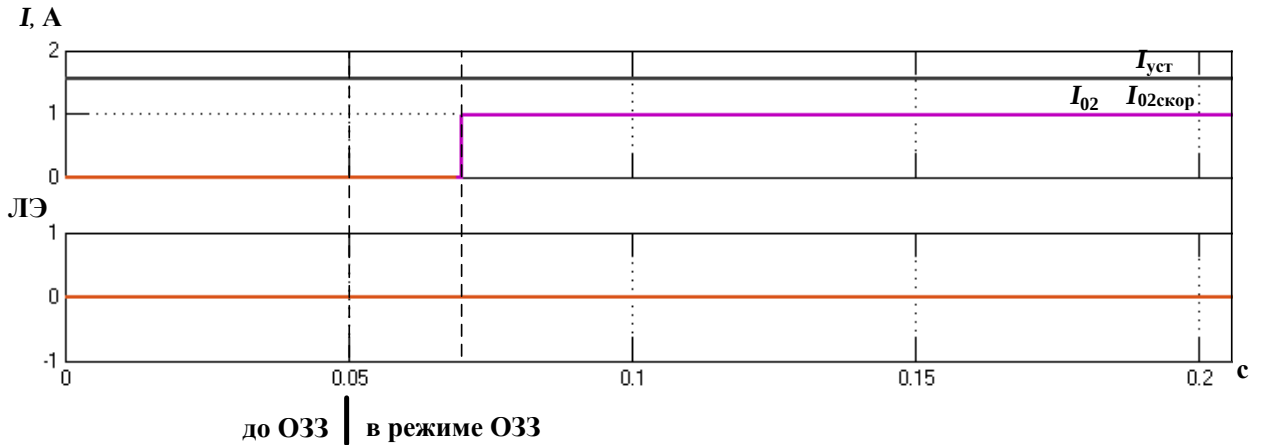


Рисунок 3.13 - Зависимости I_{02} , $I_{02\text{скор}}$ от времени, характеризующие работу инвариантной защиты от ОЗЗ на неповрежденной линии в сети при металлическом замыкании на землю

Коэффициент чувствительности защиты от ОЗЗ, установленной на линии 1 согласно выражению (2.23):

$$K_{\text{ч}01} = \frac{I_{01}}{I_{\text{уст}}} = \frac{1,98}{1,56} = 1,27 \geq 1,25 \quad (3.7)$$

Значение $K_{\text{ч}01}$ является достаточным для эффективного функционирования токовой защиты от ОЗЗ в режиме металлического замыкания на землю.

При замыкании на землю через переходное сопротивление $R_n^* = 0,14$ (1 кОм) действующее значение напряжения нулевой последовательности не равно фазному напряжению и, как следствие, значение сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии оказывается меньше уставки на срабатывание и возникает опасность в отказе функционирования защиты (рисунок 3.14). Однако за счет автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности с учетом коэффициента неполноты замыкания, выполняемой в функциональном модуле МКТ, сигнал скорректированного тока нулевой

последовательности достигнет значения, которое соответствует режиму металлического замыкания на землю, что позволит привести к срабатыванию логического элемента защиты.

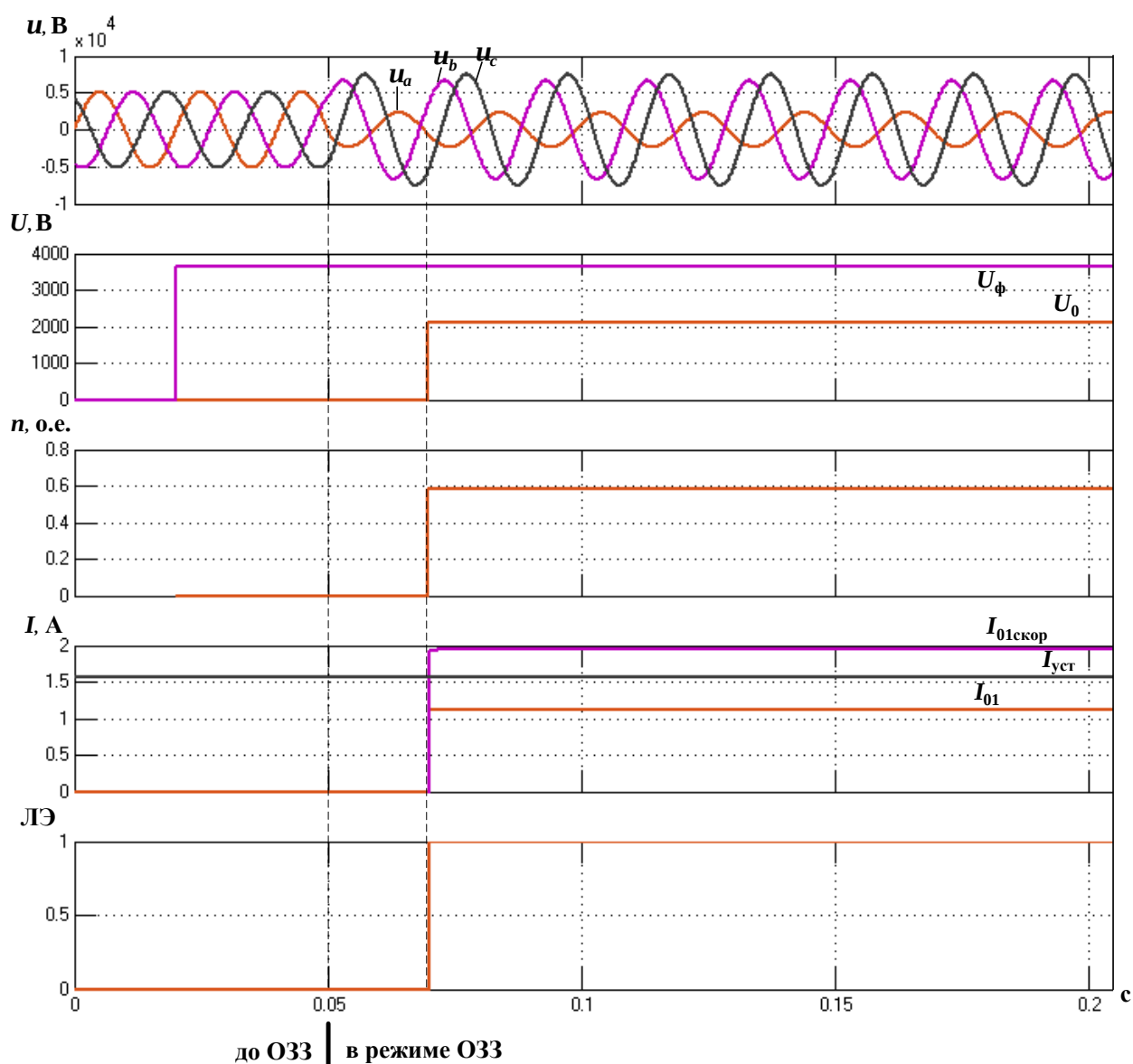


Рисунок 3.14 - Зависимости u_a , u_b , u_c , U_0 , U_ϕ , n , I_{01} , $I_{01\text{скор}}$ от времени, характеризующие работу инвариантной защиты от ОЗЗ на поврежденной линии при замыкании на землю через переходное сопротивление $R_n^* = 0,14$

Из рисунка 3.15 следует, что переходное сопротивление понижает сигнал тока нулевой последовательности неповрежденной линии, однако разработанный алгоритм коррекции позволит повысить уровень сигнала тока нулевой

последовательности до значения, соответствующего режиму металлическому замыканию на землю. Полученный в результате коррекции сигнал не превышает уставку на срабатывание защиты неповрежденной линии, что позволяет обеспечить выполнение условий селективности действия защиты.

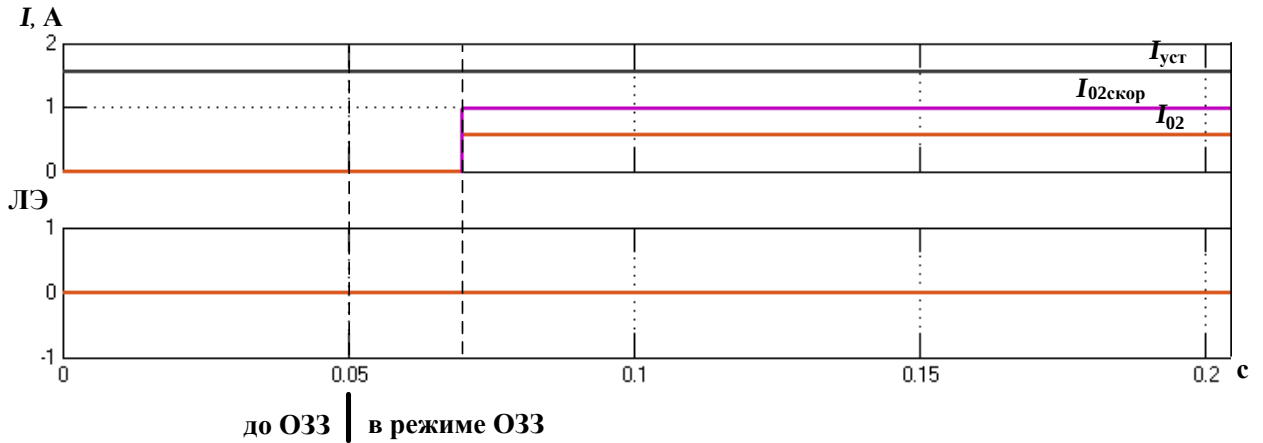


Рисунок 3.15 - Зависимости I_{02} , $I_{02сбор}$ от времени, характеризующие работу инвариантной защиты от ОЗЗ на неповрежденной линии при замыкании на землю через переходное сопротивление $R_n^* = 0,14$

Необходимо отметить, что быстроедействие инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии определяется функциональными модулями вычисления действующих значений измеренных величин и составляет один период тока промышленной частоты ($0,02 c$), что является удовлетворительным применительно к устройствам релейной защиты и автоматики [3, 4, 81].

В таблицах 3.1, 3.2 и 3.3 представлены данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности при суммарной емкости сети $C_\Sigma^* = 0,1$, $C_\Sigma^* = 0,5$, $C_\Sigma^* = 1$ соответственно и вариации переходного сопротивления в пределах $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$.

Таблица 3.1. Данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности ($C_{\Sigma}^* = 0,1$)

R_n^* , о.е.	U_0 , В	n , о.е.	I_{01} , А	$I_{01\text{скор}}$, А	I_{02} , А	$I_{02\text{скор}}$, А
$U_{\phi} = 3640$ В						
0,00014	3640	1	1,98	1,99	0,99	0,99
0,071	3365	0,924	1,84	1,99	0,92	0,99
0,143	2812	0,773	1,54	1,99	0,77	0,99
0,214	2295	0,631	1,25	1,99	0,63	0,99
0,286	1893	0,521	1,04	1,99	0,52	0,99
0,571	1061	0,291	0,58	1,99	0,29	0,99
1	624	0,171	0,34	1,99	0,17	0,99

Таблица 3.2. Данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности ($C_{\Sigma}^* = 0,5$)

R_n^* , о.е.	U_0 , В	n , о.е.	I_{01} , А	$I_{01\text{скор}}$, А	I_{02} , А	$I_{02\text{скор}}$, А
$U_{\phi} = 3640$ В						
0,00014	3640	1	10,15	10,16	5,07	5,08
0,071	1569	0,431	4,38	10,16	2,19	5,08
0,143	846	0,232	2,36	10,16	1,18	5,08
0,214	572	0,157	1,59	10,16	0,79	5,08
0,286	430	0,119	1,21	10,16	0,61	5,08
0,571	220	0,061	0,61	10,15	0,31	5,08
1	130	0,036	0,36	10,15	0,17	5,08

Таблица 3.3. Данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности ($C_{\Sigma}^* = 1$)

R_n^* , о.е.	U_0 , В	n , о.е.	I_{01} , А	$I_{01\text{скор}}$, А	I_{02} , А	$I_{02\text{скор}}$, А
$U_{\phi} = 3640$ В						
0,00014	3640	1	20,21	20,22	10,11	10,11
0,071	851	0,234	4,72	20,19	2,36	10,11
0,143	435	0,119	2,41	20,21	1,21	10,11
0,214	290	0,081	1,62	20,2	0,81	10,11
0,286	220	0,061	1,21	20,2	0,61	10,11
0,571	117	0,032	0,61	20,2	0,31	10,11
1	100	0,027	0,35	20,2	0,17	10,11

С использованием данных, полученных в результате моделирования работы защиты (таблицы 3.1, 3.2, 3.3) построены зависимости токов нулевой последовательности поврежденной линии I_{01}^* , неповрежденной линии I_{02}^* и скорректированных токов поврежденной $I_{01\text{скор}}^*$ и неповрежденной линии $I_{02\text{скор}}^*$ соответственно (рисунок 3.16). Из рисунка 3.16 следует, что увеличение переходного сопротивления в месте ОЗЗ приводит к снижению сигналов токов нулевой последовательности защищаемых линий, что влечет за собой опасность в отказе функционирования защиты от ОЗЗ.

Однако за счет разработанного алгоритма коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с учетом степени неполноты замыкания на землю сигнал скорректированного тока, который является рабочим сигналом защиты, остается неизменным во всем диапазоне вариации параметров контура нулевой последовательности, включая переходное сопротивление в месте повреждения и суммарную емкость сети. Это позволяет обеспечить инвариантное действие защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства режима замыкания на землю.

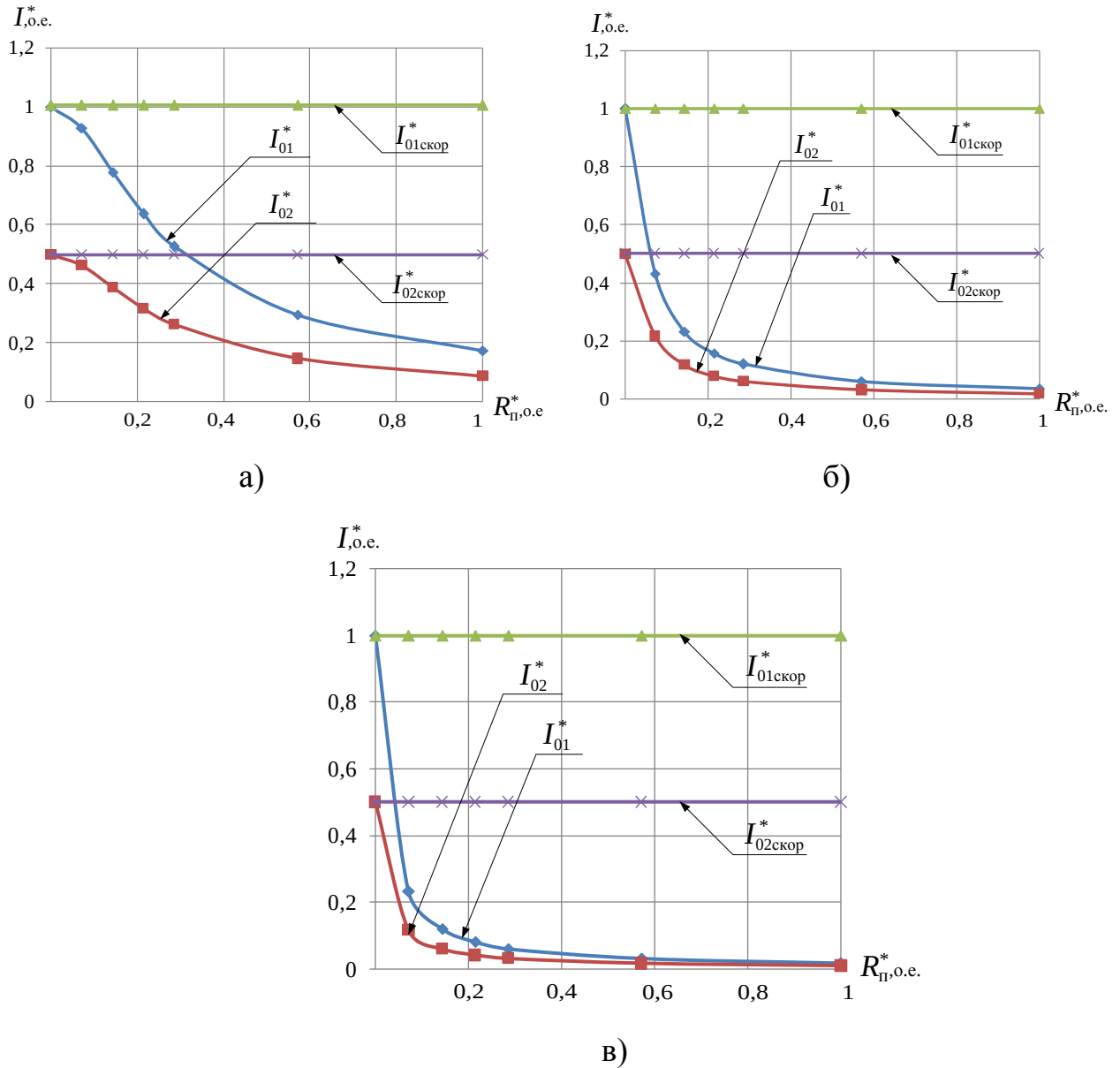


Рисунок 3.16 - Зависимости токов нулевой последовательности поврежденной и неповрежденной линий сети в режиме ОЗЗ через переходное сопротивление при различной суммарной емкости сети:

а) – при $C_{\Sigma}^* = 0,1$; б) – при $C_{\Sigma}^* = 0,5$; в) – при $C_{\Sigma}^* = 1$

На рисунке 3.17 представлены зависимости коэффициентов чувствительности инвариантной защиты от ОЗЗ и ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ от переходного сопротивления в месте повреждения и суммарной емкости сети, построенные с использованием данных таблиц 3.1, 3.2, 3.3 и выражения (3.7).

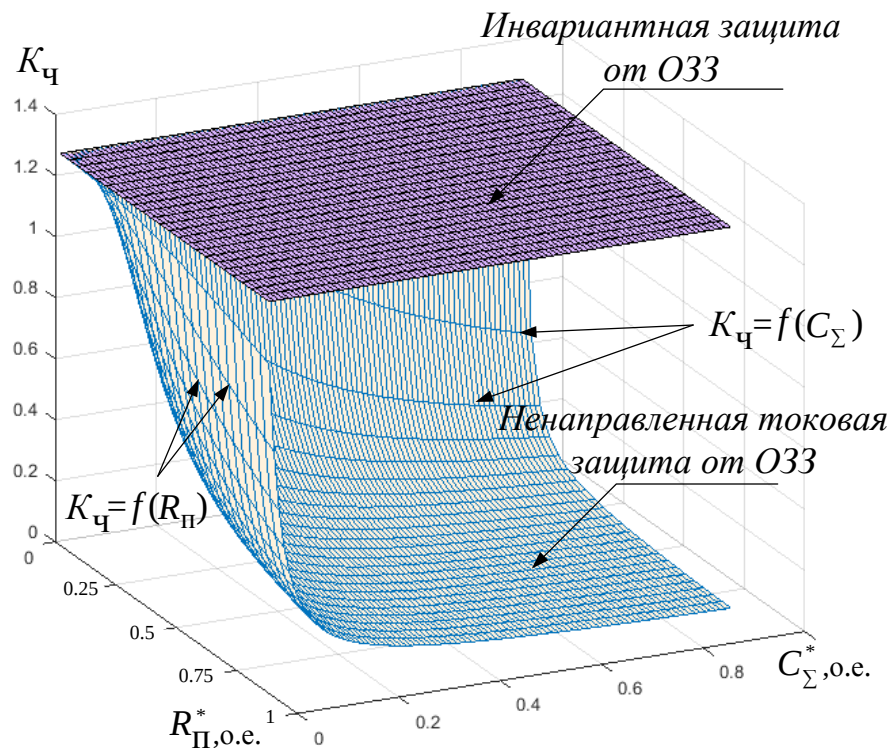


Рисунок 3.17 - Зависимости коэффициентов чувствительности инвариантной защиты от ОЗЗ и ненаправленной токовой защиты от ОЗЗ от переходного сопротивления в месте повреждения и суммарной емкости сети

Из рисунка 3.17 следует, что коэффициент чувствительности ненаправленной токовой защиты от однофазных замыканий на землю, как и показали ранее проведенные исследования, зависит от параметров контура нулевой последовательности и в условиях возникновения ОЗЗ через переходные сопротивления снижается до значений, при которых защита оказывается неработоспособной. Разработанный алгоритм коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии, используемый в инвариантной защите от ОЗЗ, позволяет обеспечить неизменность коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ, т.е. инвариантность действия защиты при вариации параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли и переходное сопротивление в месте повреждения.

3.3.2. Исследование эффективности действия инвариантной защиты с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания

В программном пакете Matlab Simulink, с использованием функциональной схемы на рисунке 3.6 были построены модели инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания на поврежденной линии (линия 1) и неповрежденной линии (линия 2), представленные на рисунках 3.18 и 3.19.

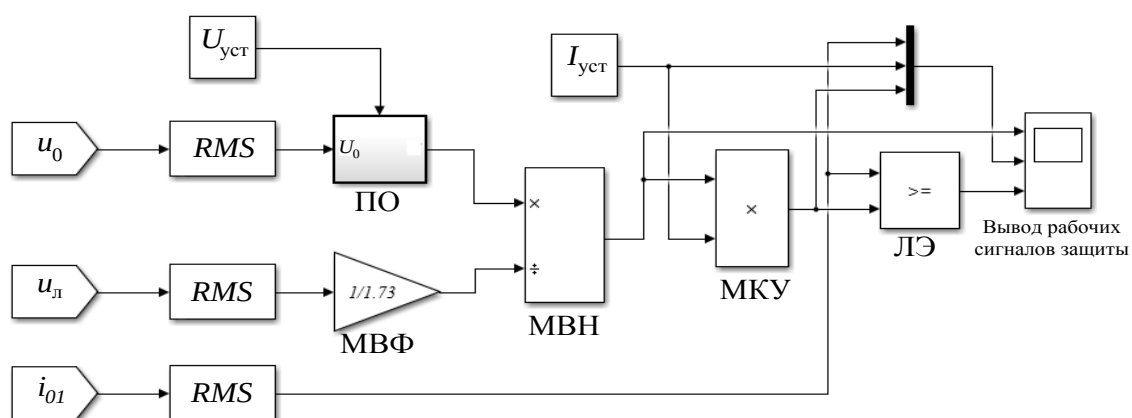


Рисунок 3.18 - Модель токовой защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания для поврежденной линии (линия 1) в среде программирования Matlab Simulink

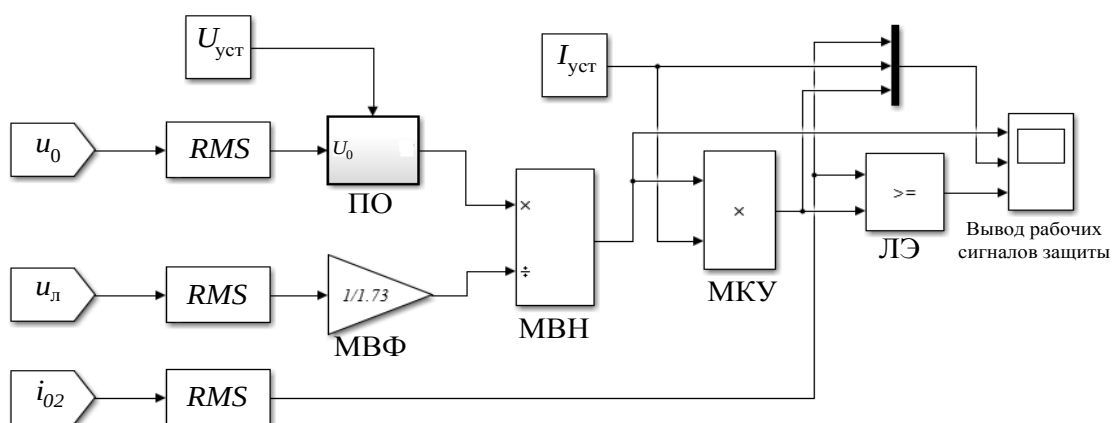


Рисунок 3.19 - Модель токовой защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности неповрежденной линии (линии 2) в среде программирования Matlab Simulink

Уставка по току срабатывания всех комплектов индивидуальной инвариантной защиты от ОЗЗ была выбрана по выражению (3.6). Условия моделирования работы указанного варианта защиты приняты теми же, что и для инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности.

Результаты моделирования инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания представлены на рисунках 3.20 – 3.21.

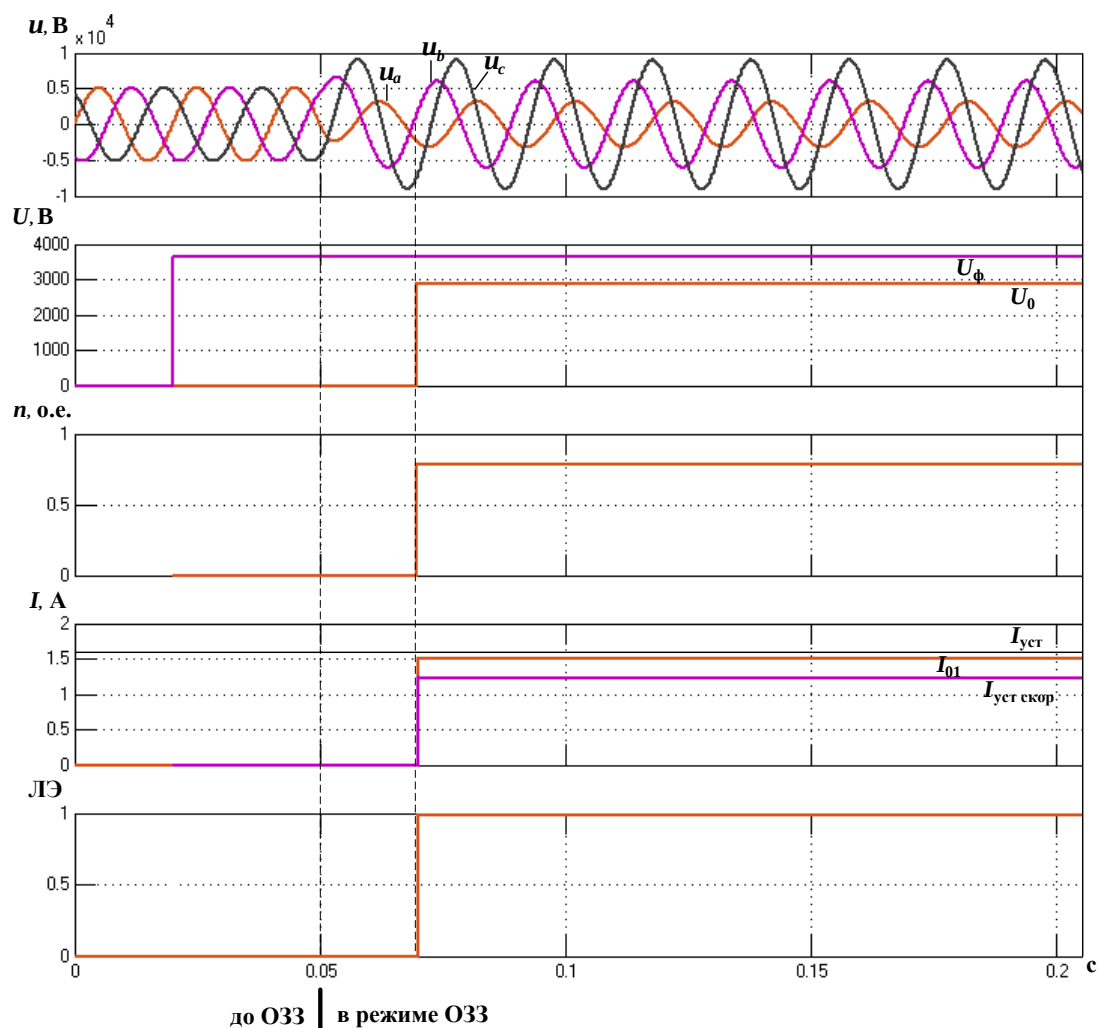


Рисунок 3.20 - Зависимости u_a , u_b , u_c , U_0 , U_ϕ , n , I_{01} , $I_{уст\ скор}$ от времени на поврежденной линии при замыкании на землю через переходное сопротивление

$$R_n^* = 0,14$$

При возникновении однофазного замыкания на землю через переходное сопротивление $R_n^* = 0,14$ (1 кОм) сигнал тока нулевой последовательности защищаемой линии оказывается меньше уставки на срабатывание и возникает

опасность в отказе функционирования защиты (рисунок 3.20). Однако за счет автоматической коррекции уставки по току срабатывания путем снижения ее значения пропорционально коэффициенту неполноты замыкания, сигнал измеренного тока нулевой последовательности превысит скорректированную уставку, что позволит привести к срабатыванию логического элемента защиты.

Из рисунка 3.21 видно, что скорректированная с учетом коэффициента неполноты замыкания уставка на срабатывание индивидуальной защиты на неповрежденном присоединении не приводит к возникновению условий на срабатывание по причине того, что сигнал тока нулевой последовательности неповрежденной линии уменьшится относительно своего значения в режиме металлического замыкания на землю на пропорционально величине p . Учитывая, что оба рабочих сигнала защиты снижаются пропорционально коэффициенту неполноты замыкания, следовательно, их соотношение не изменится в режиме замыкания через переходное сопротивление в сравнении с режимом металлического замыкания на землю, где уставка по току срабатывания отстроена от собственного тока нулевой последовательности защищаемой линии.

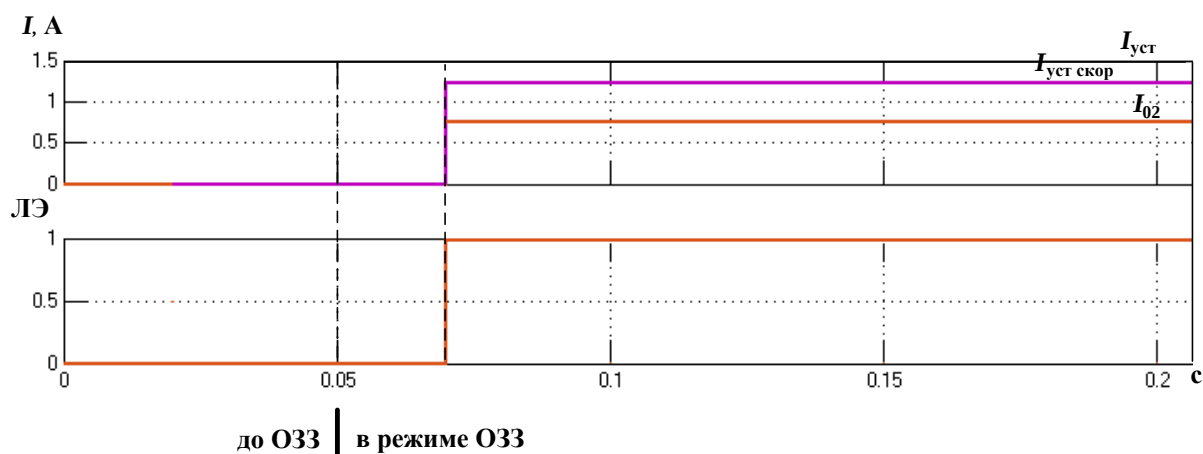


Рисунок 3.21 - Зависимости токов I_{02} , $I_{уст\ скор}$ от времени, протекающих в неповрежденной линии при замыкании на землю через переходное сопротивление

$$R_n^* = 0,14$$

Таким образом, автоматическая коррекция уставки по току срабатывания на неповрежденной линии не приводит к нарушению условий селективности действия защиты.

Быстродействие инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания защищаемой линии, как и варианта с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности, составляет 0,02 с.

В таблицах 3.4, 3.5 и 3.6 представлены данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания при суммарной емкости сети $C_{\Sigma}^* = 0,1$, $C_{\Sigma}^* = 0,5$, $C_{\Sigma}^* = 1$ соответственно и вариации переходного сопротивления в пределах $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$.

Таблица 3.4. Данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания ($C_{\Sigma}^* = 0,1$)

R_n^* , о.е.	U_0 , В	n , о.е.	I_{01} , А	$I_{уст. скор.}$, А	I_{02} , А
0,00014	3640	1	1,98	1,56	0,99
0,071	3365	0,924	1,84	1,44	0,92
0,143	2812	0,773	1,54	1,21	0,77
0,214	2295	0,631	1,25	0,983	0,63
0,286	1893	0,521	1,04	0,811	0,52
0,571	1061	0,291	0,58	0,454	0,29
1	624	0,171	0,34	0,267	0,17

где уставка по току срабатывания, выбранная при условии металлического ОЗЗ:

$$I_{уст} = k_n k_{бр.} I_{л.с. макс.} = 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1,086 = 1,56 \text{ А.}$$

Таблица 3.5. Данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ

коррекцией уставки по току срабатывания ($C_{\Sigma}^* = 0,5$)

R_n^* , о.е.	U_0 , В	n , о.е.	I_{01} , А	$I_{уст.скор.}$, А	I_{02} , А
0,00014	3640	1	10,15	7,31	5,07
0,071	1569	0,431	4,38	3,19	2,19
0,143	846	0,232	2,36	1,726	1,18
0,214	572	0,157	1,59	1,17	0,79
0,286	430	0,119	1,21	0,88	0,61
0,571	220	0,061	0,61	0,44	0,31
1	130	0,036	0,36	0,26	0,17

где уставка по току срабатывания, выбранная при условии металлического ОЗЗ:

$$I_{уст} = k_n k_{бр.} I_{л.с.макс.} = 1,2 \cdot 1,2 \cdot 5,1 = 7,31 \text{ А.}$$

Таблица 3.6. Данные, полученные в результате моделирования защиты от ОЗЗ с

коррекцией уставки по току срабатывания ($C_{\Sigma}^* = 1$)

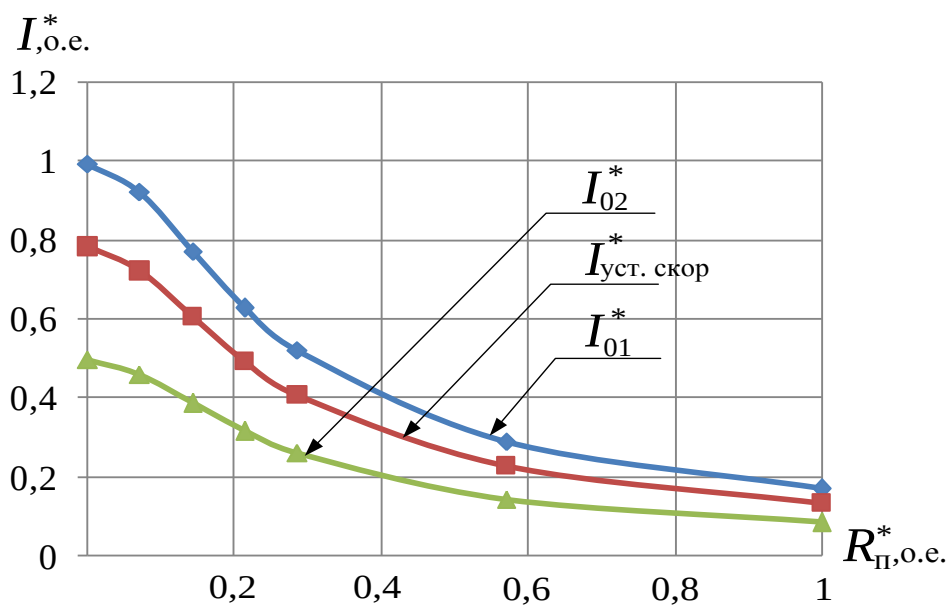
R_n^* , о.е.	U_0 , В	n , о.е.	I_{01} , А	$I_{уст.скор.}$, А	I_{02} , А
0,00014	3640	1	20,21	14,56	10,11
0,071	851	0,234	4,72	3,45	2,36
0,143	435	0,119	2,41	1,76	1,21
0,214	290	0,081	1,62	1,18	0,81
0,286	220	0,061	1,21	0,89	0,61
0,571	117	0,032	0,61	0,45	0,31
1	100	0,027	0,35	0,27	0,17

где уставка по току срабатывания, выбранная при условии металлического ОЗЗ:

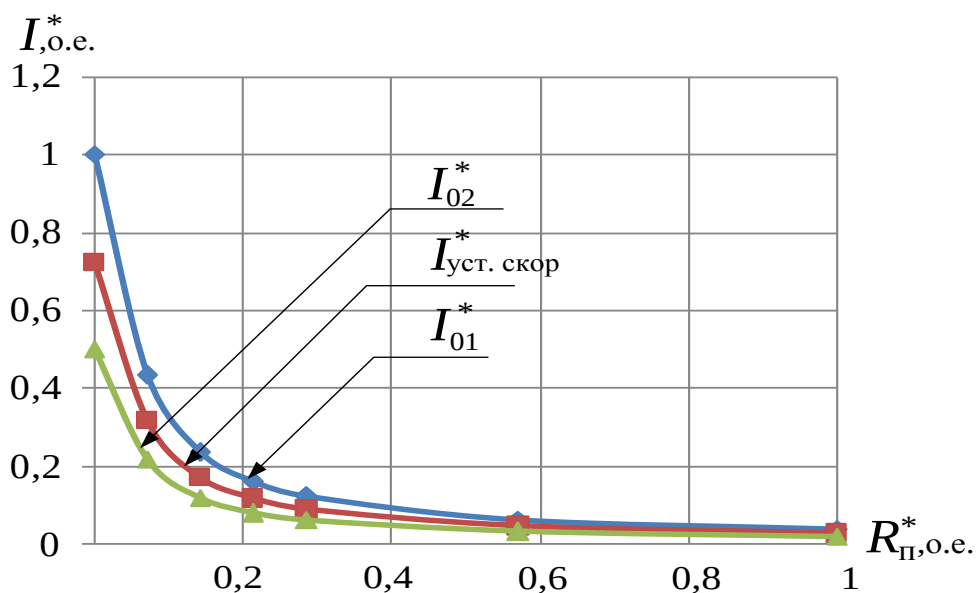
$$I_{уст} = k_n k_{бр.} I_{л.с.макс.} = 1,2 \cdot 1,2 \cdot 10,11 = 14,56 \text{ А.}$$

На рисунке 3.22 представлены зависимости токов нулевой последовательности поврежденной линии I_{01}^* , неповрежденной линии I_{02}^* и

скорректированной уставки по току срабатывания $I_{уст. скор.}^*$ от переходного сопротивления в месте повреждения при различной суммарной емкости сети, построенные с использованием данных таблиц 3.4, 3.5 и 3.6.



а)



б)

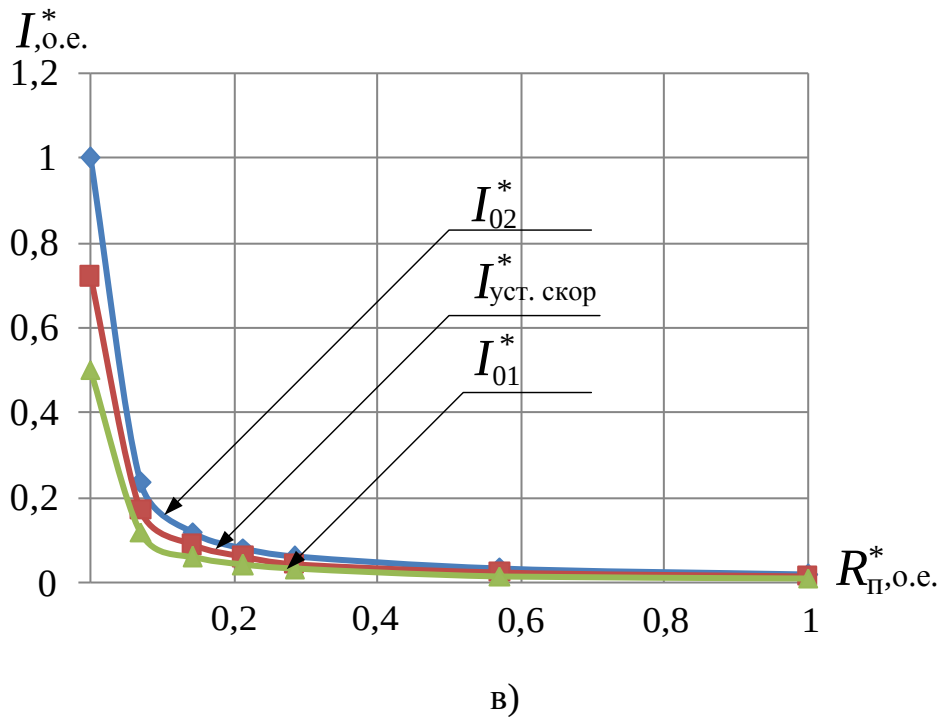


Рисунок 3.22 - Зависимости токов нулевой последовательности поврежденной линии, неповрежденной линии и скорректированной уставки по току срабатывания от переходного сопротивления в месте повреждения:

а) – при $C_\Sigma^* = 0,1$; б) – при $C_\Sigma^* = 0,5$; в) – при $C_\Sigma^* = 1$

Из рисунка 3.22 видно, что увеличение переходного сопротивления в месте ОЗЗ приводит к снижению сигналов токов нулевой последовательности защищаемых линий, что влечет за собой опасность в отказе функционирования защиты от ОЗЗ. Однако за счет алгоритма коррекции уставки по току срабатывания, снижаемой пропорционально степени неполноты замыкания на землю, соотношение между сигналом тока нулевой последовательности и скорректированной уставкой остается неизменным во всем диапазоне вариации параметров контура нулевой последовательности. Согласно рисунку 3.23, на котором представлены зависимости коэффициента чувствительности защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания от переходного сопротивления, значение K_χ остается неизменным при вариации переходного сопротивления и соответствует режиму металлического ОЗЗ. Это позволяет

обеспечить инвариантное действие защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

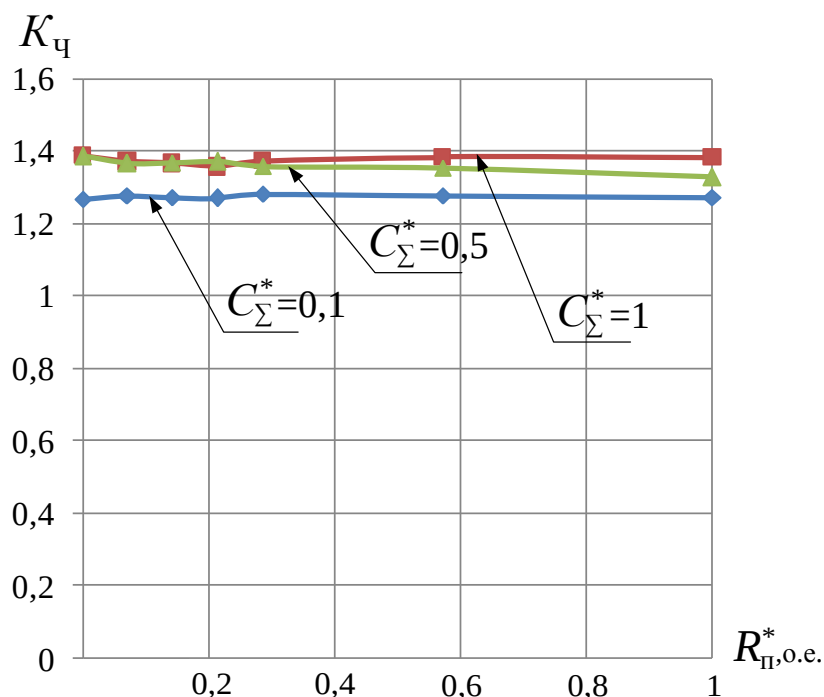


Рисунок 3.23 - Зависимости коэффициента чувствительности инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания от переходного сопротивления

С практической точки зрения вариант исполнения инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности является наиболее рациональным. Это связано с тем, что алгоритм действия инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией уставки по току срабатывания определяет высокие требования к точности обработки измеряемых сигналов, включая напряжение и токи нулевой последовательности защищаемых линий и линейное напряжение сети. Учитывая то, что в режиме замыкания на землю через большие переходные сопротивления уровень помех во входных сигналах защиты возрастает, что обуславливает высокую вероятность возникновения ложного действия защиты от ОЗЗ.

Выводы по главе 3:

1. Выполнена оценка способов коррекции входных параметров защиты от ОЗЗ, включая увеличение сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии и снижение уставки по току срабатывания защиты с учетом степени неполноты замыкания на землю.

2. Разработаны структурно-функциональная и функциональная схема защиты от ОЗЗ, включающая модули вычисления действующих значений тока и напряжения нулевой последовательности, линейного напряжения сети, модуль вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю, модуль определения фазного напряжения сети, модуль коррекции сигнала тока нулевой последовательности, модули логических операций, пусковой орган защиты и алгоритм действия защиты, предусматривающий оценку степени неполноты замыкания на землю и последующую автоматическую коррекцию сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии до значения, соответствующего режиму металлического однофазного замыкания.

3. Разработаны структурно-функциональная и функциональная схема защиты от ОЗЗ, включающая, в отличие от первого варианта, модуль коррекции уставки на срабатывание, а также алгоритм действия защиты, предусматривающий автоматическую коррекцию уставки по току срабатывания с учетом степени неполноты замыкания на землю и позволяющий сохранить неизменность соотношения между сигналом тока нулевой последовательности защищаемой линии и скорректированной уставкой на срабатывание при вариации параметров контура нулевой последовательности.

4. Разработаны компьютерная имитационная модель распределительной сети 6 кВ и модели защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров в среде программирования Matlab Simulink, позволяющие выполнить исследование эффективности действия защиты в условиях вариации параметров контура нулевой последовательности в режиме ОЗЗ. Установлено, что алгоритмы коррекции входных параметров позволяют обеспечить инвариантное действие защиты при вариации параметров контура нулевой последовательности, включая

величину переходного сопротивления в месте повреждения в диапазоне $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$ и суммарную емкость фаз линий относительно земли в пределах $0,01 \leq C_\Sigma^* \leq 1$.

5. Установлено, что коррекция входных сигналов защиты в режиме замыкания на землю через переходное сопротивление, включая сигналы токов нулевой последовательности неповрежденных линий и уставок по току срабатывания, обеспечивает выполнение условий селективности действия защиты и генерацию сигнала на отключение только поврежденной линии.

6. Показано, что автоматическая коррекция входного сигнала защиты от ОЗЗ по току нулевой последовательности защищаемой линии позволяет обеспечить неизменное значение коэффициента чувствительности защиты 1,27 в диапазоне вариации переходного сопротивления $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$ и суммарной емкости сети $0,01 \leq C_\Sigma^* \leq 1$. Время определения действующих значений тока напряжения и токов нулевой последовательности не превышает 0,02 с.

ГЛАВА 4. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИНВАРИАНТНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

4.1. Структурная схема и реализация комплекса инвариантной защиты от ОЗЗ отдельных присоединений

Для экспериментального исследования эффективности действия инвариантной токовой защиты с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии, на основе функциональной схемы на рисунке 3.3, был разработан комплекс защиты от ОЗЗ, структурная схема которого представлена на рисунке 4.1. Представленный комплекс защиты от ОЗЗ может быть использован в качестве индивидуальной защиты каждого отходящего от секции шин присоединения.

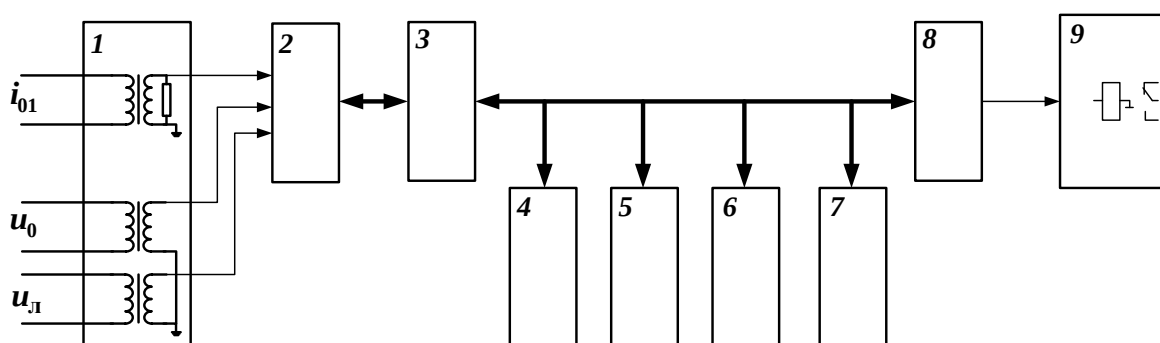


Рисунок 4.1 - Структурная схема аппаратно-программного комплекса
инвариантной защиты от однофазных замыканий на землю

На рисунке 4.1 обозначены: 1 - блок аналоговых входов; 2- аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 3- микропроцессор (МП); 4- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ); 5- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ); 6 - блок управления; 7 - системный интерфейс; 8 - блок логических входов/выходов; 9 – блок выходных реле.

Блок аналоговых входов позволяет осуществлять ввод сигналов от измерительных трансформаторов напряжения и тока нулевой последовательности и представляет собой набор промежуточных трансформаторов напряжения и тока

(ПТН, ПТТ), обеспечивающих согласование уровней входных сигналов с внутренними цепями устройства и гальваническое разделение входных цепей. Номинальный уровень входных сигналов, поступающих на блок аналоговых входов должен составлять для ПТН – 100 В, для ПТТ – 5 А.

Количество промежуточных трансформаторов напряжения и тока в структуре комплекса защиты от ОЗЗ соответствует функциональной схеме инвариантной защиты на рисунке 3.3 и составляет два ПТН по измерительным каналам напряжения для ввода линейного напряжения сети и напряжения нулевой последовательности сети, а также один ПТТ по токовому измерительному каналу – для ввода тока нулевой последовательности защищаемой линии.

Преобразование сигнала с входных аналоговых цепей в цифровой код осуществляется аналого-цифровым преобразователем (АЦП), разрядность которого должна составлять не менее 12 бит для обеспечения высокой точности преобразования сигнала [35]. Снижение влияния высших гармонических составляющих на надежность срабатывания защиты может быть достигнуто с использованием фильтра высших гармоник [79].

Выполнением вычислительно-логических операций, которые предусмотрены в разработанном алгоритме действия защиты, управляет модуль микроконтроллера, содержащий в своем составе: микропроцессор, ПЗУ, ОЗУ, интерфейсы местной связи и связи с верхним уровнем автоматизированной системы управления. В качестве микропроцессора в комплексе инвариантной защиты использовался микропроцессор ATmega8 (рисунок 4.2) фирмы Atmel AVR [20].

Микроконтроллер выполняет следующие основные функции:

- обработку измеренных величин в соответствии с алгоритмом действия защиты;
- формирование выходных управляющих сигналов с помощью блока логических выходов;
- выполнение вычислительно-логических операций, которые предусмотрены в разработанном алгоритме действия защиты;

- управление интерфейсами связи.



Рисунок 4.2 - Внешний вид микропроцессора ATmega8

Блок выходных реле предназначен для управления коммутационными аппаратами, установленными на защищаемых линиях и цепях сигнализации.

Блока управления, осуществляющий конфигурирование работы защиты и отображение текущего ее состояния, содержит в своем составе:

- графический мини-дисплей, выполняющий функцию отображения вводимых уставок и сигналов состояния аппаратно-программного комплекса защиты;
- клавиатуру, предназначенную для ввода уставок комплекса защиты и проведение контрольных проверок исправности устройства.

На основе структурной схемы и с учетом рекомендаций по разработке аппаратной части комплекса инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности была выполнена его реализация на микропроцессорных элементах (рисунок 4.3).

На рисунке 4.3 обозначены: 1 – ПТТ; 2, 3 – ПТН по каналу линейного напряжения и напряжения нулевой последовательности; 4 – промежуточный трансформатор, необходимый для согласования уровня напряжения питания комплекса защиты; 5 – клавиатура; 6 – графический мини-дисплей; 7 – индикатор состояния контактов выходного реле защиты; 8 – выходное реле защиты.

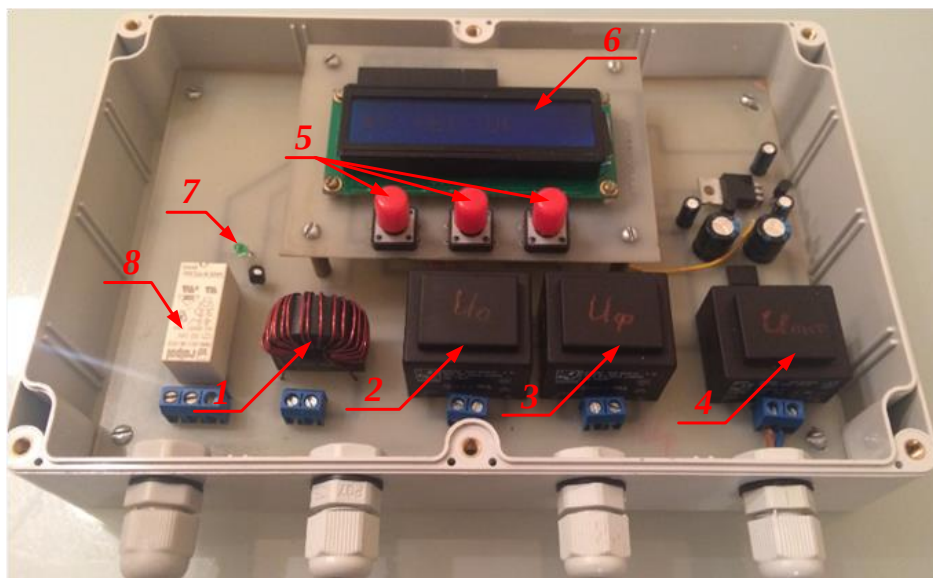


Рисунок 4.3 - Аппаратно-программный комплекс инвариантной защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией сигнала тока нулевой последовательности

Все элементы аппаратно-программного комплекса защиты от ОЗЗ установлены на печатной плате (рисунке 4.4), которая размещена в корпусе из пластмассы и оргстекла, размером 220x150x30 и имеющем класс защиты IP 54.

Питание аппаратно-программного комплекса защиты осуществляется от сети переменного напряжения 220 В, которое при помощи согласующего трансформатора, делителя напряжения и элемента выпрямления преобразуется к уровню, необходимому для работы микропроцессорной части защиты.

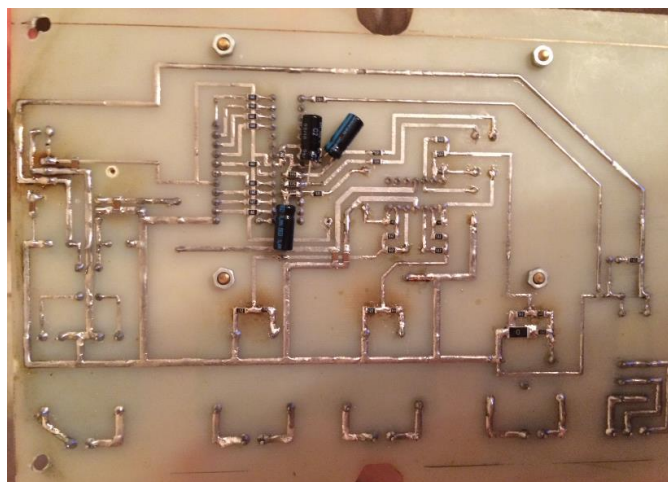


Рисунок 4.4 - Печатная плата аппаратно-программного комплекса защиты

Для разработки программного обеспечения аппаратно-программного комплекса инвариантной защиты от ОЗЗ использовалась система программирования Horizont-Configurator для микропроцессора Atmega 8 на языке FBD (Function Block Diagram) [20]. Разработанная программа комплекса защиты позволяет выполнять все необходимые действия по сбору и обработке данных в соответствии с алгоритмом работы защиты, а также анализ полученных результатов.

Микропроцессор Atmega 8 выполняет логические операции с измеренными величинами, контролируемые для целей защиты в соответствии с разработанным алгоритмом действия. В нормальном режиме работы электрической сети сигнал по напряжению нулевой последовательности, возникающий в результате различного рода несимметрий в сети поступает на пусковой орган, где сравнивается с уставкой на пропускание сигнала. Ввиду того, что уставка по напряжению выбрана исходя из условия отстройки от небалансов, запуск алгоритма коррекции произведен не будет.

При возникновении однофазного замыкания на землю величина сигнала напряжения нулевой последовательности превысит уставку на пропускание сигнала и пусковой орган защиты генерирует управляющий сигнал в виде логической единицы на каналы измерения сигналов фазного напряжения сети и тока нулевой последовательности. Алгоритм действия защиты предусматривает выполнение математических операций, включая вычисление коэффициента неполноты замыкания на землю путем деления сигналов напряжения нулевой последовательности и фазного напряжения сети и вычисление скорректированного сигнала тока нулевой последовательности, вычисленного путем деления сигнала тока нулевой последовательности на величину коэффициента неполноты замыкания на землю. Логический элемент защиты осуществляет операцию сравнения скорректированного сигнала тока нулевой последовательности с величиной сигнала уставки на срабатывание устройства защиты, при превышении которой модуль генерирует сигнал в виде логической единицы в цепи управления и диспетчеризации.



Рисунок 4.5 - Сигнал нарушения целостности вторичных цепей инвариантной защиты от ОЗЗ

Необходимо отметить, что разработанная программа действия защиты предусматривает контроль состояния вторичных цепей устройства защиты и в случае возникновения нарушения целостности подключений генерирует сигнал в виде «НЕТ U_f »(рисунок 4.5).

Разработанный аппаратно-программный комплекс инвариантной защиты от ОЗЗ, реализующий алгоритм автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с учетом степени неполноты замыкания на землю позволяет выполнить экспериментальные исследования инвариантности действия защиты в условиях вариации переходного сопротивления в месте повреждения.

4.2. Исследование инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты отдельных присоединений в условиях вариации переходного сопротивления в месте повреждения

Оценка инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты от ОЗЗ при различной степени неполноты замыкания на землю проводились на физической модели сети, структурная схема которой представлена на рисунке 4.6.

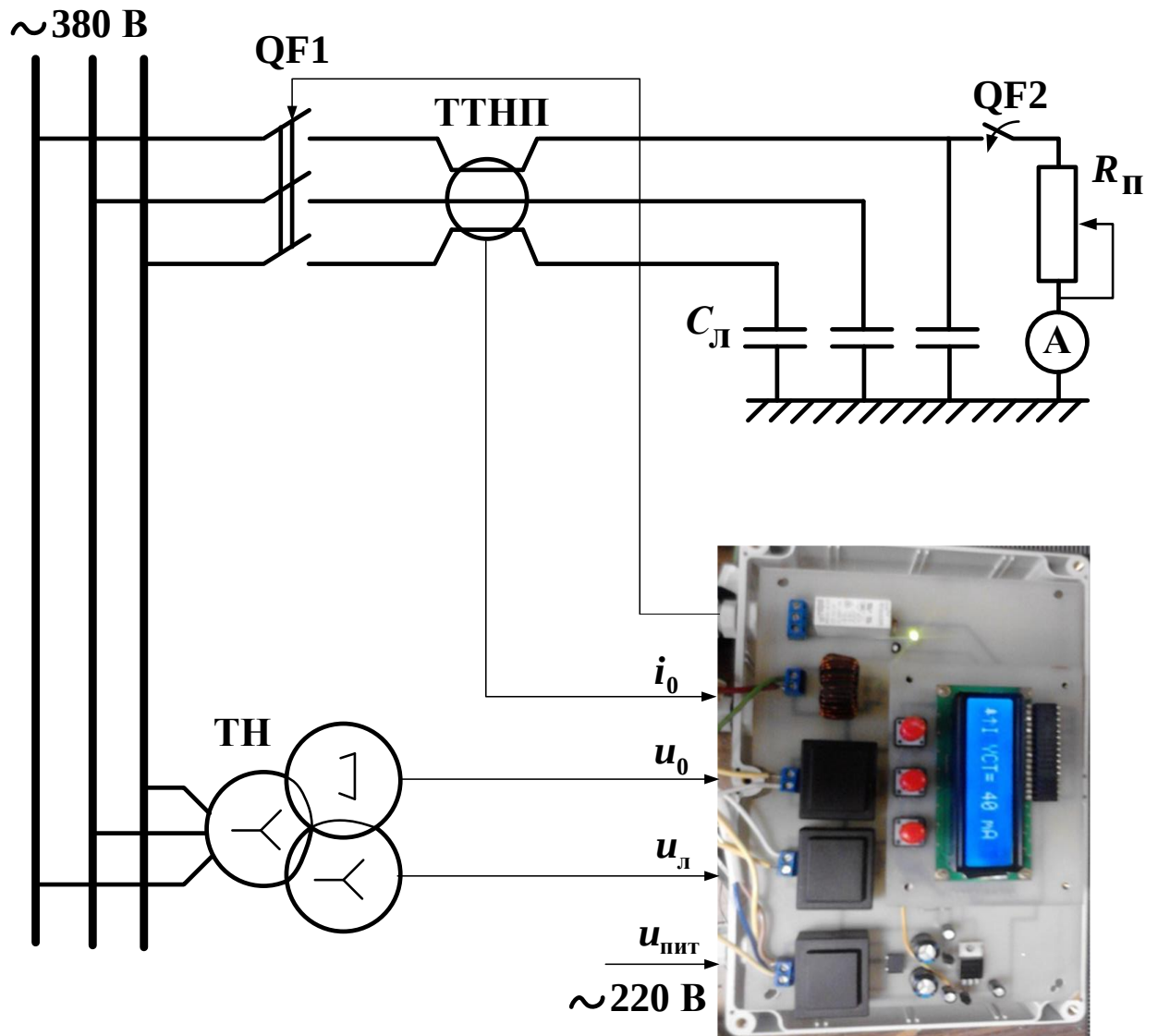


Рисунок 4.6 - Структурная схема физической модели сети с аппаратно-программным комплексом инвариантной защиты от ОЗЗ

Из рисунка 4.6 видно, что физическая модель сети содержит:

- трехфазный источник питания с изолированной нейтралью напряжением 380 В;
- одну отходящую линию, емкости которой представлены сосредоточенными параметрами относительно земли;
- коммутационную аппаратуру: выключатель QF1 и ключ QF2 для имитации режима ОЗЗ;
- измерительную аппаратуру: измерительный трансформатор напряжения ТН — для контроля линейного напряжения и напряжения нулевой

последовательности сети, трансформатор тока нулевой последовательности (ТТНП) и амперметр А для контроля тока ОЗЗ;

- активное сопротивление R_n переменной величины.

Экспериментальные исследования инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты в условиях вариации переходного сопротивления в месте повреждения выполнялись следующим образом. На основе анализа емкостей $C_{\text{Л}}$ отходящей линии был определен ток замыкания на землю в режиме металлического ОЗЗ, значение которого с учетом коэффициента трансформации ТТНП составило 160 мА, что позволило выбрать уставку на срабатывание аппаратно-программного комплекса защиты.

В цепь контура тока замыкания на землю вводилось переходное сопротивление R_n , варьируемое в диапазоне $0,00014 \leq R_n^* \leq 0,24$, и регистрировались основные сигналы, характеризующие работу комплекса защиты [53, 54, 57]. Результаты измерений представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Экспериментальные данные, полученные на физической модели сети в результате исследований инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты от ОЗЗ

U_0, B	$I_3^{(1)}, A$	$R_n^*, \text{о.е.}$	I_0, mA	n	$I_{\text{оскор.}}, mA$
110	4,8	0,00014	160	1	160
101	4,4	0,027	146	0,92	159
97	4,2	0,047	141	0,88	161
89	3,9	0,068	129	0,81	160
83	3,6	0,097	119	0,75	159
67	2,9	0,133	98	0,61	161
39	1,7	0,23	55	0,35	159

где $I_3^{(1)}$ - ток однофазного замыкания на землю;

I_0 - ток нулевой последовательности защищаемой линии с учетом коэффициента трансформации ТТНП.

На рисунке 4.7 представлены зависимости скорректированного сигнала тока нулевой последовательности и тока нулевой последовательности защищаемой линии от переходного сопротивления в месте повреждения. Из рисунка 4.7 следует, что с увеличением переходного сопротивления в месте ОЗЗ ток нулевой последовательности защищаемой линии (экспериментальная характеристика) снижается до значений, при которых не обеспечивается селективное действие токовых защит от замыканий на землю. Однако алгоритм коррекции входных параметров, реализованный в аппаратно-программном комплексе защиты, позволяет осуществить оценку степени неполноты замыкания на землю и последующую автоматическую коррекцию сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии до уровня, соответствующего режиму металлического однофазного замыкания (характеристика скорректированного тока $I_{0\text{скор}}^*$), и обеспечить неизменность его значения в условиях вариации переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

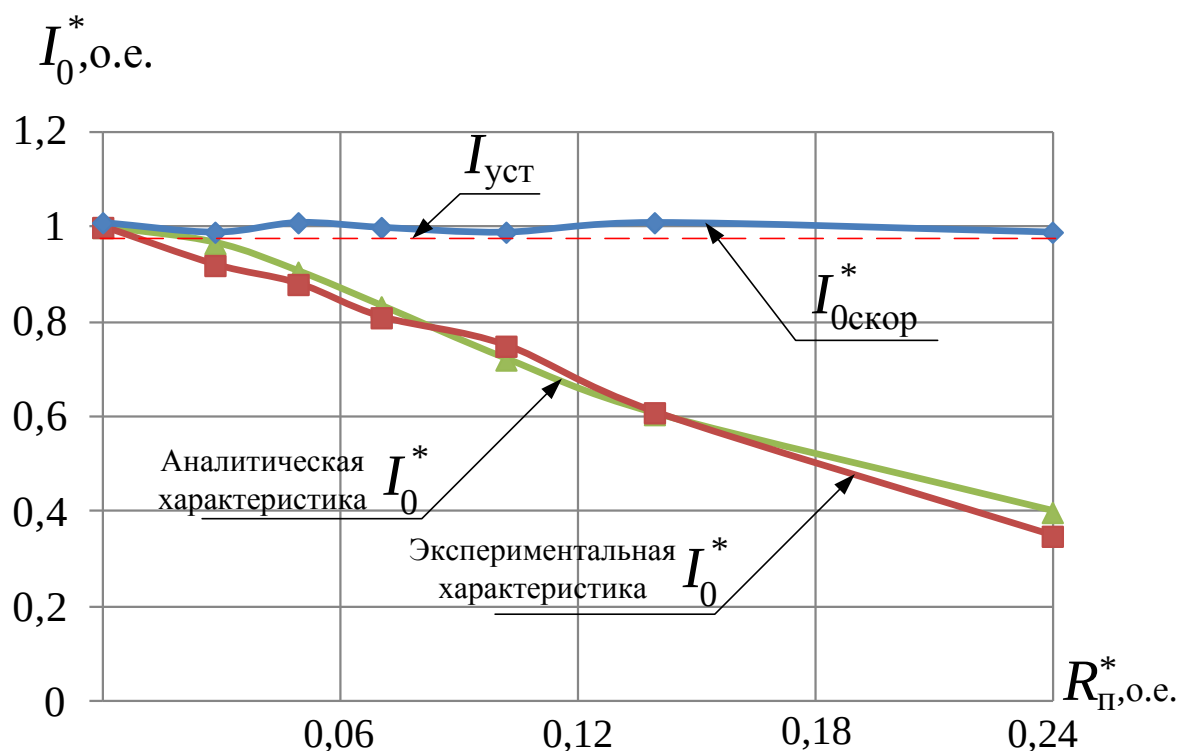


Рисунок 4.7 - Зависимости сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии и скорректированного тока нулевой последовательности от переходного сопротивления в месте ОЗЗ

Сравнение экспериментальной характеристики с аналитической, построенной с использованием выражения (2.17) позволяет оценить достоверность выполненного экспериментального исследования. Сходимость результатов моделирования и эксперимента не ниже 90 %.

Выполненные экспериментальные исследования инвариантности действия при вариации переходного сопротивления в контуре нулевой последовательности позволяют сделать вывод о том, что алгоритм коррекции сигнала тока нулевой последовательности в соответствии со степенью неполноты замыкания на землю обеспечивает неизменность действия аппаратно-программного комплекса защиты от ОЗЗ.

4.3. Разработка аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от однофазных замыканий

В аппаратно-программном комплексе инвариантной защиты от ОЗЗ может быть реализован принцип групповой защиты отходящих от секции шин присоединений.

На рисунке 4.8 представлена схема распределительной сети с аппаратно-программным комплексом групповой инвариантной защиты от однофазных замыканий на землю, где обозначены: ТЗН – трансформатор заземления нейтрали; ТН – измерительный трансформатор напряжения; QF1, QF2...QFk – автоматические выключатели линий 1, 2 ...k; ТТНП, ТТНП2...ТТНПк – трансформаторы тока нулевой последовательности; R_{π} – переходное сопротивление в месте повреждения; R_N – сопротивление заземляющего резистора; I_{01} – ток нулевой последовательности поврежденной линии; I_{02} – ток нулевой последовательности неповрежденной линии; I_{0k} – ток нулевой последовательности k – ой неповрежденной линии; U_0 – напряжение нулевой последовательности сети; U_{π} – линейное напряжение сети.

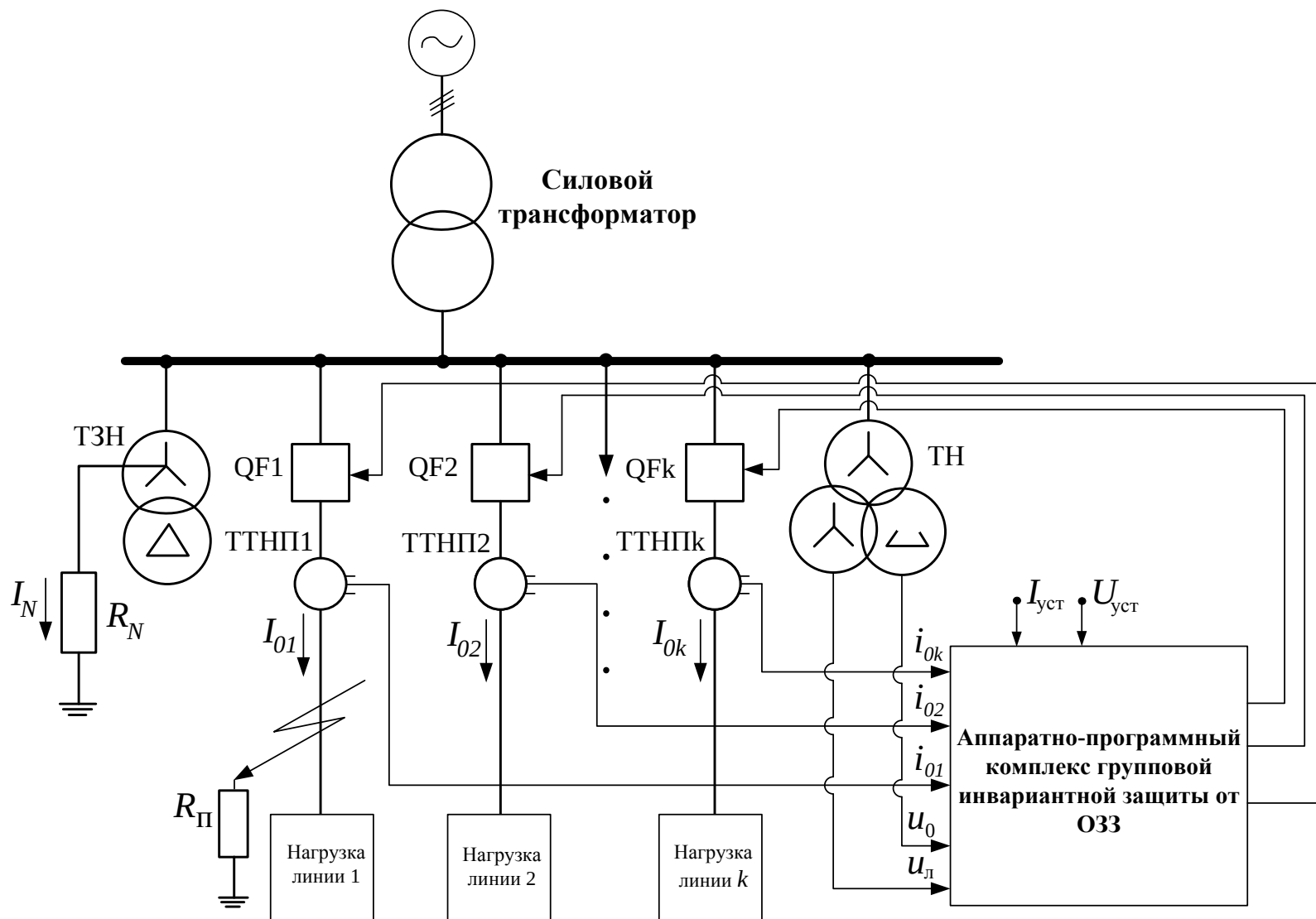


Рисунок 4.8 - Схема распределительной сети с аппаратно-программным комплексом групповой инвариантной защиты от однофазных замыканий на землю

Согласно рисунку 4.8 на входы аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ поступают сигналы мгновенных значений токов нулевой последовательности i_{01} , i_{02} , i_{0k} и мгновенных значений напряжений нулевой u_0 последовательности и линейного напряжения сети $u_{\text{л}}$. Кроме того, входными сигналами аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты являются уставки по току срабатывания и напряжению нулевой последовательности. Уставка на срабатывание защиты $I_{\text{уст}}$ выбирается для всех присоединений сети одинаковой по выражению (2.21).

Функциональная схема аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ с учетом рисунка 3.3 представлена на рисунке 4.9, из которого следует, что комплекс защиты содержит в своем составе модуль вычисления действующих значений измеренных мгновенных величин токов нулевой последовательности защищаемых линий i_{01} , i_{02} , i_{0k} , напряжения нулевой последовательности u_0 и линейного напряжения сети $u_{\text{л}}$, представленный отдельными функциональными блоками RMS на каждом измерительном канале защиты; пороговый (пусковой) орган защиты ПО с заданной уставкой $U_{\text{уст}}$ на пропускание сигнала по напряжению нулевой последовательности U_0 ; модуль вычисления фазного напряжения сети МВФ, реализующий операцию $U_{\text{л}}/\sqrt{3}$; модуль вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю МВН, функционирующий в соответствии с выражением (3.3); модули МКТ1, МКТ2, МКТ3 автоматической коррекции измеренных сигналов тока нулевой последовательности I_{01} , I_{02} , I_{0k} защищаемых линий, функционирующие в соответствии с выражением (3.4); логические элементы защиты, выполняющий функцию сравнения скорректированных сигналов токов нулевой последовательности всех защищаемых линий с уставкой на срабатывание.

Согласно представленному на рисунке 4.10 алгоритму действия аппаратно-программный комплекс групповой инвариантной защиты от ОЗЗ выполняет непрерывное измерение величины действующего значения напряжения нулевой последовательности, которое сигнализирует о появлении в сети однофазного

замыкания на землю. Пороговый орган защиты выполняет операцию сравнения величины U_0 с уставкой на пропускание сигнала $U_{уст}$, выбранной исходя из отстройки от различного рода небалансов в электрической сети. Если выполняется условие $U_0 \geq U_{уст}$, то пороговый орган защиты пропускает сигнал по напряжению нулевой последовательности, что является признаком для запуска системы автоматической коррекции.

Модуль МВН позволяет вычислять коэффициент неполноты замыкания на землю. Модули коррекции токов нулевой последовательности осуществляют операцию деления сигналов токов нулевой последовательности защищаемых присоединений на величину коэффициента неполноты замыкания на землю, тем самым повышая их до значения соответствующего металлическому замыканию. Логические элементы защиты выполняют операции сравнения скорректированных токов нулевой последовательности $I_{01\text{скор}}$, $I_{02\text{скор}}$, $I_{0\text{кскор}}$ с уставкой на срабатывание защиты $I_{уст}$ по каждому присоединению и в случае, превышения уставки на срабатывание генерируют сигнал на отключение поврежденной линии.

Сигнал тока нулевой последовательности поврежденного присоединения, определяемый суммарным током нулевой последовательности всех отходящих от секции шин неповрежденных линий за вычетом собственного тока нулевой последовательности превысит выбранную уставку, что приведет к срабатыванию логического элемента по каналу поврежденной линии. Учитывая, что в режиме замыкания на землю через переходное сопротивление алгоритм коррекции сигналов токов нулевой последовательности с учетом степени неполноты замыкания позволит повысить уровень сигналов тока всех присоединений до значений, соответствующих режиму металлического замыкания на землю, когда условия селективного действия в результате правильного выбора уставки на срабатывание выполняются, разработанный аппаратно-программный комплекс групповой инвариантной защиты от ОЗЗ позволит селективно выявлять поврежденное присоединение.

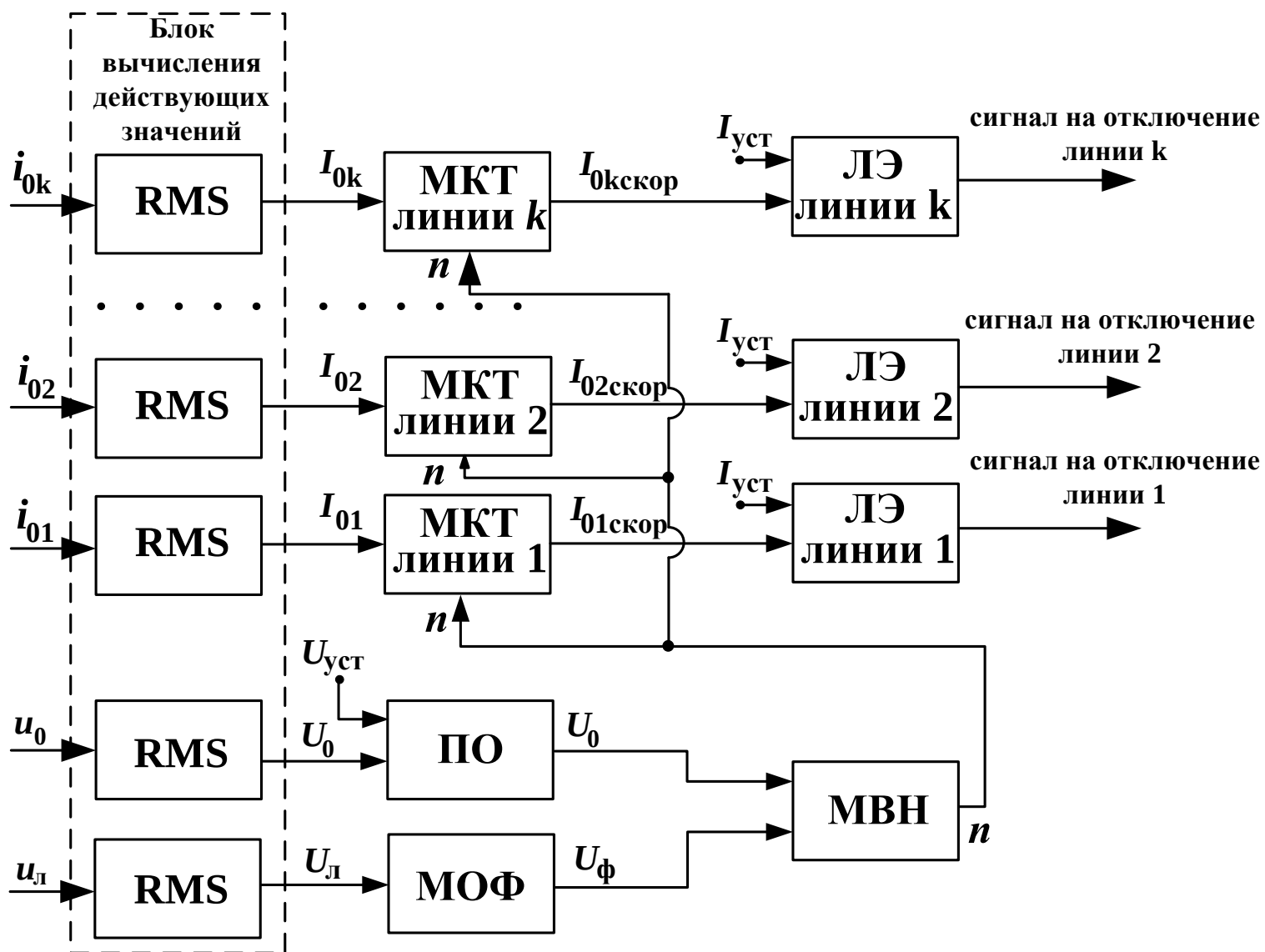


Рисунок 4.9 - Функциональная схема аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ

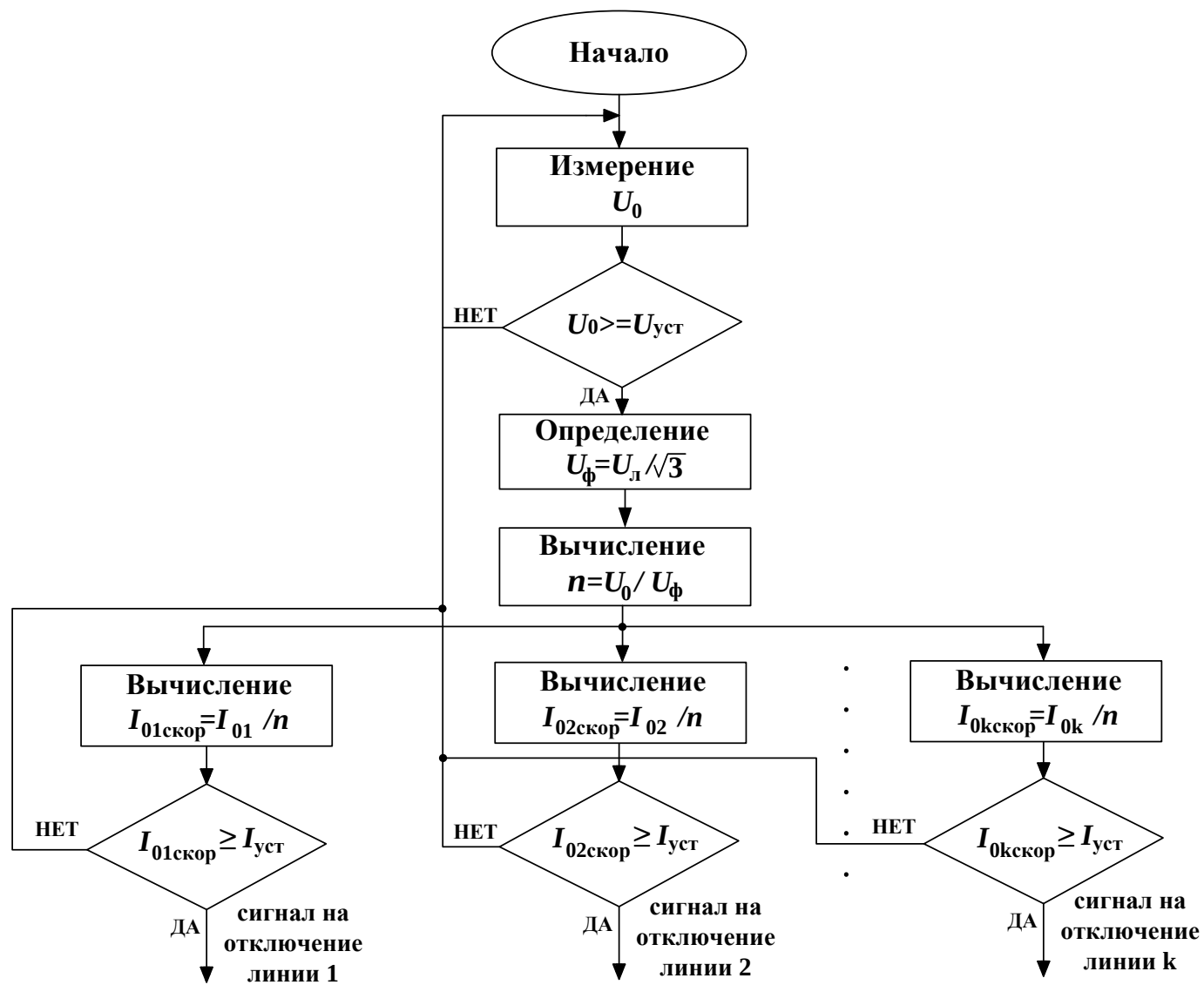


Рисунок 4.10 - Алгоритм действия аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ

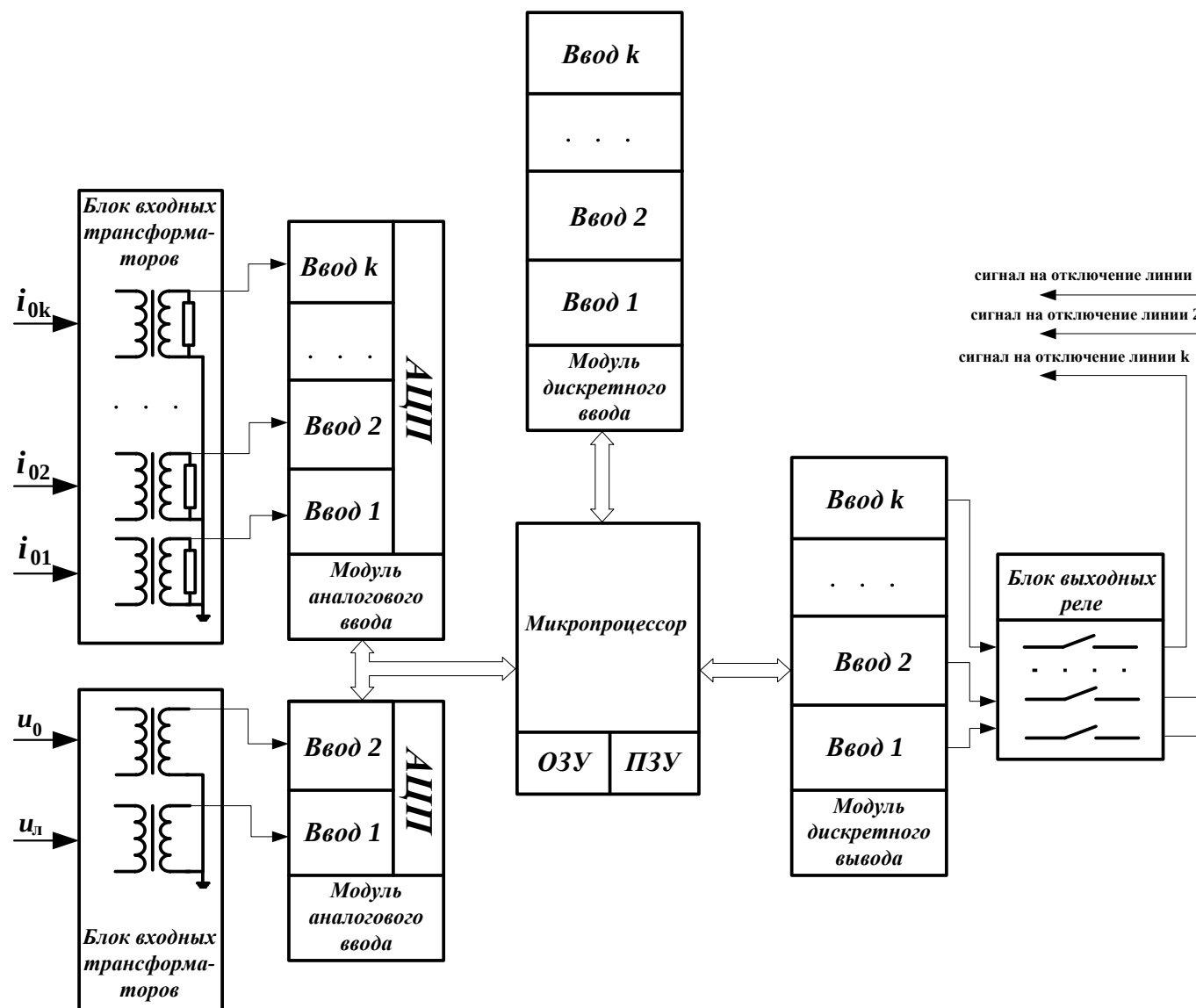


Рисунок 4.11 - Структурная схема аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ

Селективность действия аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ обеспечивается тем, что в режиме металлического замыкания на землю выбранная уставка по току срабатывания отстроена от сигналов токов нулевой последовательности неповрежденных линий, что позволяет исключить ложное действие логических элементов по каналам защиты неповрежденных линий.

Согласно структурной схеме, представленной на рисунке 4.11, аппаратно-программный комплекс групповой инвариантной защиты от ОЗЗ должен содержать блок входных трансформаторов, осуществляющих преобразование входных сигналов до уровней, соответствующих пороговым значениям по каналам микроконтроллера; модули аналогового ввода, содержащие аналого-цифровые преобразователи по всем каналам тока и напряжения; модули дискретного ввода, необходимые для выставления уставок на срабатывание защиты; модули дискретного вывода и блок выходных реле.

Разработанные функциональная схема и алгоритм действия аппаратно-программного комплекса групповой инвариантной защиты от ОЗЗ для электрических сетей с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью, позволят выполнить селективную идентификацию поврежденного присоединения в распределительной сети, инвариантность действия в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

4.4. Анализ чувствительности действия инвариантной защиты от замыканий на землю

Чувствительность действия инвариантной защиты с автоматической коррекцией входных параметров определяется уставкой по напряжению нулевой последовательности порогового органа защиты, основная функция которого исключить влияние небалансов по напряжению нулевой последовательности, возникающих в электрической сети в нормальном режиме работы, которые приводят к ложному срабатыванию защиты. Под небалансом в защите от однофазных замыканий на землю понимается рабочий сигнал, поступающий в

измерительные цепи устройства защиты при отсутствии ОЗЗ в сети. Согласно методике определения небалансов в электрических сетях 6-35 кВ, небалансы в защите от ОЗЗ можно разделить на две группы [1, 10, 88]:

- небалансы, возникающие вследствие различных процессов в сети, которые можно разделить на длительно присутствующие в сети и кратковременно появляющиеся и исчезающие [78];

- небалансы, связанные с погрешностями измерительной аппаратуры.

Уставка пускового (порогового) органа по напряжению инвариантной защиты от ОЗЗ выбирается по выражению [78]:

$$U_{уст} \geq k_H (U_{нб.ТН} + U_{нб.ЭДС} + U_{нб.нес.} + U_{нб.смещ.} + U_{нб.смеж.} + U_{нб.нагр.}), \quad (4.1)$$

где $k_H = 1,5$ - коэффициент надежности [80, 82];

$U_{нб.ЭДС}$ - небаланс, возникающий в результате несимметрии фазных ЭДС источника питания;

$U_{нб.нес.}$ - небаланс, возникающий в результате несимметрии сопротивлений фаз относительно земли;

$U_{нб.смещ.}$ - небаланс, связанный со смещением нейтрали сети из-за влияния двухцепных воздушных линий;

$U_{нб.смеж.}$ - небаланс, вызванный влиянием смежного напряжения;

$U_{нб.нагр.}$ - небаланс, вызванный несимметрией фазных нагрузок.

Проверка чувствительности инвариантной защиты с автоматической коррекцией входных параметров должна производиться с расчетом того максимального переходного сопротивления в месте ОЗЗ, при котором значение напряжения нулевой последовательности сможет превысить уставку порогового органа защиты. Расчет максимального переходного сопротивления в месте ОЗЗ, при котором защита способна селективно выявлять поврежденное присоединение необходимо проводить в режиме, когда количество включенных в нейтраль сети заземляющих резисторов является минимальным; в работе находится только одна

линия, на которой установлена проверяемая защита; коэффициент чувствительности вычисляется в режиме металлического ОЗЗ.

Проверять чувствительность пускового органа защиты по напряжению нулевой последовательности с учетом (2.31) следует по выражению:

$$R_n = \frac{\sqrt{\lambda^2 d_N^2 9\omega^2 C_\Sigma^2 - 9\omega^2 C_\Sigma^2 \cdot (\lambda^2 d_N^2 + 1) \cdot (1 - K_{\text{чмет}}^2)} - \lambda d_N 3\omega C_\Sigma}{9\omega^2 C_\Sigma^2 \cdot (\lambda d_N + 1)}, \quad (4.2)$$

где $K_{\text{чмет.}} = \frac{U_\phi}{U_{\text{уст}}}$ - коэффициент чувствительности защиты по каналу напряжения в режиме металлического ОЗЗ [78].

Выбор уставки пускового органа защиты основывается на выражении (4.1), а оценка величины максимального переходного сопротивления, при замыкание через которое защита способна селективно выявлять поврежденное присоединение определяется по выражению (4.2). На практике величина уставки пусковых органов направленных защит составляет 10-15% от U_ϕ [9, 64]. Например, если принять величину уставки пускового органа аппаратно-программного комплекса защиты 10 % от значения фазного напряжения сети, то коэффициент чувствительности защиты по каналу напряжения в режиме металлического ОЗЗ $K_{\text{чмет.}} = 100 / 10 = 10$.

Для определения максимальных переходных сопротивлений, при замыкании через которые величина напряжения нулевой последовательности превысит уставку пускового органа защиты необходимо выявить зоны предельного снижения коэффициента неполноты замыкания на землю.

На рисунке 4.12 представлены зависимости коэффициента неполноты замыкания на землю от переходного сопротивления в месте ОЗЗ при различной суммарной емкости сети.

Из рисунка 4.12 следует, что в сети с изолированной нейтралью и суммарной емкостью $C_\Sigma^* = 0,5$ максимальное значение переходного сопротивления, при замыкании через которое напряжение нулевой последовательности сети превысит уставку порогового органа защиты, что

позволит запустить алгоритм коррекции действия защиты составит $R_n^* = 0,39$, при суммарной емкости сети $C_\Sigma^* = 1 - R_n^* = 0,18$.

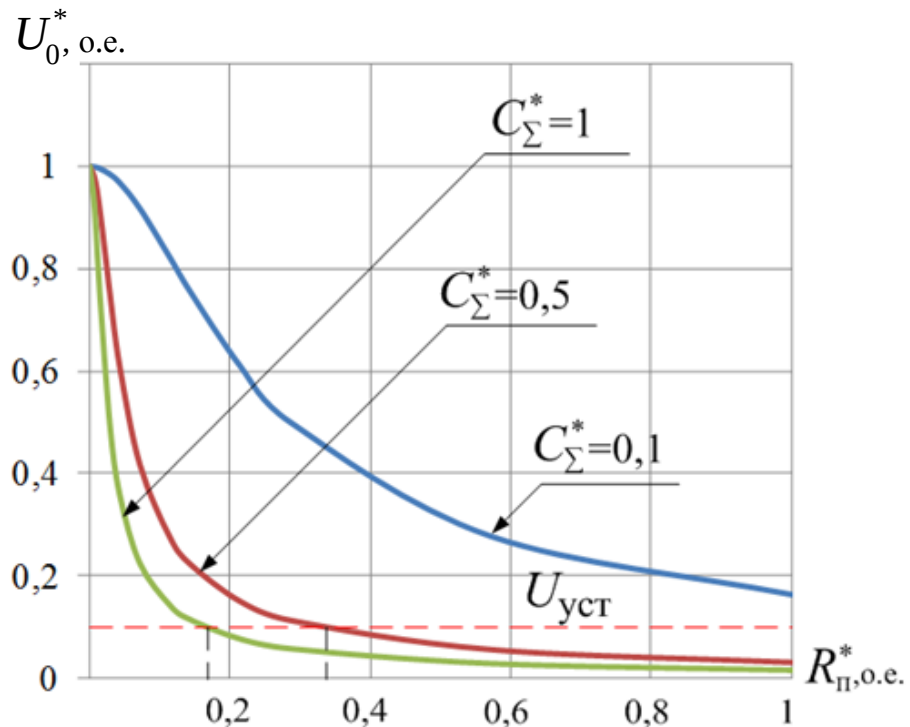


Рисунок 4.12 - Зависимости напряжения нулевой последовательности от переходного сопротивления в месте ОЗЗ при различной суммарной емкости сети

При снижении величины уставки по напряжению нулевой последовательности значения переходных сопротивлений, при замыкании через которые инвариантная защита будет работоспособна, повысятся. Однако снижение значения уставки порогового органа защиты связано с опасностью ложных срабатываний защиты в нормальном режиме работы сети и возникновении небалансов.

Таким образом, использование пускового органа защиты, выполняющего функцию помехозащиты от небалансов в электрической сети с целью исключения ложных срабатываний, понижает чувствительность инвариантной защиты к ОЗЗ через большие переходные сопротивления особенно в сетях с относительно высокой емкостью фаз относительно земли.

Однако обеспечить высокую селективность и чувствительность действия инвариантной токовой защиты от ОЗЗ в условиях непостоянства конфигурации и высокой неоднородности распределительных сетей не всегда представляется возможным. Для устойчивого функционирования инвариантной защиты от ОЗЗ в групповом исполнении необходимо соблюдение условий, при которых значение суммарного емкостного тока сети, протекающего по поврежденному присоединению, превышало значения собственных емкостных токов неповрежденных линий в несколько раз.

Выбор уставок токовой защиты от ОЗЗ, как было отмечено в главе 2, основывается на двойном неравенстве:

$$\frac{I_{C\Sigma} - I_{л.с.}}{K_q} \geq I_{уст} \geq K_n K_{бр} \cdot I_{л.с.} \quad (4.3)$$

С учетом (4.3) условие применимости инвариантной токовой защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью [2, 66, 77]:

$$\frac{I_{л.с.}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{k_q k_n k_{бр} + 1} \quad (4.4)$$

Подставив в (4.4) значения коэффициентов чувствительности, надёжности и броска получим, что допустимый коэффициент долевого участия линии с собственным емкостным током в суммарном токе сети будет составлять:

$$\frac{I_{л.с.}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,5 + 1} \leq 0,27, \quad (4.5)$$

т.е. предельное значение коэффициента долевого участия линии с собственным емкостным током в суммарном токе должно составлять не более 27% в сетях с воздушными линиями.

В кабельных сетях условие применимости инвариантной защиты от ОЗЗ:

$$\frac{I_{л.с.}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1,25 \cdot 1,2 \cdot 1,5 + 1} \leq 0,31, \quad (4.6)$$

т.е. предельное значение коэффициента долевого участия линии с собственным емкостным током в суммарном токе должно составлять не более 31% в сетях с кабельными линиями.

Для сети с высокоомным заземлением нейтрали при равенстве активного тока резистора емкостному току сети условие применимости инвариантной защиты от ОЗЗ имеет вид:

$$\frac{I_{л.с.}}{I_{с\sum}} \leq \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{(k_q k_n k_{\sigma p})^2}{2}}}. \quad (4.7)$$

С учетом (4.7) условие применимости защиты в сетях с резистивным заземлением нейтрали, содержащих только кабельные линии:

$$\frac{I_{л.с.}}{I_{с\sum}} \leq \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{(1,25 \cdot 1,5 \cdot 1,2)^2}{2}}} \leq 0,35. \quad (4.8)$$

Из выражения (4.8) следует, что предельное значение коэффициента долевого участия собственного тока линии в общем токе сети может составлять не более 35% в сетях с резистивным заземлением нейтрали с кабельными линиями.

Выводы по главе 4:

1. Разработана структурная схема и аппаратная реализация комплекса инвариантной защиты от ОЗЗ отдельных присоединений, который содержит блок входных трансформаторов, предназначенный для согласования сигналов вторичных цепей защиты и микроконтроллера, микропроцессорные элементы, выполняющие функции преобразования и обработки измеренных сигналов в соответствии с заложенным алгоритмом действия, модуль задания уставок на срабатывание защиты и выходное реле, предназначенное для генерации дискретного сигнала в цепи управления и диспетчеризации.

2. В результате экспериментальных исследований инвариантности действия аппаратно-программного комплекса защиты от ОЗЗ отдельных присоединений установлено, что алгоритм автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с учетом степени неполноты замыкания позволяет обеспечить неизменность рабочего сигнала защиты при вариации переходного сопротивления в месте повреждения, что подтверждает неизменность характеристик срабатывания защиты в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

3. Разработана функциональная схема и алгоритм действия аппаратно-программного комплекса групповой защиты от ОЗЗ для электрических сетей с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью, позволяющего селективно выявлять поврежденное присоединение в условиях ОЗЗ через переходные сопротивления.

4. Выявлено, что аппаратно-программный комплекс инвариантной защиты от ОЗЗ при условии выбора уставки по напряжению нулевой последовательности 10% от фазного напряжения в сети с суммарной емкостью $C_{\Sigma}^* = 0,5$ позволяет селективно выявлять поврежденное присоединение при предельном значении переходного сопротивления в месте ОЗЗ $R_n^* = 0,39$, при суммарной емкости сети $C_{\Sigma}^* = 1 - R_n^* = 0,18$.

5. Установлено, что обеспечение селективного действия комплекса групповой защиты от ОЗЗ в условиях неоднородности поперечных параметров отдельных присоединений, когда коэффициент долевого участия линии с собственным емкостным током превышает 27 % от суммарного емкостного тока сети, не представляется возможным. В этом случае для обеспечения селективности действия необходимо корректировать топологию системы электроснабжения или (и) оснащать отдельные присоединения индивидуальными комплексами инвариантной защиты от ОЗЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научно-технической задачи повышения селективности и инвариантности действия защиты от однофазных замыканий на землю в электротехнических комплексах 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью в условиях непостоянства параметров контура нулевой последовательности.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выявлены зависимости напряжения и токов нулевой последовательности защищаемых линий сети с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью от параметров контура нулевой последовательности, включая поперечные проводимости фаз линий относительно земли, переходное сопротивление в месте повреждения, параметры системы заземления нейтрали, позволяющие оценить степень неполноты замыкания на землю и ее влияние на чувствительность действия защиты от однофазных замыканий на землю.

2. Установлено, что при вариации переходного сопротивления в месте повреждения в диапазоне $0,00014 \leq R_n^* \leq 1$ (1-7000 Ом) и коэффициенте чувствительности защиты от ОЗЗ в режиме металлического замыкания $K_{\text{ч}}=2$ в сети с изолированной нейтралью и суммарной емкостью $C_{\Sigma}^* = 0,1$ (0,92 мкФ) токовые защиты от однофазных замыканий на землю позволяют селективно выявлять поврежденное присоединение при переходном сопротивлении в месте замыкания не более $R_n^* = 0,24$ (1680 Ом). Показано, что за счет увеличения доли активной составляющей тока заземляющего резистора в токе нулевой последовательности поврежденной линии возможно увеличить зону селективного действия защиты до $R_n^* = 0,27$.

3. Разработана методика определения чувствительности действия защиты от ОЗЗ при замыканиях на землю через переходные сопротивления, позволяющая выполнить оценку необходимого уровня коррекции входных параметров защиты в зависимости от степени неполноты замыкания на землю.

4. Разработаны алгоритмы инвариантного действия защиты от ОЗЗ, предусматривающие автоматическую коррекцию входных параметров, включая сигналы тока нулевой последовательности защищаемых линий и уставки по току срабатывания, обеспечивающие селективное выявление поврежденного присоединения в условиях неполных замыканий на землю, как в индивидуальном исполнении защиты, так и в групповом.

5. В результате исследований с использованием имитационных моделей защиты от ОЗЗ с автоматической коррекцией входных параметров в среде программирования Matlab Simulink доказано, что при вариации параметров контура нулевой последовательности в пределах, указанных в п. 2 выводов, обеспечивается инвариантность действия защиты по отношению к переходному сопротивлению в месте ОЗЗ.

6. Разработан аппаратно-программный комплекс защиты от ОЗЗ, экспериментальные исследования инвариантности действия которого показали, что алгоритм автоматической коррекции сигнала тока нулевой последовательности защищаемой линии с учетом степени неполноты замыкания обеспечивает неизменность рабочего сигнала защиты и независимость характеристик срабатывания при вариации переходного сопротивления в месте повреждения.

7. Разработаны рекомендации по выбору уставок на срабатывание аппаратно-программного комплекса защиты от однофазных замыканий, согласно которым при условии выбора уставки по напряжению нулевой последовательности 10% от фазного напряжения в сети с суммарной емкостью $C_{\Sigma}^* = 0,5$ селективное выявление поврежденного присоединения возможно при предельном переходном сопротивлении в месте ОЗЗ $R_n^* = 0,39$, а при суммарной емкости сети $C_{\Sigma}^* = 1 - R_n^* = 0,18$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Релейная защита ВЛ с изолированными и защищенными проводами: учебное пособие / Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, А.М. Сергеев, М.А. Шабад. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2000. – 41 с.
2. Абрамович, Б.Н. Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // Записки Горного института. – 2016. – т. 217 - С. 132-139.
3. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебное пособие / В.А. Андреев – М.: Высшая школа, 1991.-496 с.
4. Андреев, В.А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения: учебник для вузов / В.А. Андреев, Е.В. Бондаренко: под ред. В. А. Андреева. – Москва: Высшая школа, 1975. – 375 с.
5. Баринов, В. Повреждаемость КЛ в ОАО "Ленэнерго" и влияние на неё перенапряжений в электрических сетях / В. Баринов, Н. Соловьев, Н. Углев, Б. Мурашев // КАБЕЛЬ-news. – 2013. – №1. – С 30-33.
6. Белых, Б.П. Электрическая защита от замыканий в сетях карьеров: учебное пособие / Б.П. Белых, И.С. Свердель, Ф.М. Усов - М.: Недра, 1967. – 120 с.
7. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ. Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.001 РЭ. - 1999. - 129 с.
8. 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.
9. Бухтояров, В.Ф. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров: учебное пособие / В.Ф. Бухтояров, А.М. Маврицын – М.: Недра, 1986. – 184 с.
10. Бычин, М.А. Разработка и обоснования алгоритмов действия защит от однофазных замыканий на землю в сетях с резистивно-заземленной нейтралью: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук: 05.09.03 / Бычин Максим Анатольевич - СПб, 2010. – 160 с.

11. Вайнштейн, Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. - Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.
12. Вайнштейн, Р.А.. О гармоническом составе токов нулевой последовательности в сетях с компенсацией ёмкостных токов при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин // Известия вузов. Энергетика. -1978.-№ 12.-С. 14-19.
13. Ганский, В.П. Разработка направленной защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6-10 кВ горных предприятий: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук: 05.09.03 / Ганский Владимир Петрович - Ленинград, 1988. – 160 с.
14. Головкин, С.И., Защита от замыканий на землю обмотки статора генераторов, работающих на сборные шины / С.И. Головкин, Р.А. Вайнштейн, Е.Д. Коберник // Электрические станции. – 1981. - №10. – С. 54-56.
15. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения от 1 июля 2014 г.
16. Донченко, А.М. Микропроцессорные устройства релейной автоматики: учебное пособие / А.М. Донченко, Т.В. Копейкина. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – 68 с.
17. Дударев, Л.Е. Устройство универсальной комплексной защиты от замыканий на землю для сетей 6-35 кВ / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Промышленная энергетика. -1982.-№4. -С. 36-38.
18. 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.
19. Евдокунин, Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кВ. / Г.А. Евдокунин, С.В. Гудилин, А.А., Корепанов // Электричество. – 1998. - № 12. – С. 8-23.
20. Евстифеев, А.В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы ATMEL, 5-е изд., стер. — М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2008. — 560 с.

- 21.Езерский, В.Г. Комбинированная защита от однофазных замыканий на землю / В.Г. Езерский // Труды всероссийской научно-технической конференции "Ограничений перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ", Новосибирск. - 2006. – С.-46-52
- 22.Емельянов, Н.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ / И.Н. Емельянов, А.И. Ширковец // Энергоэксперт. – 2010. - №2. – С. 44-50.
- 23.Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий: учебное пособие / И.В. Жежеленко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Энергоатомиздат, 1984.- 90 с.
- 24.Жуков, С.Ф., Реле защиты от замыканий на землю с активным фильтром токов второй гармоники / С.Ф. Жуков, Н.Д. Забавин // Электрические станции. 1977. - № 12. -С. 64-67.
- 25.Защита электрических сетей. Sepam 1000+ серии 40. Merlin Gerin. Руководство по установке и применению. - 2003. – 196 с.
- 26.Защита электрических сетей. Sepam серии 80. Merlin Gerin. Измерения, защита, управление и контроль. Руководство по эксплуатации. - 2004.- 178 с.
- 27.Иванов, С.В. Опыт внедрения селективной защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ. / С.В. Иванов, А.А. Белянин, В.Ф. Лачугин, А. В. Буров, В.В. Жуков // Воздушные линии. - 2014. - №2(15). - С. 73-79.
- 28.Ильиных М., Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. / М. Ильиных, Л. Сарин, А. Ширковец // Новости Электротехники – 2016. - №5 (101). – С 16-26.
- 29.Ильиных, М.А., Основные положения по выбору номиналов резисторов для заземления нейтрали сетей 6-35 кВ / М.А. Ильиных, Л.И. Сарин, А.А. Челаэнов // Труды третьей всероссийской научно-технической конференции “Ограничений перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ”, Новосибирск. - 2004. – С.38-44.
- 30.Калачев, Ю.Н. Новая серия устройств SPAC 810 для присоединений 6-35 кВ / Ю.Н. Калачев // Энергетик. - 2004. - № 9. - С. 36-37.

31. Кискачи, В.М. Защита от однофазных замыканий на землю ЗЗП-1. (Описание, наладка и эксплуатация). / В.М. Кискачи. - М.: Энергия, 1972. – 73 с.
32. Комплектное устройство защиты и автоматики линии 6-10 кВ SPAC Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ГЛЦИ.656121 ТО. - 2002. – 47 с.
33. Комплектное устройство защиты и автоматики ТЭМП 2501. Руководство по эксплуатации. ГЛЦИ.656122.042 РЭ. - 2002. – 109 с.
34. Костарев, И.А. Обеспечение устойчивости функционирования новой защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ путем комбинированного заземления нейтрали. / И.А. Костарев, М.Л. Сапунков // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014: сборник научных трудов. - Екатеринбург : [УрФУ] - 2014. — С. 233-237.
35. Костарев, И.А. Разработка и оценка устойчивости функционирования защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на контроле пульсирующей мощности, компенсированных сетей 6-35 кВ: дис. На соискание уч. ст. канд. тех. наук 05.14.02 / Костарев Илья Андреевич – Пермь, 2015 – 171 с.
36. Костров М.Ф. Основы техники релейной защиты: учебное пособие / М.Ф. Костров, И.И. Соловьев, А.М. Федосеев ; под общ. ред. А.М. Федосеева. – Москва: Ленинград : Госэнергоиздат, 1944. – 436 с.
37. Котлярчук, В.А. Электроснабжение экскаваторов: учебное пособие / В.А. Котлярчук, А.Ф. Гончаров - М.: Недра, 1980. – 175 с.
38. Лачугин, В.Ф. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных сетей с компенсированной нейтралью / В.Ф. Лачугин // Электрические станции. - 2005. - № 8. - С. 58-63.
39. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов: учебное пособие / Ф.А. Лихачев – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
40. Назарычев, А. Комбинированное заземление нейтрали. Мифы и реальность / А. Назарычев, С. Титенков, А. Пугачев // Новости Электротехники. - 2016. - №3 (99). – С.2-5.

- 41.Обабков, В.К. Системный анализ в электротехнике. Теория цепей. / В.К. Обабков – Калинин: КГУ, 1985.-284 с.
- 42.Обабков, В.К. Структурный анализ описания процессов в задаче интерпретации защитных свойств сети с резонансным заземлением нейтрали / В.К. Обабков // Теоретические и электрофизические проблемы повышения надёжности и долговечности изоляции сетей с изолированной нейтралью: Тез. докл. симп. Таллинн: ТПИ. - 1989. – С. 18-25.
- 43.Обабков, В.К. Метод автокомпенсации емкостных и активных составляющих в проблеме защиты от токов утечки без отключения сети // Изв. вузов. Горный журнал – 1982. – № 7. – С. 25-29.
- 44.Обабков, В.К. Алгоритм цифрового моделирования аппаратов защитного отключения / В.К. Обабков, Е.С. Обабкова // Изв. вузов. Горный журн. – 1986. – № 3.
- 45.Обабков, В.К. Структурно-операторное описание процессов в задаче моделирования дуговых замыканий на землю // Электричество. – 1986. – № 8. – С. 32-34.
- 46.Патент на изобретение РФ № 2071624 Устройство для централизованной направленной защиты от замыканий на землю: / А.И. Шалин. - № 94011967/07; заявл. 05.04.94; опубл. 10.01.97. -Бюл. №1. – 8 с.
- 47.Патент РФ № 2422964. Устройство токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю (варианты) / Л.М. Сапунков, А.А. Худяков, // заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (RU)- заявл. 03.07.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18 – 9 с.
- 48.Патент РФ № 2578123. Устройство защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю / Б.Н. Абрамович, Ю.Л. Жуковский, Д.Н. Пеленев// заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-

Петербургский горный университет» (RU) - № 2015104212/07; заявл. 09.02.2015; опубл. 20.03.2016, Бюл. № 8 – 7 с.

49. Патент РФ № 2578123. Устройство защиты электрических сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.Н. Пеленев// заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU) - № 2016144542; заявл. 14.11.2016; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 7 – 9 с.
50. Пеленев Д.Н. Анализ влияния переходного сопротивления на работоспособность ненаправленной токовой защиты от однофазных замыканий на землю// Материалы 2-ой международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр»: Сб. науч. тр. – Москва, 2016. – С. 142-145.
51. Пеленев Д.Н. Обоснование актуальности применения селективной защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ промышленных предприятий/ Б.Н. Абрамович, Д.Н. Пеленев // Материалы 13 Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых»: Сб. науч. тр. – Москва, 2016. – С. 185-188.
52. Пеленев, Д.Н. Адаптивное управление режимом нейтрали распределительных сетей 6-35 кВ предприятий минерально-сырьевого комплекса/ Д.Н. Пеленев, Ю.Л. Жуковский// Международный научно-исследовательский журнал.- 2016.- №5 (47)- С. 103-106.
53. Пеленев, Д.Н. Анализ влияния асимметрии собственных проводимостей фаз линий на землю на работоспособность инвариантной токовой защиты от однофазных замыканий / Б.Н. Абрамович, Д.Н. Пеленев // Материалы 11 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. - М: ИПКОН РАН. - 2014 – С. 199-202.

- 54.Пеленев, Д.Н. Инвариантная токовая защита от однофазных замыканий на землю для электрических сетей 6-35 кВ/ Д.Н. Пеленев // Горное оборудование и электромеханика. М.: Изд. Новые технологии. -2014. – №9. - С. 16-20.
- 55.Пеленев, Д.Н. Система автоматической коррекции селективности действия защиты от однофазных замыканий на землю предприятий минерально-сырьевого комплекса. / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.Н. Пеленев // Горное оборудование и электромеханика. М.: Изд. Новые технологии. –2017. - №1. - С. 16-20.
- 56.Пеленев, Д.Н. Токовая защита электрических сетей от однофазных замыканий на землю инвариантного действия/ Д.Н. Пеленев // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Энергоэффективность энергетического оборудования». – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». - 2014. – С. 250.
- 57.Пеленев, Д.Н. Устройство адаптивной токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, Д.Н. Пеленев, Р.И. Мухаметшин // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2013. - № 6. - С. 128-133.
- 58.Попов, И.И. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов: учебное пособие / И.И. Попов, В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова Г.В. Издательство: М.: - Энергоатомиздат, 1986 – 214 с.
- 59.Попов, И.Н. Импульсная направленная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС / И.Н. Попов, Г.В. Соколова, В.И. Махнев // Электрические станции. - 1978. - № 4. - С. 69-73.
- 60.Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М: ЗАО «Энергосервис», 2003. – 168 с.
- 61.Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., дополненное с исправлениями. – М: ЗАО «Энергосервис», 2010. – 222 с.
- 62.Реле защиты от однофазных замыканий на землю микропроцессорное (ЗЗМ-У2) типа «ЗЕРО». Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЗЗМ.

- 100.000.000 ТОО. Компания «Объединённая энергия» Joint Power Co., Ltd. – Москва. - 2003.- 17 с.
- 63.Рыжкова, Е.Н. Развитие теории переходных процессов при замыканиях на землю. Разработка методов и средств повышения надежности работы электрических сетей с изолированной и компенсированной нейтралью: дис. д-ра техн. наук 05.09.03 / Рыжкова Елена Николаевна – Павлодар, 2008. - 226 с.
- 64.Самойлович, И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров: учебное пособие / И.С. Самойлович - М.: Недра, 1976. – 175 с.
- 65.Сапунков, М.Л. Анализ влияния переходного сопротивления на работоспособность токовой защиты от замыканий на землю / М.Л. Сапунков., А.С. Печенкин // Электроэнергетика глазами молодежи. Том 2. – 2013.- С. 65-69
- 66.Сапунков, М.Л. Об актуальности применения селективной защиты от однофазных замыканий в электрических сетях напряжением 6-35 кВ / М.Л. Сапунков // Нефтяное хозяйство. - 2013. - № 4. - С. 68-71.
- 67.Серия направленных/ненаправленных токовых реле MiCOM PI25, PI26, PI27. Технические руководство. – 2001. – 46 с.
- 68.Сирота, И.М. Защита от однофазных замыканий в электрических системах: учебное пособие / И.М. Сирота - Киев. Изд. АН УССР. 1955. – 208 с.
- 69.Соколова, Г.В. Защита от замыканий на землю типа ИЗС / Г.В. Соколова // Электрические станции. -1984. -№ 1.-С. 59-61.
- 70.Степанчук, Д.Н. Селективная сигнализация замыканий на землю / Д.Н. Степанчук, В.И. Ярмоленко, В.П. Кухта и др. // Электрические станции. – 1976. - №9. – С. 51-55.
- 71.Универсальные устройства защиты MICOM P120/121/122/123 (a3). Alstom. - 2001.-201 с.
- 72.Устройства сигнализации при однофазных замыканиях на землю типов УСЗ-3, УСЗ-3М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – «Электромарк», 2010. – 3 с.

73. Устройство для защиты от замыканий на землю в сети с компенсированной нейтралью: А.С. 1145401 СССР / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин. - № 3524220/24-07; Заявл. 23.12.82; Оpubл. 15.03.85. - Бюл. №10. - 4 с.
74. Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-2-Л». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. Москва. - 2002. - 54 с.
75. Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-МЛ». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. - Москва. - 2002. - 58 с.
76. Устройство направленной волновой защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ типа УЗС-01. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. - Казань: Энергосоюз, 1998. - 48 с.
77. Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем: учебник для вузов. / А.М. Федосеев. - М.: «Энергия», 1976 г. - 560 с.
78. Хабаров, И.А. Разработка и исследование характеристик защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук 05.14.02 / Хабаров Андрей Михайлович – Новосибирск, 2006 – 232 с.
79. 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. – Екатеринбург, 2012. - 20 с.
80. Цапенко, Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей: учебное пособие / Е.Ф. Цапенко, Л.И. Сычев, П.Н. Кулешов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 213 с
81. Шабад, М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ: учебное пособие / М.А. Шабад. – М.: Энергопрогресс: Энергетик, 2007. – 63 с.
82. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей: монография / М.А. Шабад. - 4-е изд., перераб. и доп. – СПб: ПЭИПК, 2003. – 350 с.
83. Шалин, А.И. Влияние переходного сопротивления на поведение направленных защит от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ./ А.И. Шалин // Материалы

- всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ» Новосибирск. - 2006.-С.126-134.
- 84.Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения / А.И. Шалин // Новости электротехники. – 2005. - №6 (36). – С. 52-55.
- 85.Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Расчет уставок ненаправленных токовых защит. / А.И. Шалин // Новости электротехники. - 2005. №5 (35). – С 56-63.
- 86.Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Влияние электрической дуги на направленные защиты / А.И. Шалин // Новости электротехники. – 2005. - №1 (37). – С. 35-37.
- 87.Шалин, А.И. Особенности резистивного заземления в городских сетях 10 кВ / А.И. Шалин, Ю.В. Целебровский, А.И. Щеглов // Труды второй всероссийской научно-технической конференции “Ограничений перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ”. Новосибирск. - 2002. – С.63-68.
- 88.Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ: учебное пособие / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. - М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. - 104 с.
- 89.Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок: учебное пособие / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин // - М.: Энергоатомиздат. 1986 – 150 с.
- 90.Gegner, L. Электронное направленное реле типа TRER для селективной защиты от замыканий на землю / Gegner L // Электротехника и энергетика: РЖ. - 1967. – С. 32-39.
- 91.Hanninen, S. Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location [электронный ресурс] / Seppo Hanninen. – 2001. – 143 p. - Режим доступа: <http://www.inf.vtt.fi/pdg/>.
- 92.Pelenev, D. The automatic correction of selective action of relay protection system against single phase earth faults in electrical networks of mining enterprises / Yuriy

Gukovskiy, Yuriy Sychev, Denis Pelenev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. - №5.- P. 833-838

93. Pelenev, D.N. The device of universal current protection electric power line-to-ground short circuit/ D.N. Pelenev// Сборник материалов 54-ой студенческой международной научной конференции, 5 декабря 2013, г. Краков, Польша. – 2013. – С. 45
94. Roberts, J Review of ground fault protection methods for grounded, ungrounded and compensated distribution systems. [электронный ресурс] / Jeff Roberts, Dr. Hector, J. Altuve, Dr. Daqing Hou // - 2004. – P. 1-40. – Режим доступа: <http://www.selinc.com/techpprs/6123.pdf/>
95. Schweitzer, E.O. Distance Relay Element Design [электронный ресурс] / E. O. Schweitzer, III and J. Roberts // - 1992. Режим доступа: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6010_DistanceRelay_Web.pdf.
96. Schweitzer, E.O. Filtering for Protective Relaying [электронный ресурс] / E. O. Schweitzer, III and D. Hou // - 1992. – Режим доступа: https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6041_FilteringProtective_Web.pdf.
97. Siemens siprotec 7SJ61 v. 4.0/4.1. Максимальная токовая защита, защита от перегрузки и защита двигателей с функциями управления ячейкой. Руководство по эксплуатации. C53000-G1140-C118-1. -2002. -476 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ СЕТЕЙ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

На примере одного из объектов распределительной сети 6 кВ нефтеперерабатывающего предприятия ОАО «Киришиннефтеоргсинтез» был проведен анализ действия защиты от однофазных замыканий на землю. На рисунке А.1 представлена секция шин, сборка ПА, распределительной подстанции с тремя отходящими линиями. Расчетные параметры отходящих от секции шин линий и электрических нагрузок представлены в таблице А.1.

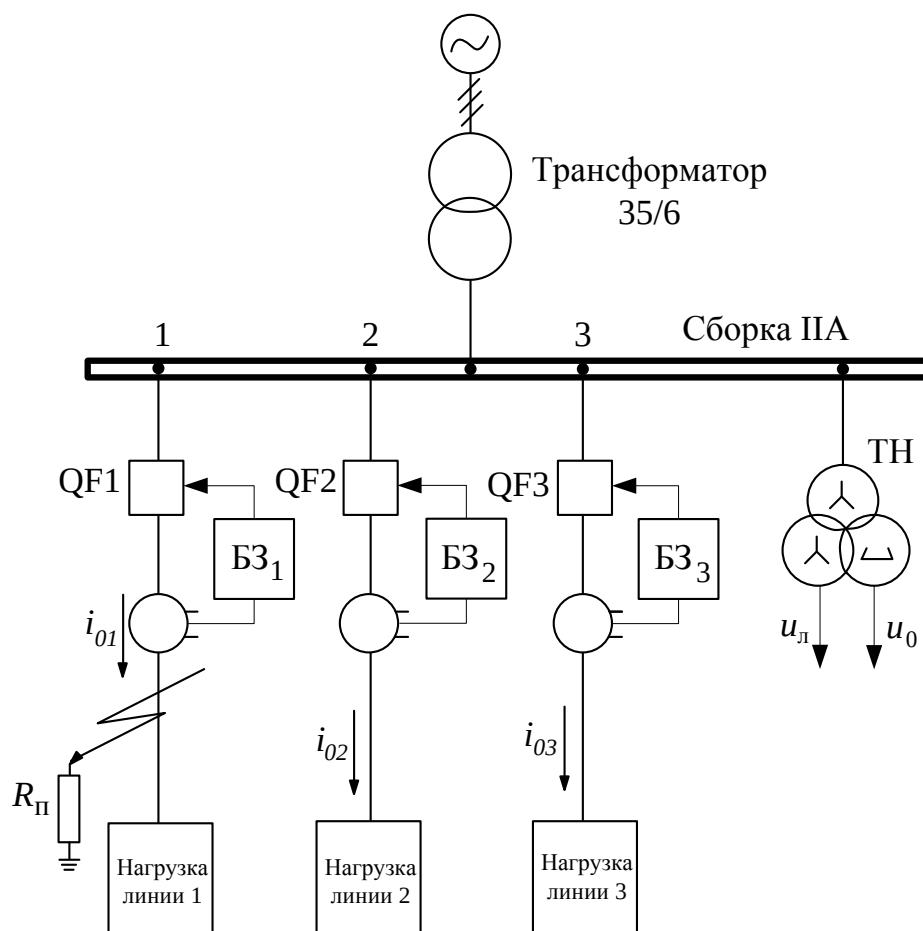


Рисунок А.1 - Схема секции шин 6 кВ сборки ПА.

В результате возникновения замыкания на землю фазы А отходящей линии №1 характер изменения величин фазных напряжений сети, напряжения нулевой последовательности и тока замыкания на землю определяется осциллограммами на рисунке А.2 и А.3, полученными путем измерений на вводе 6 кВ.

Таблица А.1 - Расчетные параметры отходящих линий и электрических нагрузок

№ линии	Сечение, мм ²	Протяженность, км	Удельный емкостной ток, А/км	Емкость линии относительно земли, мкФ	Собственный ток нулевой последовательности линии, А	Мощность электрической нагрузки линии, кВт
1	185	0,92	1,18	0,33	1,086	1395
2	240	0,76	1,3	0,3	0,988	1760
3	240	0,72	1,3	0,29	0,936	1620

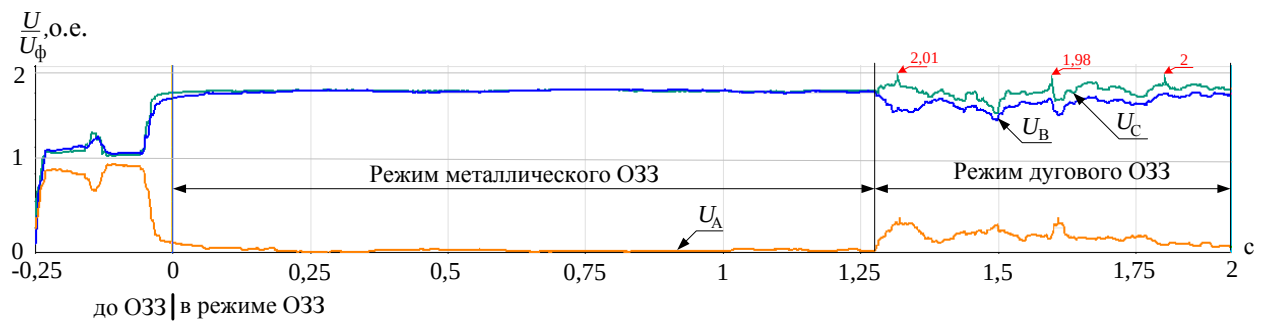


Рисунок А.2 – Осциллограммы действующих значений напряжений поврежденной и неповрежденных фаз линий относительно земли в режиме ОЗЗ

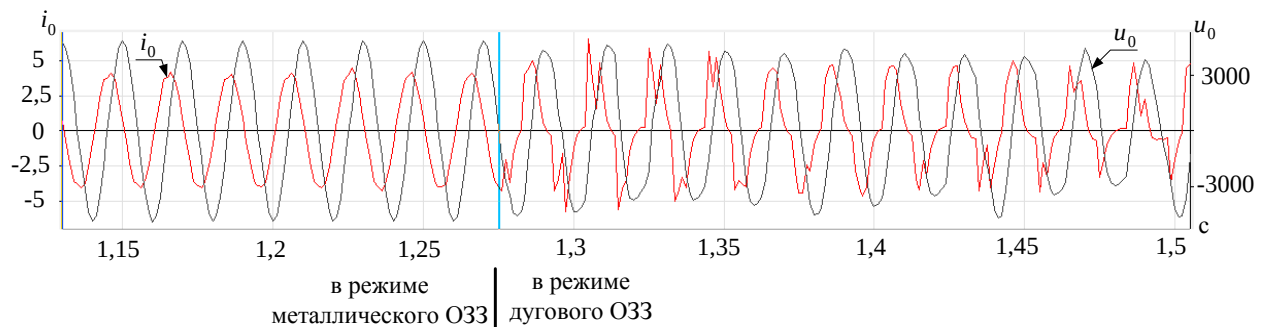


Рисунок А.3 – Осциллограммы мгновенных значений напряжения и тока нулевой последовательности поврежденной линии в режиме ОЗЗ

Исходя из рисунков А.2 и А.3 установлено, что возникшее ОЗЗ в начальный момент развития аварии имело практически металлический характер, что следует

из того, что величины действующих значений напряжений неповрежденных фаз возросли до значения линейного напряжения сети (6 кВ), величина действующего значения на поврежденной фазе снизилась почти до нуля, а значение напряжения нулевой последовательности выросло до величины фазного напряжения сети. Действующее значение тока замыкания на землю составило 3 А. Однако установленная на данном присоединении защита от ОЗЗ (блок защиты (БЗ₁)) не смогла своевременно устранить возникшее замыкание на землю, что спустя 1,25 с после возникновения аварии ОЗЗ приняло дуговой характер с последующими перенапряжениями, распространяющимися по всей электрически связанной сети [52].

Таким образом, на основе экспериментальных данных установлено, что своевременно не устраненный режим металлического замыкания на землю переходит в режим дугового ОЗЗ с возникновением перенапряжений, распространяющихся по элементам системы электроснабжения всей электрически связанной сети. Поэтому с целью снижения влияния режима однофазного замыкания на землю на элементы системы электроснабжения необходимо своевременно отключать поврежденный участок электрической сети.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



Публичное акционерное общество
«УРАЛКАЛИЙ»

Пятилетки ул., д. 63, г. Березники,
Пермский край, Российская Федерация, 618426
телефон +7 (3424) 298059, факс +7 (3424) 296100
Internet: <http://www.uralkali.com>
ОКПО 00203944, ОГРН 1025801702188,
ИНН/КПП 5911029807/997350001

№ _____
На № _____ от 15.03.2017

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
на соискание ученой степени кандидата технических наук
«Инвариантная защита электротехнических комплексов от однофазных
замыканий на землю с автоматической коррекцией входных параметров»
ПЕЛЕНЕВА ДЕНИСА НИКОЛАЕВИЧА**

Диссертационная работа представляет научный и практический интерес для горнодобывающего предприятия ПАО «Уралкалий». Разработанная в диссертации методика оценки неполноты замыкания на землю и последующая автоматическая коррекция уставок на срабатывание защиты от однофазных замыканий позволит повысить чувствительность и селективность выявления поврежденного присоединения в условиях возникновения неполных замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили инвариантность действия защиты от однофазных замыканий на землю по отношению к величине переходного сопротивления в месте повреждения, что позволяет обеспечить надежное функционирование защиты в широком диапазоне вариации параметров контура нулевой последовательности.

Внедрение методики коррекции входных параметров защиты распределительных сетей среднего класса напряжения поверхностного комплекса ПАО «Уралкалий» позволит минимизировать ущербы, связанные с нарушением электроснабжения ответственного электрооборудования по причине возникновения однофазных замыканий на землю.

В связи с вышеизложенным, в ПАО «Уралкалий» при эксплуатации и модернизации защиты от однофазных замыканий на землю электрических сетей 6-35 кВ поверхностного комплекса возможно использование разработанной методики и рекомендаций, полученных в диссертации Пеленева Д.Н.

Главный энергетик
ПАО «Уралкалий»



Рюмкин А.А.

ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2578123

**УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОТ
ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

Патентообладатель(и): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Торный" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015104212
Присвоен патент 09 февраля 2015 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 февраля 2016 г.
Срок действия патента истекает 09 февраля 2035 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Илизаров Г.П. Илизаров

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 578 123** ⁽¹³⁾ **C1**
(51) МПК
H02H 3/16 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015104212/07, 09.02.2015

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
09.02.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.02.2015

(45) Опубликовано: 20.03.2016 Бюл. № 8

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2422964C1, 27.06.2011, RU
2101826C1, 10.01.1998, RU 2416851C2, 20.04.2011,
US 5839093A, 17.11.1998.

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВПО "Национальный минерально-
сырьевой университет "Горный", отдел
интеллектуальной собственности и трансфера
технологий (отдел ИС и ТТ)

(72) Автор(ы):

Абрамович Борис Николаевич (RU),
Жуковский Юрий Леонидович (RU),
Пеленев Денис Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Национальный минерально-сырьевой
университет "Горный" (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

(57) Реферат:

Использование: в области электроэнергетики. Технический результат заключается в повышении эффективности действия токовой защиты от однофазных замыканий на землю, происходящих через переходное сопротивление, за счет коррекции ее алгоритма работы в соответствии с величиной асимметрии проводимостей фаз линий относительно земли. Для этого устройство токовой защиты снабжено модулем вычисления

асимметрии проводимостей фаз линий на землю, первый вход которого связан с датчиком измерения проводимости линии относительно земли, второй его вход соединен с измерительным трансформатором напряжения, а выход подключен к третьему входу модуля вычисления коэффициента неполноты замыкания на землю. 1 ил.

RU 2 578 123 C1

RU 2 578 123 C1

ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 168498

**УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
СРЕДНЕГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ОДНОФАЗНЫХ
ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Абрамович Борис Николаевич (RU), Сычев Юрий
Анатольевич (RU), Пеленев Денис Николаевич (RU)*

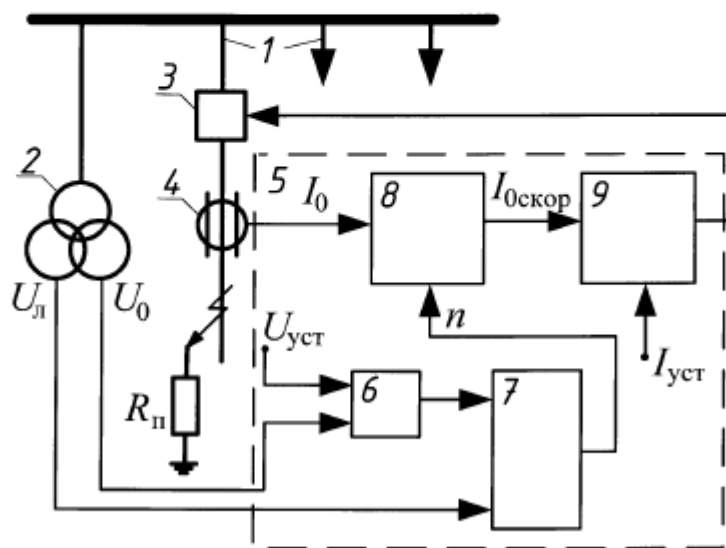
Заявка № 2016144542
Приоритет полезной модели 14 ноября 2016 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 07 февраля 2017 г.
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 14 ноября 2026 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Илизаров Г.П. Илизаров

**УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
СРЕДНЕГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ОДНОФАЗНЫХ
ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**



Фиг. 1