

Министерство образования и науки РФ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ГОРЮНОВ Вячеслав Александрович

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ  
МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА  
ЗЕМЛЮ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Целебровский Ю.В.

Новосибирск – 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Анализ алгоритмов функционирования защит от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ и задачи работы .....	10
1.1. Общие положения .....	10
1.2. Индивидуальные защиты присоединений .....	12
1.3. Централизованные защиты от однофазных замыканий на землю .....	18
1.4. Электромагнитная совместимость устройств релейной защиты и автоматики.....	26
1.5. Задачи исследования .....	30
2. Разработка модели сети напряжением 6-35 кВ, включающей кабельные и воздушные линии .....	33
2.1. Основные положения .....	33
2.2. Моделирование элементов схемы замещения .....	34
2.3. Создание расчетной схемы сети с изолированной нейтралью .....	53
2.4. Оценка адекватности модели сети.....	55
2.5. Определение требований к защите от замыканий на землю.....	58
2.6. Выводы по главе .....	59
3. Разработка алгоритмов функционирования защиты .....	60
3.1. Основной алгоритм централизованной защиты .....	60
3.2. Базовый алгоритм с суммированием.....	66
3.3. Логический алгоритм .....	73
3.4. Фазный алгоритм.....	83
3.5. Комбинированный алгоритм .....	93
3.6. Выводы по главе .....	96
4. Исследование функционирования защиты в городских электрических сетях и электромагнитная совместимость .....	98
4.1. Электрические и магнитные влияния на контрольные кабели.....	98
4.2. Экспериментальное определение уровней помех на контрольном кабеле.....	106

4.3. Выводы по главе .....	112
5. Технические аспекты и внедрение защиты от замыканий на землю .....	113
5.1. Особенности подключения трансформаторов тока нулевой последовательности в сетях 6-10 кВ .....	113
5.2. Применение трехтрансформаторных фильтров токов нулевой последовательности .....	118
5.3. Опыт внедрения защиты от замыканий на землю в городских сетях 10 кВ г. Ханты-Мансийска .....	122
5.4. Выводы по главе .....	124
Заключение .....	126
Список использованных источников .....	129
Приложение 1 Типы индивидуальных защит от замыканий на землю .....	138
Приложение 2 Разработка программного обеспечения для расшифровки и анализа данных микропроцессорных защит от замыканий на землю типа МКЗЗП .....	141
Приложение 3 Анализ осциллограмм по виду замыкания на землю и определение числа замыканий .....	144
Приложение 4 Дуговое замыкание на землю .....	152
Приложение 5 Сертификат по ЭМС защиты МКЗЗП .....	156
Приложение 6 Ведомость учета работы защит при замыкании на землю .....	158
Приложение 7 Протоколы испытаний .....	161
Приложение 8 Акт внедрения .....	169

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Общая протяженность распределительных сетей среднего напряжения 6-35 кВ, доставляющих электроэнергию потребителям, превышает в России миллион километров, а число трансформаторных подстанций в них – около полумиллиона. Сети средних классов напряжения, в основном, эксплуатируются с изолированной и компенсированной нейтралью. Также начинает применяться заземление нейтрали через резистор.

От надежной эксплуатации сетей 6-35 кВ зависит бесперебойная работа промышленности, аграрного комплекса и нормальная организация быта населения. Одним из важнейших факторов, обеспечивающих высокую эффективность передачи и распределения электрической энергии, является оснащённость электроэнергетических объектов средствами релейной защиты и автоматики (РЗА). Влияние устройств защиты на эффективность, надежность, качество и производительность электроэнергетических сетей и систем постоянно возрастает.

Наиболее частым видом повреждений в сетях 6-35 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые составляют порядка 70-80% от общего числа повреждений. В отличие от сети с эффективно заземлённой нейтралью, однофазные замыкания на землю в рассматриваемых сетях не сопровождаются появлением больших токов и не искажают треугольник междуфазных напряжений. При этом Правилами технической эксплуатации допускается работа сети с замкнувшейся на землю фазой до устранения повреждения. Персонал обязан отыскать место повреждения и устранить его в кратчайший срок. Такой режим является аварийным и нередко служит причиной развития повреждения с отключением оборудования. Длительные однофазные замыкания создают, кроме того, электроопасные ситуации, при которых возможно поражение обслуживающего персонала и населения напряжениями прикосновения и шага.

Для уменьшения аварийных последствий, вызванных однофазными

замыканиями на землю, таких как переход однофазного в междуфазное короткое замыкание, появление двойных замыканий на землю, возникновение феррорезонанса, разрушение железобетонных опор, возникновение пожаров в кабельных помещениях, необходимо иметь надёжные и эффективные устройства защиты от однофазных замыканий на землю.

При этом в ряде случаев, например, при падении на землю оборвавшегося провода воздушной линии, защита от ОЗЗ является практически единственным средством, уменьшающим вероятность случайного попадания человека под напряжение прикосновения или шага.

Однако по литературным данным на 80% российских подстанций рассматриваемого класса напряжения вообще отсутствует селективная защита от ОЗЗ. Эффективность тех защит, которые эксплуатируются на оставшихся 20% подстанций, низка, и по данным исследований ОРГРЭС не превышает трёх баллов по пятибалльной шкале. Таким образом, в настоящее время задача совершенствования защит от однофазных замыканий на землю в рассматриваемых сетях является весьма актуальной.

При выполнении работы автор использовал известные результаты исследований в области режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, выполненных Ф.А. Лихачевым, К.П. Кадомской, В.Е. Качесовым, Г.А. Евдокуниним, Р.А. Вайнштейном, И.М. Сиротой, В.А. Шуиным, В.М. Кискачи, А.И. Шалиным, С.Л. Кужековым и др.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью работы является совершенствование централизованной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ за счет создания новых алгоритмов функционирования. Для достижения поставленной цели были выполнены:

- анализ существующих методов и средств защиты от однофазных замыканий на землю;
- разработка математической модели сети и определение на основе расчётов требований к защите от замыканий на землю;
- разработка на основе полученных требований эффективных алгоритмов

действия защит от ОЗЗ;

- исследования возможности создания комбинированного алгоритма, действующего при всех видах ОЗЗ;

- экспериментальная проверка алгоритмов действия защиты в сетях 6-35 кВ;

- экспериментальное определение электромагнитных помех на подстанциях (ПС) 6-35 кВ и разработка технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) микропроцессорных защит с силовым оборудованием ПС.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались: экспериментальные исследования в лабораторных и эксплуатационных условиях; математическое моделирование с использованием теории электрических цепей, численных методов и их реализаций в виде программ на ЭВМ.

**Достоверность результатов.** Полученные в диссертационной работе результаты, согласуются с известными теориями электрических процессов при дуговых замыканиях и экспериментальными данными, полученными непосредственно при замыканиях в существующих электрических сетях.

**Научная новизна работы.**

1. Определены границы применимости алгоритма относительного замера и требования к погрешностям фильтров нулевой последовательности.

2. Разработан логический алгоритм для централизованного устройства релейной защиты (УРЗ) от замыканий на землю, позволяющий организовать селективную защиту удаленных подстанций сетей с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью.

3. Разработан фазный алгоритм для централизованного УРЗ от ОЗЗ, обеспечивающий функционирование защиты в том числе и при дуговых замыканиях на землю.

4. Предложены методики расчета уставок разработанных алгоритмов и определены области их применения.

5. Определены уровни электромагнитных помех на ПС и ТП 6-35 кВ и установлены требования к ЭМС УРЗ.

### **Практическая ценность работы.**

1. Математическая модель электрических процессов при перемежающихся дуговых замыканиях, реализованная в виде программы, может быть использована при проведении разработок в области защиты от замыканий на землю и для исследования и оценки существующих и проектируемых устройств;

2. На основе полученных результатов созданы и используются в электрических сетях устройства защиты с автоматическим изменением уровня срабатывания и расширенной логикой функционирования;

3. Опыт технических решений, полученный при внедрении разработанных защит от ОЗЗ, можно использовать также и для повышения надёжности существующих защит.

4. Созданная программа расшифровки осциллограмм применяется на предприятиях, использующих разработанную защиту.

**Реализация результатов работы.** Разработанные и исследованные методы повышения устойчивости функционирования, а также способы и алгоритмы действия микропроцессорных защит используются при производстве защит на кафедре электрических станций НГТУ.

На подстанциях городских электрических сетей г. Ханты-Мансийска установлено и введено в действие семь комплектов микропроцессорной защиты, основанной на предложенных алгоритмах.

Ряд материалов диссертации используется в учебном процессе университета.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Для устойчивого функционирования централизованной защиты от замыканий на землю подстанций с суммарными токами замыканий существенно большими, чем токи отдельных присоединений, наиболее

работоспособным является предложенный в работе логический алгоритм.

2. Сравнение между собой направлений токов присоединений, имеющих несинусоидальную форму, можно проводить по условному углу в предложенном фазном алгоритме, работоспособным и при перемежающихся дуговых замыканиях.

3. Каждый алгоритм имеет свою область применения, связанную, в том числе и с наличием погрешности трансформаторов тока. Комбинированный алгоритм, сочетающий в себе два разработанных алгоритма, позволяет защите функционировать во всех режимах работы сети.

4. Дополнительные мер по обеспечению электромагнитной совместимости на подстанциях 6-35 кВ, как правило, не требуются.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедральных научных семинарах Новосибирского государственного технического университета; на десятом всероссийском студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2008 г.); на Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2009 г.); на 5-ой Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ» (г. Новосибирск, 2008 г.); на XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2009 г.); на Третьей Российской конференции по заземляющим устройствам (г. Новосибирск, 2008 г.); на международной научно-технической конференции «ЭНЕРГОСИСТЕМА: Исследование свойств, Управление, Автоматизация» (г. Новосибирск, 2009 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 научных статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, и 1 патент на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 137 страницах



машинописного текста, списка литературы из 86 наименований, приложений на 33 стр. и содержит 74 рисунка и 9 таблиц.

# 1. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-35 кВ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

## 1.1. Общие положения

Замыкание фазы на землю создает ненормальный режим и представляет опасность по ряду причин:

- возможность появления перенапряжения порядка 2,4 – 3,5 кратных по сравнению с фазным (например, [3, 7, 8]), что может привести к пробое изоляции неповреждённых фаз и переходу ОЗЗ в «двухместное» или двойное замыкание на землю по своим характеристикам близкое к двухфазным коротким замыканиям (КЗ). Риск возникновения таких двойных замыканий заметно вырос в последнее время в связи со старением изоляции электрических машин и аппаратов многих энергетических объектов и отсутствием средств на их модернизацию и замену;
- возникает опасность поражения электрическим током обслуживающего персонала и потребителей;
- при длительном наличии ОЗЗ в сети происходит ускоренное старение изоляции и повреждение электрооборудования;
- возможны явления феррорезонанса, от которых чаще всего выходят из строя трансформаторы напряжения.

По представленным выше причинам, замыкания на землю необходимо отключать. В сетях, работающих в условиях повышенной опасности для обслуживающего персонала, защита от замыканий на землю выполняет функции защитного отключения и по условиям техники безопасности должна работать без выдержки времени на отключение. Для защиты электродвигателей от замыканий на корпус необходимо применение специальных защит, обладающих высокой чувствительностью, поскольку токи замыкания на корпус менее 5 А могут представлять для изоляции опасность [9].

Защиты от ОЗЗ можно разделить на два класса – индивидуальные, которые реагируют лишь на изменение при ОЗЗ параметров одного

присоединения, и централизованные, сравнивающие параметры всех присоединений (включая вводные), изменяющиеся при ОЗЗ.

Наиболее простой из индивидуальных защит является токовая защита нулевой последовательности, реагирующая на ток нулевой последовательности ( $3I_0$ ) рабочей частоты. Однако для обеспечения условия селективности действия эти защиты должны отстраиваться от собственного ёмкостного тока фидера, что с учетом бросков ёмкостного тока в момент замыкания ограничивает чувствительность защиты:

$$I_{C3} \geq K_H K_{БР} I_{C.ФИД.МАКС},$$

где  $k_n$  – коэффициент надёжности;  $K_{БР}$  – коэффициент «броска», учитывающий бросок ёмкостного тока в момент возникновения ОЗЗ, а также способность реле реагировать на него;  $I_{C.ФИД.МАКС}$  – максимальный ёмкостный ток защищаемого фидера.

В соответствии с [10] для мгновенно действующих защит от ОЗЗ в расчётах следует принимать значение произведения  $K_H K_{БР} = 4 \dots 5$ . Для защит с выдержкой времени при возможности возникновения перемежающейся дуги  $k_H K_{БР} = 2,5$ .

Чувствительность проверяется по значению коэффициента  $K_{\text{ч}}$ :

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{ЗАЩ}}}{I_{C3}} \geq K_{\text{ч.НОРМ}},$$

где  $I_{\text{ЗАЩ}}$  – ток в защите повреждённого присоединения, равный разности суммарного ёмкостного тока сети в рассматриваемом расчётном режиме и ёмкостного тока повреждённого фидера;  $K_{\text{ч.НОРМ}}$  – нормативный коэффициент чувствительности.

В [10] рекомендуется принимать  $K_{\text{ч.НОРМ}} = 1,25 - 1,5$  (нижнее значение величины коэффициента чувствительности рекомендуется принимать для кабельных линий, а верхнее – для воздушных).

В [11] показано, что условия селективности несрабатывания при внешних ОЗЗ и устойчивости срабатывания при внутренних повреждениях для устройств абсолютного замера высших гармоник обеспечиваются в основном

на крупных подстанциях и электростанциях с большим числом присоединений. Область применения централизованных токовых устройств относительного замера значительно шире и в основном ограничивается погрешностями кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) [12].

Ниже приводится краткая характеристика известных типов защит индивидуального класса, названия устройств релейной защиты приведены в приложении 1.

## **1.2. Индивидуальные защиты присоединений**

Наиболее простыми защитами от замыканий на землю являются защиты по току и напряжению нулевой последовательности промышленной частоты. Для реализации таких защит достаточно устройства реагирующего на действующее значение тока или напряжения соответственно. Однако простота таких устройств сказывается на их возможностях. Общая неселективная защита по напряжению нулевой последовательности только сигнализирует о появлении замыкания на землю на любом присоединении секции. Среди недостатков токовых защит НП можно отметить следующие: фиксированная уставка, отстройка тока срабатывания от суммы тока небаланса нулевой последовательности и собственного ёмкостного тока линии, отказ в срабатывании при перемежающихся замыканиях как при защите кабельных линий (КЛ), так и воздушных линий (ВЛ) [13]. Для защит на токовых реле РТ 40/0,2 и РТЗ-50 возможны излишние срабатывания при внешних ОЗЗ из-за резкого увеличения токов нулевой последовательности при дуговых замыканиях за счёт высокочастотных составляющих [14, 12]. А для реле РТЗ-51 при питании от сети постоянного тока 110 или 220 вольт возможны ложные срабатывания в моменты коммутации в сети, возникающие по различным причинам [15].

При реализации токовых защит НП на микропроцессорных терминалах появилась возможность использовать сложные характеристики зависимости тока срабатывания от времени. Для защит с обратнозависимой времятоковой

характеристикой [16] не требуется отстройка от собственного ёмкостного тока присоединения. Однако такой принцип действия защит имеет ряд существенных недостатков, основной недостаток заключается в том, что селективность срабатывания обеспечивается выдержкой времени, в связи с этим создание зависимых систем с различными выдержками времени становится практически невозможным. Работа таких защит возможна только на отключение, иначе по истечении некоторого времени все защиты начнут сигнализировать о наличии замыкания на землю. При отказе выключателя поврежденного присоединения произойдет неселективное отключение присоединения со вторым по величине током.

Защиты, использующие только один сигнал тока НП, несмотря на свою простоту, имеют существенные недостатки, которые будут приводить к их неселективным действиям. В ходе дальнейшего усовершенствования таких защит стали использовать два сигнала – ток и напряжение НП для определения направления. Большое число направленных защит реагируют на направление мощности нулевой последовательности в установившемся режиме. Чувствительность таких защит выше, чем ненаправленных, так как их ток срабатывания отстраивается [14, 12] только от тока небаланса в «максимальном рабочем режиме», а отстройка защиты от собственного ёмкостного тока линии не требуется, поскольку от этого тока она отстроена «по направлению». Общим недостатком защит такого типа являются их неселективные действия или отказ в срабатывании при перемежающихся дуговых ОЗЗ. Каждому из устройств защиты присущи некоторые недостатки, так возможна ложная работа реле ЗЗП-1 и ЗЗП-1М (отключение неповреждённых линий или отказ в срабатывании [12]). Защита ЗЗП-1 имеет предел чувствительности к металлическим замыканиям на землю через переходное сопротивление до 0,6...0,7 кОм, а также защита ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) не может быть применена в сети, заземлённой через высокоомный резистор (угол её максимальной чувствительности близок к 90 электрическим градусам). Работа защиты РЗН-3 невозможна при некоторых дуговых ОЗЗ, когда на вход токового канала поступает серия одиночных

высокочастотных импульсов со скважностью 1-2 мс, соизмеримых со временем срабатывания герконов фазочувствительного органа, а также защите типа РЗН присущ большой процент ложных срабатываний и отказов [6].

Другим методом определения поврежденного присоединения с использованием сигналов тока и напряжения НП является расчет активной мощности нулевой последовательности в установившемся режиме [17, 18]. Защиты, реализованные на этом принципе, обладают более высокой устойчивостью функционирования в режимах с перемежающейся дугой в месте ОЗЗ и отстроены в большей мере от бросков ёмкостных токов в переходных процессах. Обеспечить стабильное функционирование таких защит возможно в основном в сетях с резистивным заземлением нейтрали.

Защиты, выполненные на принципе компенсации собственных ёмкостных токов [19], не являются направленными и напряжение нулевой последовательности в них используется только для создания компенсирующего тока. При замыканиях через большие переходные сопротивления величина компенсирующего тока будет автоматически меняться, что можно отнести к положительным свойствам защит данного типа. Основной проблемой таких защит является неточность задания величины компенсирующего тока, ввиду отсутствия точных сведений о значении ёмкостного тока присоединений и большого непостоянства этой величины.

Для устранения недостатков защит использующих токи и напряжения НП промышленной частоты были разработаны защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на высшие гармоники электрических величин [3]. При возникновении дуговых ОЗЗ содержание высших гармонических составляющих в сети резко увеличивается, причем содержание высших гармонических в токе нулевой последовательности повреждённой линии значительно больше, чем в токах нулевой последовательности неповреждённых линий. Эти процессы наблюдаются в сетях всех видов заземления нейтрали. Общие недостатки устройств, выполненных с использованием высших гармоник:

- вероятность отказа в срабатывании при ОЗЗ через переходные сопротивления [20, 21];

- нестабильность состава и уровня высших гармоник в токе НП. Условия селективности несрабатывания при внешних ОЗЗ и устойчивости срабатывания при внутренних повреждениях для устройств абсолютного замера высших гармоник обеспечиваются в основном на крупных подстанциях и электростанциях с большим числом присоединений.

Устройства защиты УСЗ-2/2 имеют ряд недостатков присущих только этим защитами. Так селективность устройства УСЗ-2/2 является неудовлетворительной [6], что связано, во-первых, с отсутствием учета изменений схемы сети у потребителей (то есть изменений собственных ёмкостных токов  $I_{ССОБ}$  линий и суммарного ёмкостного тока  $I_{C\Sigma}$  сети) и учета потребителей, являющихся источниками повышенного уровня высших гармоник, а во-вторых, методическими погрешностями при выборе уставок (устройства реагируют на суммарный уровень высших гармоник, а уставки выбираются по значениям  $I_{C\Sigma}$  и  $I_{ССОБ}$ ). Наличие таких трудно учитываемых факторов, изменяющихся в процессе эксплуатации, приводит к тому, что правильный выбор уставки для устройства абсолютного измерения становится практически невозможным.

Другая категория защит – это защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на электрические величины переходного процесса [3, 22]. Среди достоинств таких защит можно отметить возможность фиксации всех разновидностей ОЗЗ, независимость действия от режима заземления нейтрали, большая чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление, большие значения амплитуд переходных токов, упрощающие отстройку от токов небаланса фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) и обеспечение высокой помехоустойчивости и чувствительности защиты.

Но и такие защиты обладают недостатками. Для всех защит присущи единые недостатки, такие как отсутствие непрерывного действия защиты, искажение фазовых соотношений между током и напряжением, возникающее в

момент ОЗЗ в отраженной от конца защищаемой линии волне [6], возможные ложные срабатывания от помех, возникающих одновременно в цепях тока и напряжения при отсутствии ОЗЗ, например, возможна ложная работа таких защит в сетях с компенсированной нейтралью при отключении трёхфазных коротких замыканий. Защиты УЗС-01 могут действовать неправильно при дуговом ОЗЗ через переходное сопротивление [23]. В защитах КЗЗП и ПЗЗМ применен принцип раздельной фиксации начальных знаков переходного тока и напряжения нулевой последовательности с последующим их сравнением, который менее эффективен из-за возможности излишних срабатываний при малых значениях подведённых величин [3].

И последняя группа защит от однофазных замыканий на землю, которые следует рассмотреть, это защиты, реагирующие на наложенный ток [3]. Наложённый ток может быть частотой как выше промышленной, так и ниже. Для создания тока повышенной частоты возможно использование нелинейного сопротивления, включенного между нейтралью сети и землёй. Однако данное устройство значительно повышает стоимость таких защит, и может снизить надёжность функционирования защиты. Также можно отметить тот факт, что значительная высокочастотная составляющая может присутствовать в токах присоединений и в нормальном режиме. Это в первую очередь относится к сетям, связанным с производствами, имеющими нелинейную нагрузку. В таких случаях описанный способ защиты непригоден. Кроме того, как показывают проведённые исследования [24], гармоники с частотой 100 Гц появляются почти в 2 раза чаще, чем, например, с частотой 25 Гц и амплитуды их намного больше.

Поэтому ряд разработчиков создали защиты, реагирующие на наложенный ток частотой ниже промышленной. Различие по частоте тока небаланса ФТНП (50 Гц и гармоники, кратные трём) и воздействующей величины (25 Гц) позволяет упростить отстройку защиты от небаланса и избежать загробления защиты по первичному току. Сам наложенный ток частотой ниже промышленной получить проще, и требуется меньшая мощность



генерирующего источника. В результате такие защиты обеспечивают возможность замера больших значений активного сопротивления фазовой изоляции, имеют меньшую зависимость чувствительности от переходного сопротивления в месте замыкания и лучшую помехозащищённость от тока промышленной частоты [25].

К основным недостаткам защит, реагирующих на наложенный ток частотой ниже промышленной, можно отнести необходимость подключения в нейтраль сети специального устройства для создания контрольного тока, влияние на устойчивость функционирования защиты погрешностей ТТНП, возрастающих при уменьшении рабочей частоты, усложнение схемы первичной коммутации из-за необходимости подключения источника наложенного тока и трудности подключения источника вспомогательного тока при использовании в сети нескольких ДГР, установленных на разных объектах. Также не исключены сложности отстройки от естественных гармонических составляющих при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ, при которых спектр тока зависит от параметров сети и режима заземления её нейтрали, положения точки ОЗЗ в сети. А также при замыканиях через большие переходные сопротивления происходит снижение контрольного тока [26]. При возникновении дуговых ОЗЗ устройство УСЗК-6,25 блокируется с помощью специального реле, так как не способно правильно работать при таком виде повреждения.

В целом, все индивидуальные защиты имеют общие недостатки, связанные либо с принципом действия, либо с непосредственной реализацией устройств защиты. Обобщая, можно выдвинуть следующие основные требования к защитам: использование уставки зависящей от параметров замыкания, выявление замыканий через большие переходные сопротивления и дугу, возможность создания системы ступенчатых защит от замыканий на землю и повышенная помехозащищённость.

### **1.3. Централизованные защиты от однофазных замыканий на землю**

#### **1.3.1. Общая характеристика централизованных защит**

Как было показано в предыдущем параграфе, большинство индивидуальных защит имеет различные недостатки. Это сказывается на работе сети. Если защиты отказывают в действии, либо отсутствуют, то замыкания на землю могут привести к крупным авариям, сопровождающимся значительными ущербами.

Сам принцип функционирования централизованных защит обеспечивает более высокое техническое совершенство защиты [12, 27], используя информацию о токах НП не только своего присоединения или секции сборных шин, но и информацию с других объектов, например, поступающую от трансформаторов тока, измеряющих ток высоковольтного заземляющего резистора, а также ТТНП другой секции.

Централизованный принцип построения защиты предполагает сравнение токов нулевой последовательности присоединений. В основном применяют сравнение амплитудных или действующих значений токов нулевой последовательности. Расчет этих значений может проводиться как в начальный момент времени, то есть, основываясь на переходных величинах замыкания, так и в установившемся режиме. Кроме того, возможно применение высших гармонических составляющих токов нулевой последовательности либо тока наложенного с частотой, отличной от промышленной. Для расширения области применения для подстанций с большим числом присоединений, возможно введение в такие защиты дополнительной информации, которая позволяет произвести отстройку от действия в некоторых сложных режимах. Например, получение информации о напряжении нулевой последовательности с другой секции шин подстанции [27] может повысить чувствительность. Это требуется в некоторых случаях в сетях 35 кВ, состоящих преимущественно из двучепных ВЛ. Централизованные защиты (ЦЗ) могут применяться во всех сетях среднего напряжения, это могут быть как сети с изолированной и компенсированной

нейтралью, так и с нейтралью, заземлённой через резистор.

Однако централизованный принцип построения защиты накладывает некоторые ограничения на число сигналов, необходимых для обработки. Для обеспечения селективности ЦЗ необходимо, чтобы число обрабатываемых токов НП было не менее трёх при отсутствии в сети устройств, установленных в нейтраль.

### 1.3.2. Защиты, основанные на относительном сравнении токов нулевой последовательности

Существует два метода определения максимального значения сигнала, это методы последовательного и параллельного сравнения. Метод параллельного сравнения можно выполнить на основе специальных физических элементов. Последовательное сравнение идет значительно медленнее, и до появления быстродействующих микропроцессорных защит считалось, что защиты, выполненные на основании метода последовательного сравнения, имеют недостаточное быстродействие. К таким устройствам можно отнести устройство типа «Земля». Преимущественно оно применялось для выполнения сигнализации ОЗЗ, на данный момент устарело.

Метод одновременного сравнения амплитуд переходных токов реализован в таких устройствах, как ЦНУСЗ, «Феррит», «Индикатор», разработанных в 60-80-е годы. Область их применения ограничивается главным образом погрешностями ТТНП, которые зависят от множества факторов: типа ТТНП, числа и схемы соединения их вторичных обмоток, значения переходного тока и др. [3].

Из устройств, основанных на одновременном сравнении амплитуд переходных токов, наиболее известным является устройство «Индикатор». По данным [12] к недостаткам этого устройства относят: возможность неправильного срабатывания на неповреждённых присоединениях из-за несинхронности или несинфазности сравниваемых сигналов, поскольку частоты и фазы переходных токов в повреждённом и неповреждённых

присоединениях могут различаться между собой; возможность отказов в функционировании при появлении на входах измерительных органов потенциалов, обусловленных электромагнитными полями (из-за неодновременности замыкания контактов силовых выключателей присоединений, появления токов самозапуска электродвигателей) и появляющихся при ОЗЗ на шинах подстанции и в питающей сети.

В устройствах «Индикатор-1», «Индикатор-2», «Селектор», «Селектор-М» эти недостатки частично устранены [12].

В устройствах защиты, работающих в режиме импульсного сравнения (таких как «Индикатор-1И», «Индикатор-2И»), отсутствуют влияния несинфазности и несинхронности сравниваемых сигналов на их работу. Отличительная особенность устройств – меньшая подверженность влиянию помех и сигналов небаланса [12]. При этом эти устройства фиксируют амплитуды как переходного, так и установившегося тока замыкания на землю. Уставка срабатывания таких защит не отстраивается от бросков собственных ёмкостных токов неповреждённых присоединений, а селективность зависит только от отношения минимального значения тока нулевой последовательности в повреждённом присоединении к максимальному значению тока нулевой последовательности в неповреждённом присоединении. Для обеспечения надёжной работы этого устройства это отношение должно быть больше единицы.

В Новосибирском государственном техническом университете разработано микроконтроллерное устройство типа МКЗЗП-6 [28] для сетей 3-10 кВ с изолированной или заземлённой через резистор нейтралью. Защита по принципу действия является централизованной токовой ненаправленной, сравнивающей амплитуды бросков токов нулевой последовательности во всех присоединениях защищаемой секции в момент срабатывания пускового органа, включенного на напряжение нулевой последовательности, и определяющей повреждённое присоединение по наибольшей амплитуде.

Ток срабатывания этой защиты не требуется отстраивать от ёмкостного

тока каждого из защищаемых присоединений, что существенно повышает чувствительность защиты и тем самым выгодно отличает её от описанных ранее устройств ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности.

Не во всех случаях такая защита будет срабатывать правильно. В зависимости от условий применения защиты возникают режимы, при которых использование относительного замера токов НП не обеспечивает селективности действия. Так в случае защиты присоединений распределительных подстанций (РП) и трансформаторных подстанций в разветвленных кабельных сетях промышленных предприятий и городов ток НП от вводного присоединения РП или ТП, представляющий суммарный ток всей внешней по отношению к защищаемому объекту сети, может на порядок и более превышать суммарный ёмкостный ток защищаемых присоединений. В этом случае ток НП от поврежденного присоединения мало будет отличаться от тока НП вводного присоединения, и с учетом погрешностей преобразования и токов небаланса защита может подействовать неселективно.

Основным недостатками ЦЗ от ОЗЗ, выполненных на принципе сравнения токов нулевой последовательности, являются неселективные срабатывания при ОЗЗ на шинах питающей подстанции и при ОЗЗ на присоединении, если ток НП внешней сети значительно больше, чем токи присоединений.

### 1.3.3. Защиты, основанные на принципе суммирования токов нулевой последовательности присоединений подстанции

Недостатков устройств централизованной защиты от ОЗЗ относительного замера можно избежать. Например, устройство типа «Индикатор-1М» [12], использует дополнительную информацию о геометрической сумме токов нулевой последовательности всех присоединений. В этом устройстве наряду с основными обмотками специальных промежуточных устройств (трансреакторов), подключенных своими первичными обмотками к выходам ТТНП, применяются дополнительные обмотки, последовательно соединенные

между собой [12]. При ОЗЗ на одном из отходящих присоединений защита выдает сигнал на отключение, при этом суммарное напряжение дополнительных вторичных обмоток трансреакторов практически равно нулю. При ОЗЗ на шинах или на питающем присоединении геометрическая сумма токов НП всех защищаемых присоединений не равна нулю, токи каждого присоединения оказываются сонаправлены друг с другом, а их сумма равна суммарному току НП замыкания сети. В защите же происходит суммирование напряжений дополнительных обмоток трансреакторов, выходное напряжение с которых подается на соответствующий орган, срабатывание которого приводит к отключению вводного выключателя, а присоединение с наибольшим собственным ёмкостным током не отключается.

Устройство защиты «Индикатор-2М» отличается от «Индикатор-1М» тем, что содержит дополнительные элементы (делитель напряжения с коэффициентом деления равным двум и элемент сравнения), позволяющие создать помехоустойчивую и селективную защиту с высокой чувствительностью [12].

#### 1.3.4. Защиты, основанные на сравнении значений высших гармоник

В отличие от индивидуальных защит, имеющих проблемы с постоянно изменяющимся уровнем высших гармоник, ЦЗ обеспечивают селективность действия в подавляющем большинстве случаев, так как высшие гармоники суммируются в повреждённом присоединении независимо от их абсолютных уровней, конкретных параметров и состояния сети, а также от вида заземления нейтрали.

Из устройств, выполненных на относительном замере значений высших гармоник тока нулевой последовательности, наиболее известными являются устройства типа УСЗ-3 и УСЗ-3М, выпускаемые ЧЭАЗ. Эти устройства являются одними из первых массово выпускаемых устройств подобного типа.

Применение в УСЗ-3М фильтра, обеспечивающего более высокую степень подавления составляющих промышленной частоты, чем в УСЗ-2/2,

делает возможным применение этого устройства, как в компенсированных сетях, так и в сетях с изолированной нейтралью. Устройство УСЗ-3 предназначено для использования с токоизмерительными клещами типа КЭ-44 и его чувствительность по первичному току приблизительно в 4 раза хуже, чем устройства УСЗ-3М [3].

Строго говоря, называть такие устройства централизованными нельзя, так как функцию централизации выполняет оператор, проводящий измерение вручную и принимающий решение. Повреждённое присоединение определяется по наибольшему показанию стрелочного индикатора уровня высших гармоник - выходного микроамперметра. Можно выделить следующие основные недостатки устройства УСЗ-3М: невозможность чёткой фиксации повреждённого присоединения при дуговых прерывистых ОЗЗ и необходимость участия оперативного персонала в работах по определению повреждённого присоединения. Последний недостаток значительно увеличивает время поиска и ликвидации замыкания на землю, особенно на подстанциях без постоянного обслуживающего персонала.

Для устранения указанных недостатков в специальном конструкторско-технологическом бюро высоковольтной и криогенной техники (СКТБ ВКТ) Мосэнерго разработаны и выпускаются централизованные устройства сигнализации ОЗЗ типа КДЗС-2 (ранее выпускались устройства типа КСЗТ-1 и КДЗС), основанные на принципе относительного замера высших гармоник [29]. Эти устройства основаны на принципе последовательного опроса ТТНП всех присоединений секции шин и определении присоединения с максимальным уровнем высших гармоник в токе нулевой последовательности автоматически. Недостаток, свойственный этим устройствам, представляет относительно большое время поиска присоединения с наибольшим уровнем высших гармоник (около девяти секунд на 20 присоединений), а также невозможность обеспечить их устойчивое функционирование при дуговых прерывистых ОЗЗ [3].

Во ВНИИЭ разработано автоматическое централизованное устройство

относительного замера уровней высших гармоник ПАУК, основанное на принципе параллельного сравнения значений входных сигналов с помощью измерительного органа, выполненного на базе максиселектора. Устойчивое функционирование защиты обеспечивается не только в установившемся, но и в переходных режимах ОЗЗ, благодаря применению принципа параллельного сравнения значений входных сигналов в сочетании с автоматической регулировкой чувствительности. Опытные образцы устройства ПАУК установлены в эксплуатацию в Ленэнерго [3].

Аналогичным принципом действия обладает устройство МКЗЗП-К разработанное в НГТУ. Микроконтроллер сравнивает значения токов нулевой последовательности на выходе их из фильтров [30]. При перемежающейся дуге защита надёжно функционирует, сбрасывая своё состояние только после погасания дуги на время, превышающее её возможное повторное зажигание.

#### 1.3.5. Защиты, сравнивающие направления мгновенной мощности нулевой последовательности в присоединениях

Одним из устройств, основанных на контроле направления мгновенной мощности нулевой последовательности, является централизованное направленное устройство защиты типа «Импульс», использующее в качестве величин для определения направления мощности НП ток НП  $i_0$  и производную  $du_0/dt$  [12]. Устройство предназначено для селективной сигнализации ОЗЗ в сетях 3-10 кВ, работающих с изолированной, резистивно-заземлённой или с компенсированной нейтралью.

Устройство защиты типа «Импульс» по данным [6] является недостаточно надёжным.

#### 1.3.6. Защиты с определением наибольшего вектора тока

Существует централизованное комплексное устройство селективной сигнализации ОЗЗ типа СЗВИ, определяющее повреждение по наибольшей амплитуде начального тока и по направлению установившегося тока НП. Это



устройство защиты в момент замыкания производит параллельное сравнение амплитуд токов всех присоединений защищаемой сети, фиксирует номер присоединения с максимальной амплитудой начального переходного тока. Срабатывание защиты возможно только в том случае, если орган направления мощности НП указывает к месту повреждения.

Известно также устройство типа ЗЗВИ [31], которое является усовершенствованным вариантом СЗВИ. Оно обладает большей чувствительностью, способностью фиксировать кратковременные перемежающиеся замыкания на землю и действовать на установившиеся ОЗЗ [3].

1.3.7. Защиты, основанные на принципе сравнения токов с частотой, отличной от промышленной

Сочетание принципов выявления наличия контрольного тока в поврежденном присоединении и централизованного анализа токов всех присоединений, позволяет повысить чувствительность таких устройств защиты. Наиболее распространенной частотой наложенного контрольного тока является частота 25 Гц. Таким образом, устройство ЦЗ должно быть отстроено от естественных гармонических составляющих при внешних дуговых перемежающихся ОЗЗ, но при этом оставаться достаточно чувствительным к контрольному току при замыканиях через большие переходные сопротивления.

Например, защиты выпускаемые НПП «Бреслер» работают только при устойчивых замыканиях на землю с длительностью более 1 секунды, так как при пропадании тока нулевой последовательности происходит возврат защиты в исходное состояние [32].

Основным недостатком таких устройств является необходимость установки в нейтраль сети устройства генерации контрольного тока [12, 33].

### 1.3.8 Защиты, использующие информацию о напряжении нулевой последовательности со второй секции шин подстанции

В сетях, содержащих большое количество ВЛ, с параллельными цепями, расположенными на одной опоре, и при раздельной работе секций сборных шин, возможны неселективные действия защит установленных на неповрежденной секции при ОЗЗ. Это связано с тем, что между двумя цепями воздушных линий, подключенных к разным секциям, существует связь через межцепные ёмкости, и при ОЗЗ на одной из цепей напряжение нулевой последовательности возникает на обеих секциях сборных шин, и токи нулевой последовательности протекают через линии, присоединённые как к одной секции сборных шин подстанции, так и к другой. На неповрежденной секции при ОЗЗ появляется напряжение НП, которое может привести к пуску ЦЗ, и, соответственно, к неселективному выбору поврежденного присоединения с большим током. Для того чтобы избежать такого неселективного действия, необходимо либо вводить ток срабатывания ЦЗ, отстроенный от этих режимов, либо использовать информацию о напряжении НП другой секции шин. При использовании напряжения НП другой секции шин защита будет действовать только в том случае, если напряжение нулевой последовательности защищаемой секции шин окажется больше [34].

## 1.4. Электромагнитная совместимость устройств релейной защиты и автоматики

Многолетний опыт эксплуатации позволяет выделить три основные причины отказов в работе устройств релейной защиты и автоматики: неправильные действия персонала, неисправности и неселективные действия устройств РЗА и недостаточная электромагнитная совместимость [35, 36].

Неправильная работа устройств РЗА по причине недостаточной ЭМС составляет до 10% от всех случаев ложной работы и касается в основном только РЗА на микроэлектронной (МЭ) и микропроцессорной (МП) элементной

базе. Это связано с высокой чувствительностью к электромагнитным помехам этих устройств РЗА. То есть определяется физической реализацией устройства. Для нарушения работы интегральных микросхем достаточно проникновения электромагнитным или кондуктивным путем помехи с энергией в  $10^{-7}$  Дж. Для электромеханических устройств энергия, вызывающая сбои в их работе больше примерно в 10000 раз. При электромагнитном воздействии происходит нарушение работы МП устройств РЗА или кратковременный сбой в работе с последующим восстановлением функций.

Замена устаревших устройств РЗА на МП может обернуться значительными проблемами, если не уделять внимание ЭМС этих устройств. Такие проблемы должны решаться комплексно. С одной стороны – необходимо выдвигать требования к устройствам РЗА, помехоустойчивость которых должна соответствовать уровню помех на энергообъектах, но с другой – помехи, излучаемые электроустановками, не должны превышать нормы.

Нормы по ЭМС в России появились относительно недавно. Государственные стандарты по этой тематике написаны на основе нормативных документов международной электротехнической комиссии (МЭК). Стандарты ГОСТ Р 51317.4.1–51317.4.5 [37] описывают виды испытаний, способы их проведения и нормируют степени жесткости испытаний. Для всего оборудования электростанций и подстанций существует ГОСТ Р 51317.6.5-2006 [38], который определяет требования к устройствам, в том числе релейной защиты. До появления этих стандартов некоторые предприятия выпускали свои собственные документы, чтобы регламентировать основы ЭМС электрооборудования. Например, были выпущены: РД 153-34.0-35.648-01 [39], РД 153-34.1-35.137-00 [40].

Согласно [38] устройства РЗА применяются в жесткой промышленной электромагнитной обстановке. Стандарт регламентирует качество функционирования устройств РЗА, точность и оперативность функционирования которых не должны быть подвержены нарушениям в результате воздействия помех. То есть не допускается:

- потеря функции защиты и создание критических ситуаций (включая повреждение элементов силовых систем);
- задержка в выполнения защитных операций и возникновение повышенных нагрузок элементов силовых систем;
- нежелательное функционирование, следствием которого являются ошибочный ход процесса или длительное нарушение рабочих условий;
- потеря эксплуатационной последовательности записи информации, приводящей к невозможности определения места и анализа нарушения (повреждения) [38].

Выполнение требований полной устойчивости устройств РЗА к помехам и наличие соответствующего запаса помехоустойчивости являются обязательными условиями подтверждения соответствия требованиям ЭМС.

В зависимости от вида испытания меняется и степень жесткости (таблица 1.1) [38]. В том случае, если проведены специальные меры помехоподавления, требования к устройствам РЗА по ЭМС могут быть снижены и отличаться от указанных в [41].

Если устройства РЗА устанавливаются на действующей станции или подстанции, необходимо проводить обследование электромагнитной обстановки (ЭМО). Электромагнитная обстановка должна соответствовать нормам [42, 43]. Все требования нормативных документов, учитывающих электромагнитную совместимость технических средств, введены относительно недавно, поэтому применяются в основном при сооружении новых объектов. Там же где приходится внедрять современное микропроцессорное оборудование, электроустановки могут не соответствовать современным требованиям к ЭМО.

Защиты устанавливаются на подстанциях и распределительных пунктах с высшим напряжением 35 и 10 кВ, из которых наиболее распространены последние. Между тем, если на подстанциях напряжением 110 кВ и выше проводились обследования ЭМО [44, 45, 46], то для электроустановок рассматриваемых классов напряжения экспериментальные данные практически

отсутствуют.

Таблица 1.1

Виды помех и их испытательный уровень для устройств РЗА электроустановок  
среднего напряжения

Вид помех	Степень жесткости	Испытательный уровень
Порт корпуса		
Магнитное поле промышленной частоты	2	3 А/м (непрерывное магнитное поле)
	5	100 А/м (непрерывное магнитное поле) 1000 А/м (кратковременное магнитное поле, 1с)
Радиочастотное электромагнитное поле 80 – 3000 МГц	3	10 В/м
Электростатические разряды	3	6 кВ (контактный разряд) 8 кВ (воздушный разряд)
Сигнальные порты		
Напряжение промышленной частоты	4	30 В (длительные помехи) 300 В (1с)
Микросекундные импульсные помехи большой энергии (1/50 мкс – 6,4/16 мкс) по схеме:		
- провод–провод	4	4 кВ
- провод–земля	3	2 кВ
Повторяющиеся колебательные затухающие помехи по схеме:		
- провод–провод	3	2,5 кВ
- провод–земля		1 кВ
Наносекундные импульсные помехи	X	4 кВ
Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями	3	10 В

Низковольтные входные и выходные порты электропитания переменного тока		
Провалы напряжения электропитания	—	$\Delta U$ 30 % (1 период) $\Delta U$ 60 % (50 периодов) <sup>1</sup>
Прерывания напряжения электропитания	—	$\Delta U$ 50 % (5 периодов) $\Delta U$ 100% (50 периодов) <sup>1</sup>
Микросекундные импульсные помехи большой энергии (1/50 мкс— 6,4/16 мкс) по схеме:		
- провод—провод	3	2кВ
- провод—земля	2	1 кВ
Наносекундные импульсные помехи	3	2 кВ
Повторяющиеся колебательные затухающие помехи по схеме:	2	
- провод—провод		1 кВ
- провод—земля		0,5 кВ
Кондуктивные помехи, наведённые радиочастотными электромагнитными полями	3	10 В
Порт функционального заземления		
Наносекундные импульсные помехи (ввод помехи с применением ёмкостных клещей связи)	3	2 кВ
Кондуктивные помехи, наведённые радиочастотными электромагнитными полями	3	10 В

<sup>1</sup> — только для портов электропитания, непосредственно подключенных к низковольтным системам электроснабжения общего назначения.

### 1.5. Задачи исследования

Проведённый выше анализ показал, что большинство защит от замыканий на землю, которые эксплуатируются в настоящее время в сетях 6-35 кВ, в ряде случаев не способны селективно реагировать на однофазные замыкания на землю [6, 47]. В настоящее время стоит задача разработки новых,

более совершенных защит от ОЗЗ.

Наиболее перспективными защитами от замыканий на землю являются централизованные защиты. Однако известным типам централизованных защит присущи такие недостатки как:

- недостаточное быстродействие;
- работа только на сигнал;
- неселективная работа при замыканиях на секции шин;
- неселективная работа на удаленных подстанциях в сетях с большими токами замыкания на землю;
- по условиям ЭМС защиты должны устойчиво работать в электромагнитной обстановке, свойственной электроустановкам напряжением 6...35 кВ.

В связи с этим задачи настоящего исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Создать математическую модель сети 10 кВ, включающую в себя основные элементы сети, с учетом всех параметров, влияющих на переходные процессы в данной сети. Математическая модель в совокупности с материалами натурных экспериментальных исследований позволит охватить исследованиями максимальное число возможных вариантов развития процессов при однофазных замыканиях на землю.

2. Разработать алгоритмы функционирования защиты централизованного типа, позволяющие выявлять замыкания на землю в сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью при любых типах повреждений, особенно при дуговых замыканиях.

3. Провести расчётно-экспериментальную проверку алгоритмов, включающую три этапа:

- расчётная проверка с использованием математической модели сети;
- расчётно-экспериментальная проверка на основании реальных осциллограмм, снятых при ОЗЗ в действующих сетях 10 кВ;
- опытно-промышленная проверка образцов централизованных защит,

использующих созданные алгоритмы.

4. Экспериментально исследовать уровень электромагнитных помех в РУ 10 кВ и определить технические меры по обеспечению электромагнитной совместимости.



## **2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 кВ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ КАБЕЛЬНЫЕ И ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ**

### **2.1. Основные положения**

При составлении схемы замещения приняты следующие основные положения:

1) Энергосистема, от которой получают питание сети среднего напряжения, заменена либо шинами бесконечной мощности, либо некоторой системой с определенной мощностью короткого замыкания ( $S_{K3}$ ). Это позволяет рассматривать сети 6-35 кВ независимо от системы, так как эти сети зачастую электрически значительно удалены от генераторов (не считая сетей генераторного напряжения), и процессы, происходящие в них, такие как замыкания на землю, не влияют на режимы питающих сетей, система в таком случае выполняет роль источника питания.

2) Сети 6-35 кВ связаны с системой через питающие трансформаторы, для которых в основном применяются схемы соединения звезда-треугольник ( $Y/\Delta$ ), но иногда встречаются и звезда-звезда ( $Y/Y_n$ ). Схема замещения трансформатора принята упрощенной, без ветви намагничивания: идеальный трансформатор, подключенный через сопротивления первичной и вторичной обмоток [48].

3) Кабельные и воздушные линии моделируются схемами с распределенными параметрами. Для кабельных линий распределение параметров по фазам однородное ввиду того, что трехфазные кабели имеют одинаковые размеры жил и геометрию их расположения. При наличии в сети воздушных линий или кабельных линий однофазного исполнения учитывается неоднородность параметров между фазами, если не выполнена транспозиция.

4) Модель трансформатора напряжения (ТН) включает нелинейную зависимость характеристики намагничивания трансформатора напряжения нулевой последовательности.

5) Модель трансформатора тока НП включает в себя вольтамперную характеристику трансформатора. Для трансформатора тока нулевой последовательности характеристика принимается единой для однотипных трансформаторов тока (ТТ), для трехтрансформаторного фильтра токов НП такая характеристика варьируется для разных типов трансформаторов, а также для всех трех фаз трансформатора.

6) Учитывается только активная нагрузка трансформаторов тока.

7) Индуктивным сопротивлением резистора, устанавливаемого в нейтраль силового трансформатора при его наличии, либо подключаемого с помощью нейтралеобразующего трансформатора, можно пренебречь ввиду его незначительности относительно сопротивления трансформатора.

## 2.2. Моделирование элементов схемы замещения

### 2.2.1. Моделирование трансформаторов

При замыканиях на землю понижающие силовые трансформаторы продолжают работать в нормальном режиме, что позволяет использовать простую схему замещения трансформатора. Любой трансформатор моделируется с помощью эквивалентной схемы трансформатора с ферромагнитным сердечником, приведённой в [49].

Рассмотрим трансформатор с двумя электрически не соединёнными обмотками, имеющими числа витков  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Не учитывая распределение напряжения между отдельными их витками и анализируя только напряжения на зажимах обмоток, любой трансформатор можно представить упрощённо (рис. 2.1). Линии потока  $\Phi_0$  охватывают все витки обеих обмоток. Линии потока  $\Phi_{\sigma 1}$  охватывают все витки только первичной обмотки.

Для потокосцеплений с первичной и вторичной катушками можем написать

$$\Psi_1 = \Psi_{\sigma 1} + \Psi_{01} = L_{\sigma 1} i_1 + \omega_1 \Phi_0;$$

$$\Psi_2 = \Psi_{\sigma 2} + \Psi_{02} = L_{\sigma 2} i_2 + \omega_2 \Phi_0.$$

где  $\Psi_{\sigma 1}$  и  $\Psi_{\sigma 2}$  – потокосцепление рассеяния первичной и вторичной обмотки,  $L_{\sigma 1}$  и  $L_{\sigma 2}$  – индуктивности обмоток,  $i_1$  и  $i_2$  – токи обмоток,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – число витков обмоток.

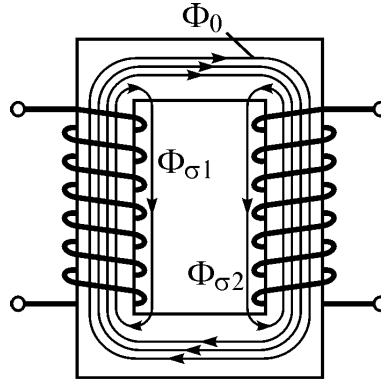


Рис. 2.1. Распределение магнитного потока в трансформаторе

Принимая, что к зажимам первичной обмотки трансформатора приложено напряжение  $u_1$ , а к зажимам вторичной обмотки подключен приемник. Разделив магнитный поток на потоки рассеяния и основной, можем написать уравнения трансформатора в виде

$$u_1 = r_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + \omega_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = r_1 i_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + u_0;$$

$$-\omega_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = r_2 i_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} + u_2;$$

Выше представленные выражения можно написать в комплексной форме:

$$U_1 = r_1 \dot{I}_1 + j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1 + U_0;$$

$$E_2 = r_2 \dot{I}_2 + j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2 + U_2,$$

При применении компьютерного моделирования упрощение расчетов не требуется, поэтому величины вторичной обмотки не приводятся к первичным величинам, что удобнее для анализа работы сети и позволяет получать напряжения и токи в том же масштабе, что и в действительности.

Связь между комплексной амплитудой потока  $\Phi_0$  и вызывающей этот поток МДС  $i_1 w_1 + i_2 w_2$  в комплексной форме запишется как

$$\dot{\Phi}_{0M} = \frac{\dot{I}_{1M}\omega_1 + \dot{I}_{2M}\omega_2}{Z_M} = \frac{\dot{I}_{1M}\omega_1 + \dot{I}'_{2M}\omega'_2}{Z_M} = \frac{(\dot{I}_{1M} + \dot{I}'_{2M})\omega_1}{Z_M} = \frac{\dot{I}_{0M}\omega_1}{Z_M},$$

где  $Z_M = R_M + jX_M$  – комплексное магнитное сопротивление сердечника,

причем  $X_M$  учитывает потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи.

Такой общей схемой замещения можно представить все виды трансформаторов. Силовые трансформаторы в нормальном режиме работают при индукциях, не превышающих 1.7 Тл. [50]. При замыканиях на землю в питаемой сети режим работы силовых трансформаторов не изменяется. Вторичная обмотка трансформатора соединена либо в треугольник, либо в звезду. При этом нейтраль звезды может быть заземлена через относительно большое сопротивление. Поэтому токи обмоток при замыканиях на землю не превышают номинальных, что позволяет моделировать силовой трансформатор простой схемой, представленной на рис. 2.2, и не учитывать нелинейность характеристики намагничивания сердечника ввиду рабочей индукции, не превышающей индукцию насыщения.

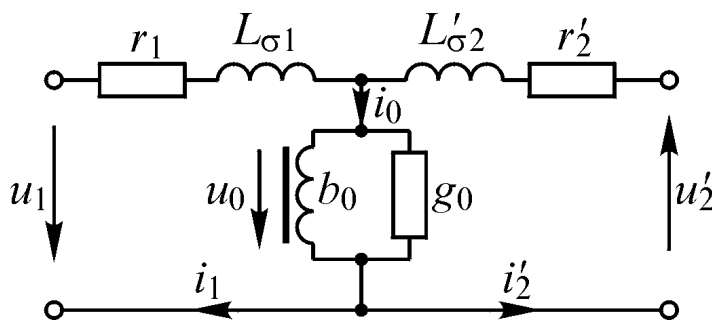


Рис. 2.2. Схема замещения трансформатора, приведённая к первичной стороне

Для окончательного упрощения схемы замещения трансформатора, используем вместо Т-образной Г-образную схему замещения, где сопротивления первичной и вторичной стороны суммируются и отображаются одной ветвью. При переходе к такому варианту схемы замещения параметры рассчитываются по следующим формулам [51]:

$$R_T = \frac{\Delta P_K U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}^2} - \text{активное сопротивление трансформатора};$$

$$X_T = \frac{U_{K,\%} U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}} - \text{индуктивное сопротивление трансформатора};$$

$$G_T = \frac{\Delta P_X}{U_{\text{НОМ}}^2} - \text{активная проводимость трансформатора};$$

$$B_T = \frac{\Delta Q_X}{U_{НОМ}^2} - \text{реактивная проводимость трансформатора,}$$

$$\text{где } \Delta Q_X = \frac{I_{X,\%} S_{НОМ}}{100} - \text{потери реактивной мощности холостого хода}$$

(XX);  $\Delta P_K$  – потери короткого замыкания, кВт;  $\Delta P_X$  – потери холостого хода, кВт;  $U_{НОМ}$  – номинальное напряжение трансформатора, кВ;  $S_{НОМ}$  – номинальная мощность, МВА;  $U_K$  – напряжение короткого замыкания, %;  $I_X$  – ток XX.

### 2.2.2. Моделирование нейтралеобразующих трансформаторов

При отсутствии выведенной нейтрали на силовом трансформаторе, возникает проблема подключения таких устройств как резистор или дугогасящая катушка. Для их подключения необходимо организовать нейтраль. Для этого могут использоваться как обычные силовые трансформаторы (например ТСЗК-63-10, ТМ-250/6, ТМ-630/10 и др. [52]) со схемой соединения обмоток звезда с нулевым проводом – треугольник, так и специальные нейтралеобразующие трансформаторы – фильтры присоединений (например ФМЗО-200/11, см. таблицу 2.1) имеющие только одну первичную обмотку, соединенную в зигзаг.

Таблица 2.1

Расчетные параметры различных нейтралеобразующих трансформаторов

Тип	$I_{НОМ}$ , А	$U_K$ , %	$P_{K3}$ , кВт	$P_{XX}$ , кВт	$I_{XX}$ , %	$R_T$ , Ом	$X_T$ , Ом	$G_T$ , мкСм	$B_T$ , мкСм
ТМ-250/6	24	4.5	3.7	0.65	1.2	2.13	6.5	18	83
ТМ-400/6	38.5	4.5	5.5	0.80	1.1	1.23	4.0	22.2	122
ТМ-630/6	61.0	5.5	7.7	1.25	1.0	0.7	3.14	35	175
ТМ-250/10	14.5	4.5	3.7	0.65	1.2	5.92	18.0	6.5	30
ТМ-630/10	36.4	6.5	7.7	1.25	1.0	1.94	8.75	12.5	63
ФМЗО-80/11	10.1	3.2	1.2	0.16	1.5	11.8	34.8	1.3	5.2
ФМЗО-200/11	25.2	4.2	3	0.25	1.8	4.72	18.3	2.1	7.9
ФМЗО-500/11	63	5.5	5	0.85	0.7	1.26	9.6	7	13.1

Сопротивление силовых трансформаторов определяется по формулам, приведённым выше, а для нейтралеобразующего трансформатора со схемой соединения зигзаг есть некоторые особенности, описанные в [53]. Опыт короткого замыкания для таких устройств проводится путем замыкания фазных обмоток накоротко и пропускания тока через эту общую точку и нейтраль. Поэтому сопротивление нулевой последовательности можно определить следующим образом (таблица 2.1):

$$Z_{НП} = \frac{U_K \cdot U_{НОМ} 100\%}{I_{НОМ}},$$

где  $I_{НОМ}$  – номинальный ток трансформатора.

### 2.2.3. Погонные параметры кабелей и воздушных линий с учетом их зависимости от частоты

При замыканиях на землю в сетях 6-35 кВ переходные процессы в основном зависят от параметров линий электропередачи. На эти процессы оказывают влияние, как ёмкость линии, так и её активное и индуктивные сопротивления.

Основными параметрами электрических цепей являются сопротивление  $r$ , ёмкость  $C$  и индуктивность  $L$ . Если имеет место электромагнитное воздействие на данную цепь со стороны других цепей или даже если внутри данной цепи наблюдается такое взаимное воздействие одного ее участка на другой, то в число параметров цепи войдут еще взаимная индуктивность  $M$  и взаимная ёмкость.

При расчетах установившихся режимов можно не учитывать частотные зависимости параметров. Наиболее сложными режимами работы защит, является выявление дугового замыкания на землю. Моделирование такого процесса требует моделей отдельных элементов сети, зависящих от частоты.

Первичные продольные параметры трехфазной кабельной линии однофазного исполнения (собственные и взаимные индуктивности и активные сопротивления) из-за проникновения электромагнитного поля в проводящие

среды (жилы, оболочки и землю) являются частотно-зависимыми [54]. Поэтому от частоты будут зависеть и волновые параметры. Для отображения частотной зависимости параметров линий электропередачи созданы модели Карсона[55], Дюбантона[56], Ведепола[57].

Модель Ведепола составлена для кабельной линии при следующих допущениях [57]:

- кабельная линия состоит из металлических проводников, оси которых взаимно параллельны и параллельны поверхности земли;
- кабельные линии вдоль своих осей однородны;
- пренебрегаем распространением электрического поля в радиальном направлении в земле.

Погонные продольные параметры представлены сопротивлениями  $\dot{Z}_1^*$  .....  $\dot{Z}_7^*$ , формулы для вычисления которых в диапазоне относительно низких частот (единицы тысяч Гц) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

#### Основные электрические погонные параметры кабеля

Активное и внутреннее индуктивное сопротивление жилы, обусловленное электромагнитным полем в жиле	$\dot{Z}_1^* = \frac{m_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}{2\pi \cdot r_1} \operatorname{cth}(r_1 m_{\text{ж}}) - \frac{\rho_{\text{ж}}}{2\pi \cdot r_1^2},$ <p>где <math>m_{\text{ж}} = \exp(j\pi/4) \sqrt{\omega \cdot \mu_0 / \rho_{\text{ж}}}</math></p>
Внешнее индуктивное сопротивление жилы, определяемое электромагнитным полем в изоляции между жилой и экраном	$\dot{Z}_2^* = \frac{j\omega \mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$
Активное и внутреннее индуктивное сопротивление экрана, определяемое падением напряжения на внутренней стороне экрана от тока, возвращающегося по жиле (канал «жила – экран»)	$\dot{Z}_3^* = \frac{m_{\text{э}} \rho_{\text{э}}}{2\pi \cdot r_2} \operatorname{cth}(\Delta_{\text{э}} m_{\text{э}}) - \frac{\rho_{\text{э}}}{2\pi \cdot r_2(r_2 + r_3)},$ <p>где <math>m_{\text{э}} = \exp(j\pi/4) \sqrt{\omega \cdot \mu_0 / \rho_{\text{э}}}</math>,  <math>\Delta_{\text{э}} = r_3 - r_2.</math></p>

Взаимное индуктивное сопротивление между каналами жила-экран и экран-земля, определяемое падением напряжения вдоль внешней поверхности экрана при единице тока внутри жилы	$\dot{Z}_4^* = \frac{m_3 \rho_3}{\pi(r_2 + r_3)} \csc h(\Delta_3 m_3)$
Активное и внутреннее индуктивное сопротивление экрана, определяемое падением напряжения на внешней стороне экрана от тока, возвращающегося по земле (канал «экран – земля»)	$\dot{Z}_5^* = \frac{m_3 \rho_3}{2\pi \cdot r_3} \operatorname{cth}(\Delta_3 m_3) + \frac{\rho_3}{2\pi \cdot r_3(r_2 + r_3)}$
Внешнее индуктивное сопротивление экрана, определяемое электромагнитным полем в изоляции между экраном и землей	$\dot{Z}_6^* = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$
Собственное сопротивление земли как обратного провода	$\dot{Z}_7^* = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left( -\ln \frac{1.78 l m_3 r_4}{2} + \frac{1}{2} - \frac{4}{3} m_3 h \right),$ где $m_3 = \exp(j\pi/4) \sqrt{\omega \cdot \mu_0 / \rho_3}$

Собственное внутреннее сопротивление жилы экрана равно  $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3$ . Индуктивное сопротивление коаксиальной линии жила-экран равно сумме внутренней индуктивности жилы, экрана, внешней индуктивности, т.е.  $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3$ . Аналогично имеем для системы (линии) экран-земля:  $\dot{Z}_5 + \dot{Z}_6 + \dot{Z}_7$ .

Обе эти системы токов взаимно влияют друг на друга с коэффициентом взаимной индукции  $\dot{Z}_4$ . Следовательно, индуктивное сопротивление первой системы учетом влияния второй будет  $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 - \dot{Z}_4$ , а для второй  $\dot{Z}_5 + \dot{Z}_6 + \dot{Z}_7 - \dot{Z}_4$ .

Таким образом, схема замещения индуктивных параметров будет иметь вид рис. 2.3. Где видно, что для коаксиальной системы жила-экран (без земли)



индуктивное сопротивление определяется  $\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 - \dot{Z}_4 + \dot{Z}_4$ , а для коаксиальной системы экран-земля сопротивление определяется  $\dot{Z}_4 + \dot{Z}_5 + \dot{Z}_6 + \dot{Z}_7 - \dot{Z}_4$ . В таблице 2.3 приведены формулы для расчета сопротивлений отдельных элементов кабеля.

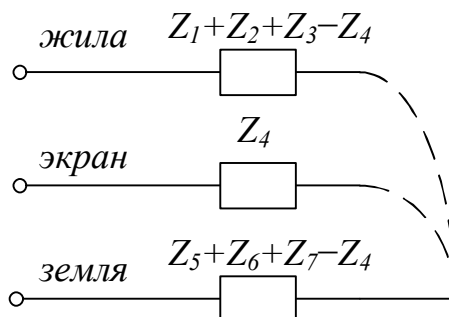


Рис. 2.3. Схема замещения индуктивных параметров кабеля.

Таблица 2.3

Собственные и взаимные погонные сопротивления кабеля

Собственное сопротивление жилы (Ом/м)	$\dot{Z}_{Ж}^* = \dot{Z}_1^* + \dot{Z}_2^* + \dot{Z}_3^* + \dot{Z}_5^* + \dot{Z}_6^* + \dot{Z}_7^* - 2\dot{Z}_4^*$
Собственное сопротивление экрана (Ом/м)	$\dot{Z}_{Э}^* = \dot{Z}_5^* + \dot{Z}_6^* + \dot{Z}_7^*$
Взаимное сопротивление между жилой и экраном одного и того же кабель (Ом/м)	$\dot{Z}_{ЖЭ}^* = \dot{Z}_5^* + \dot{Z}_6^* + \dot{Z}_7^* - \dot{Z}_4^*$
Взаимное сопротивление жилы (экрана) и соседнего кабеля (Ом/м)	$\dot{Z}_K^*$ (или $\dot{Z}_{KL}^*$ )

Взаимное индуктивное сопротивление между фазами кабельной линии определяется на основании формулы Полячека [58]:

$$\dot{Z}_{KL}^* = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[ -\ln \frac{1.78 I m_3 s_{KL}}{2} + \frac{1}{2} - \frac{2}{3} m_3 (h_K - h_L) \right]$$

где  $s_{KL}$  – расстояние между центрами К-й и L-й фаз кабеля;  $h_K$  и  $h_L$  – глубины залегания К-й и L-й фаз кабеля, отсчитываемые от поверхности земли.

Для кабельной линии из однофазных кабелей АНХСМК-WTC/PE 1х120/35 10 кВ на 1 километр длины расчетные параметры отражены на рис. 2.4 и 2.5.

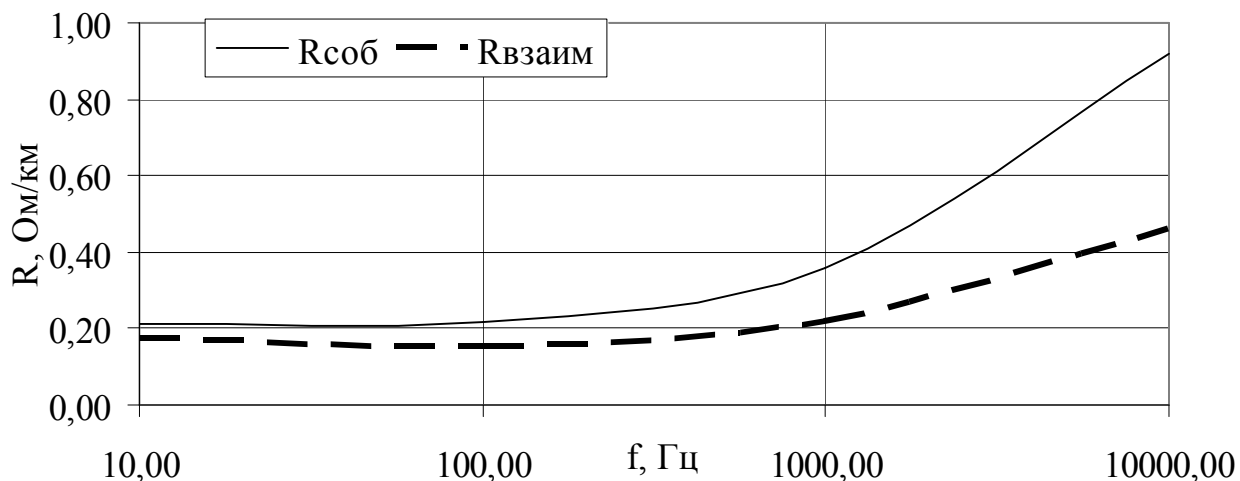


Рис. 2.4. Зависимости активных сопротивлений кабеля АНХСМК-WTC/РЕ 1х120/35 от частоты

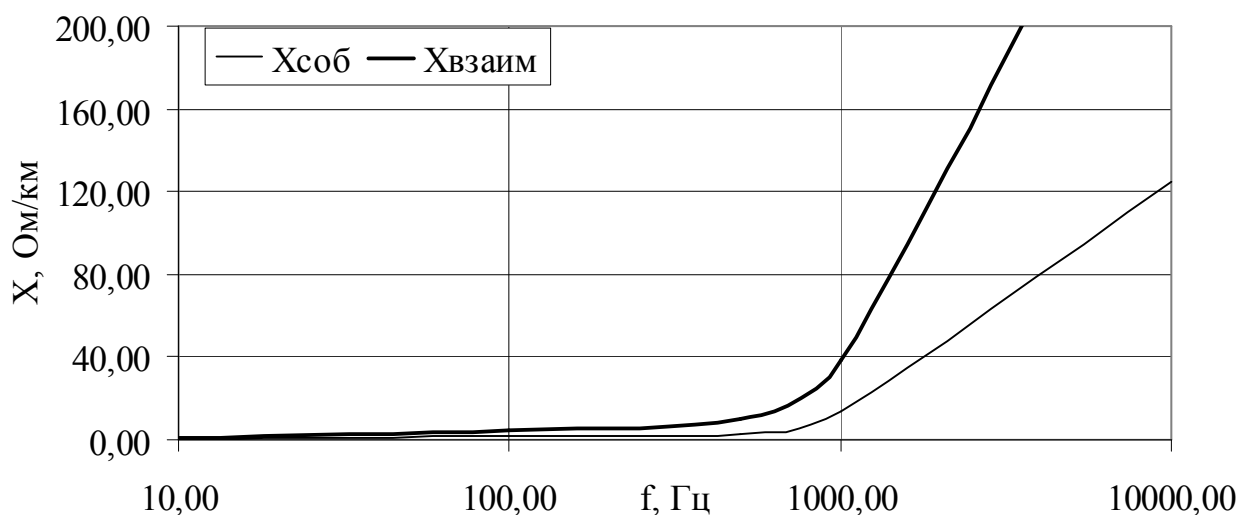


Рис. 2.5. Зависимости реактивных сопротивлений кабеля АНХСМК-WTC/РЕ 1х120/35 от частоты

В работе [59] проведён расчет погонных параметров ряда трехфазных кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией методом конечных элементов. Например, для трехфазного кабеля ААБЛУ-6/10 3х185 зависимости параметров от частоты следующие (рис. 2.6, 2.7):

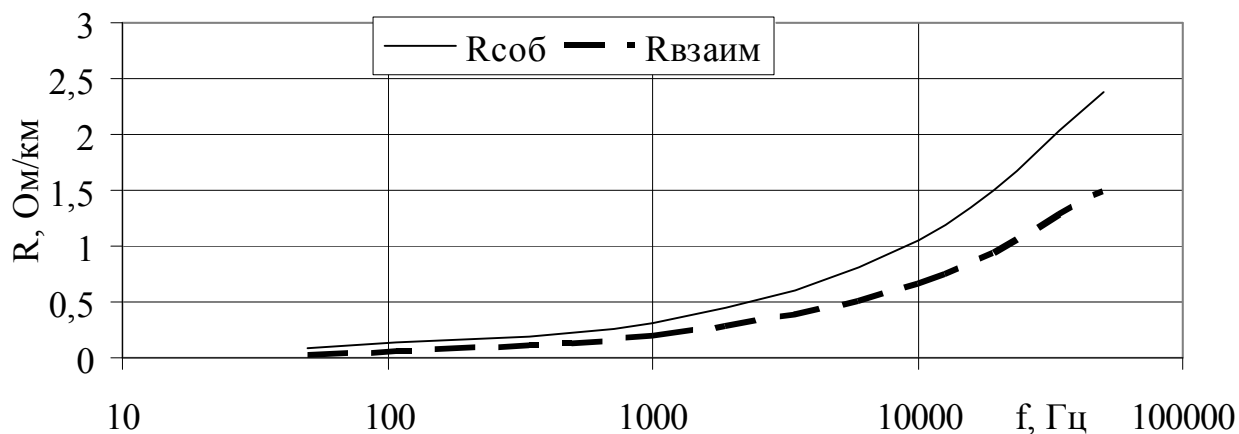


Рис. 2.6. Зависимости активных сопротивлений кабеля ААБЛУ-6/10 3x185 от частоты

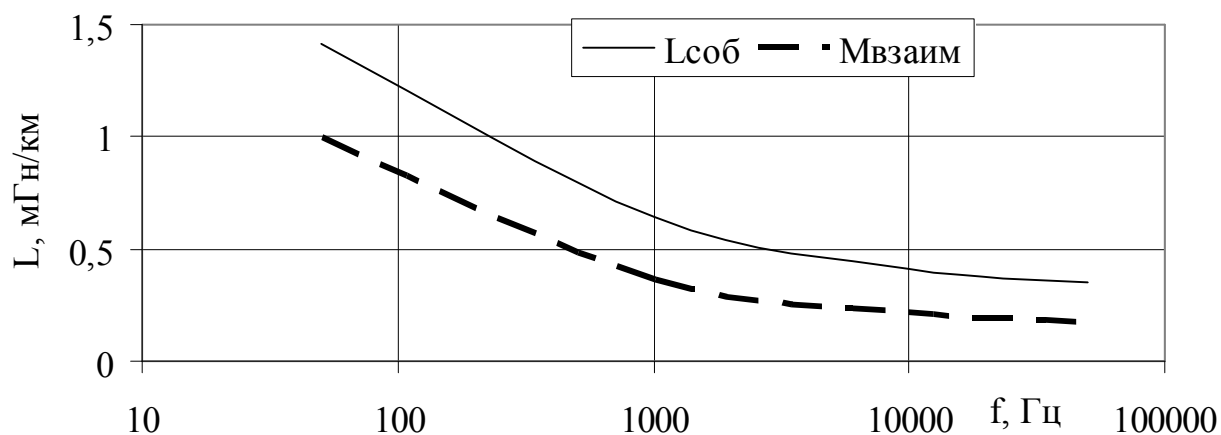


Рис. 2.7. Зависимости собственной и взаимной индуктивностей кабеля ААБЛУ-6/10 3x185 от частоты

С точки зрения расчета погонных параметров, воздушные линии проще, так как их размеры и форма токоведущих частей являются практически идеальными геометрическими фигурами, что позволяет получить аналитические выражения для расчета параметров. Частотные зависимости для ВЛ 10 кВ можно рассчитать по формулам, приведённым в [54]. Для стандартной воздушной линии электропередачи 10 кВ расчетные параметры в зависимости от частоты приведены на рис. 2.8 и 2.9.

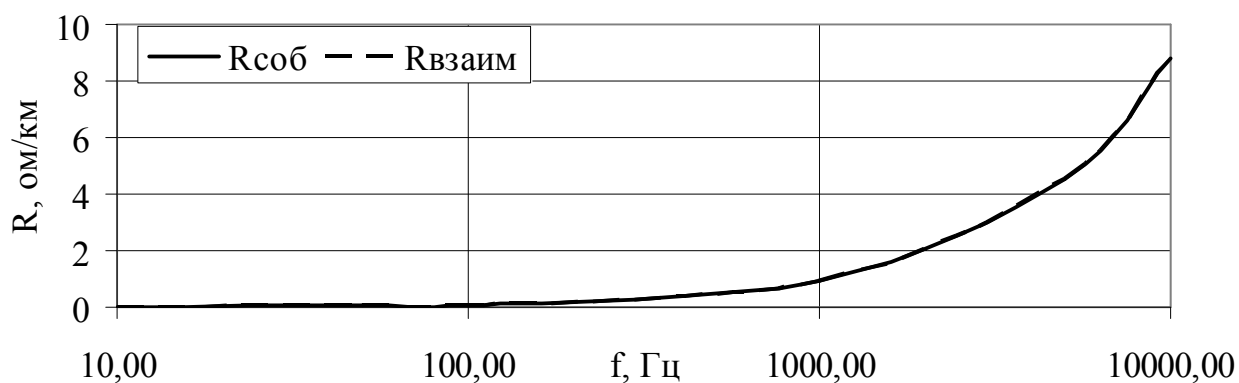


Рис. 2.8. Зависимости активных сопротивлений ВЛ 10 кВ от частоты

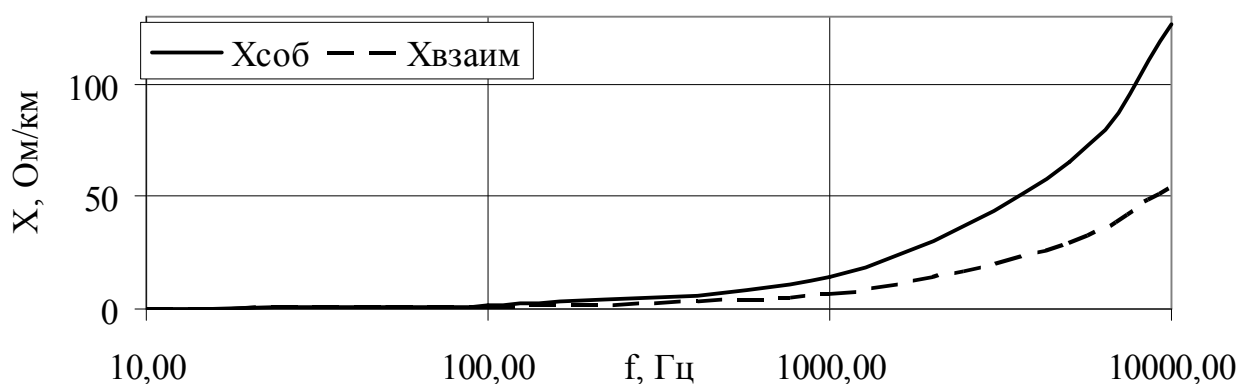


Рис. 2.9. Зависимости реактивных сопротивлений ВЛ 10 кВ от частоты

#### 2.2.4. Упрощенный расчет погонных параметров кабельных линий

Не во всех случаях в моделях кабельных и воздушных линии требуется использовать зависимости от частоты. Для расчетов установившихся режимов, либо для ускорения расчетов сложных замыканий на землю можно применять упрощенный расчет параметров воздушных и кабельных линий.

Наиболее просто параметры кабельных и воздушных линий можно получить из теории поля. Например, ёмкость для отрезка концентрического кабеля длиной  $l$  с радиусом внутреннего провода  $r_1$  и внутренним радиусом наружного провода  $r_2$  можно определить по теореме Гаусса [49] через разность потенциалов между внутренним и наружным проводами:

$$C = \frac{2\pi \varepsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $r_1$  – наружный радиус жилы,  $r_2$  – внутренний радиус экрана.

Аналогичным образом можно получить значение для индуктивности того же концентрического кабеля, для упрощения полагая, что внутренний провод является прямым, а наружный — обратным. Учитывая поток в изолирующем веществе и поток в теле внутреннего провода, получаем формулу для расчета индуктивности [60].

$$L = \frac{l}{2\pi} \left( \mu_0 \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\mu}{4} \right)$$

Таким образом, ёмкость  $C$  определяется параметром  $\varepsilon$  среды, где существует электрическое поле, и геометрическими размерами, а индуктивность  $L$  определяется абсолютными магнитными проницаемостями  $\mu$  сред, в которых существует магнитное поле, и геометрическими размерами.

Расчет по представленным формулам будет в значительной мере неточным, это связано с существенными допущениями, принятыми при таком представлении кабеля. Поэтому проще воспользоваться готовыми выражениями для приближенного расчета параметров кабельных линий [61, 62, 63]. Для этого получим расчетные выражения для параметров кабелей, основываясь на известных формулах для собственных взаимных погонных активно-индуктивных сопротивлений многопроводной системы провода–земля [64]. Провода (жилы, экраны) предполагаются находящимися в воздухе над землей. В этом случае расстояние до земли не имеет значения, т.к. для расчетов режимов на промышленной частоте 50 Гц «обратные провода» находятся от реальных на расстоянии  $D_3$ , составляющем сотни метров.

Расстояние  $D_3$ , а также активное сопротивление земли  $R_3$ , можно определять упрощенно. При вычислении ёмкостных параметров кабелей они предполагаются, как это имеет место, находящимися под землей.

Для определения параметров кабеля делаем следующие допущения [64]:

- геометрия расположения в пространстве трехфазной системы кабелей такова, что расстояние между кабелями много больше их диаметра;

- если фазы кабеля расположены в вершинах равностороннего треугольника, то  $s = d_{AB} = d_{BC} = d_{AC}$ ;

- если фазы кабеля расположены на одном уровне ( $d_{AC} = 2d_{AB} = 2d_{BC}$ ), то при транспозиции жил кабеля  $s = \sqrt[3]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{AC}} = 1.26 \cdot d_{AB}$

- экран кабеля упрощенно считаем таким, что внешний радиус экрана  $r_3 \gg (r_3 - r_2)$ ; это позволяет пренебречь конечной толщиной экрана и в расчетах использовать лишь его внутренний радиус;

- пренебрегаем токами смещения в земле;

- пренебрегаем эффектом близости на промышленной частоте, считая активные сопротивления жил экранов как на постоянном токе.

На основании выше предложенных допущений параметры кабеля можно определить по формулам, предложенным в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Основные электрические параметры кабеля

Активное сопротивление жилы (Ом/м)	$R_{ж}^* = \rho_{ж} \frac{l}{F_{ж}}$
Активное сопротивление экрана (Ом/м)	$R_{э}^* = \rho_{э} \frac{l}{F_{э}}$
Активное сопротивление земли (Ом/м)	$R_3^* = \frac{\pi}{4} \mu_0 f$
Эквивалентная глубина (м)	$D_3 = 2,24 \sqrt{\frac{\rho_3}{\omega \cdot \mu_0}}$
Собственная индуктивность жилы (Гн/м)	$L_{ж}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_1}\right)$
Собственная индуктивность экрана (Гн/м)	$L_{э}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right)$

Взаимная индуктивность между жилой (экраном) и соседним кабелем (Гн/м)	$M_K^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{s}\right)$
Взаимная индуктивность между жилой и экраном одного и того же кабеля (Гн/м)	$M_{ЖЭ}^* = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_3}{r_2}\right)$
Ёмкость между жилой и экраном (Ф/м)	$C_{ЖЭ}^* = \frac{2\pi \varepsilon_1 \varepsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$
Ёмкость между экраном и землей (Ф/м)	$C_{Э}^* = \frac{2\pi \varepsilon_2 \varepsilon_0}{\ln \frac{r_4}{r_3}}$

где  $F_{Ж}$  – сечение жилы ( $\text{м}^2$ ),  $F_{Э}$  – сечение экрана ( $\text{м}^2$ ),  $\varepsilon_1$  - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции между жилой и экраном (о.е.),  $\varepsilon_2$  - относительная диэлектрическая проницаемость изоляции экрана (о.е.).

Собственные и взаимные погонные сопротивления кабеля:

Собственное сопротивление жилы (Ом/м)  $\dot{Z}_Ж^* = R_3^* + R_{Ж}^* + j\omega L_{Ж}^*$

Собственное сопротивление экрана (Ом/м)  $\dot{Z}_{Э}^* = R_3^* + R_{Э}^* + j\omega L_{Э}^*$

Взаимное сопротивление жилы (экрана) и соседнего кабеля (Ом/м)  $\dot{Z}_K^* = R_3^* + j\omega M_K^*$

Взаимное сопротивление между жилой и экраном одного и того же кабеля (Ом/м)  $\dot{Z}_{ЖЭ}^* = R_3^* + j\omega M_{ЖЭ}^*$

В зависимости от состояния экрана по концам линии изменяются граничные условия, а вместе с ними и расчетные выражения для определения сопротивлений прямой и нулевой последовательностей. Конечные выражения для упрощенного расчета параметров кабельных линий приведены в табл. 2.5.

Результаты расчетов сопротивлений прямой и нулевой последовательностей трехфазной группы однофазных кабелей, а также токов и напряжений в их экранах на промышленной частоте, не отличаются друг от друга более чем на 10% при использовании упрощенных формул для погонных параметров по сравнению с более точными [61-64]. Поэтому применение этих

выражений в большинстве случаев оправдано, для расчетов активных и индуктивных погонных параметров кабельных линий. Погонные ёмкостные параметры рассчитываются одинаково, как для упрощенной, так и для частотно-зависимой модели (табл. 2.4).

Таблица 2.5

Формулы для упрощенных расчетов продольных параметров кабеля по прямой и нулевой последовательностям.

№	Состояние экрана	Сопротивление прямой последовательности	Сопротивление нулевой последовательности
1	Разземлен	$\dot{Z}_1^* = \dot{Z}_Ж^* - \dot{Z}_К^*$	$\dot{Z}_0^* = \dot{Z}_Ж^* + 2\dot{Z}_К^*$
2	Заземлен с одной стороны	$\dot{Z}_1^* = \dot{Z}_Ж^* - \dot{Z}_К^*$	$\dot{Z}_0^* = \dot{Z}_Ж^* + 2\dot{Z}_К^*$
3	Заземлен с двух сторон	$\dot{Z}_1^* = (\dot{Z}_Ж^* - \dot{Z}_К^*) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ}^* - \dot{Z}_К^*)^2}{\dot{Z}_Э^* - \dot{Z}_К^*}$	$\dot{Z}_0^* = (\dot{Z}_Ж^* + 2\dot{Z}_К^*) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_К^*)^2}{\dot{Z}_Э^* + 2\dot{Z}_К^*}$
4	Применена транспозиция экранов (N полных циклов)	$\dot{Z}_1^* = \dot{Z}_Ж^* - \dot{Z}_К^*$	$\dot{Z}_0^* = (\dot{Z}_Ж^* + 2\dot{Z}_К^*) - \frac{(\dot{Z}_{ЖЭ}^* + 2\dot{Z}_К^*)^2}{\dot{Z}_Э^* + 2\dot{Z}_К^*}$

### 2.2.5. Моделирование трансформаторов напряжения

При замыканиях на землю напряжения на неповрежденных фазах могут достигать значений, значительно превышающих линейное напряжение. Эти перенапряжения чаще всего связаны с перемежающейся электрической дугой в месте замыкания и называются дуговыми. В таких режимах зачастую происходит насыщение электромагнитных трансформаторов напряжения. В



работах [65-68] предложены математические модели трансформаторов напряжения различных моделей, применяемых в сетях 6-35 кВ. Трансформаторы напряжения НТМИ-6, -10, ЗНОМ-35 при моделировании требуют учитывать характеристику намагничивания. Параметры трансформаторов напряжения определены и описаны в работах [57, 66]. В таблице 2.6 и на рис. 2.10 представлены параметры наиболее распространенных трансформаторов напряжения, применяемых в сетях среднего напряжения.

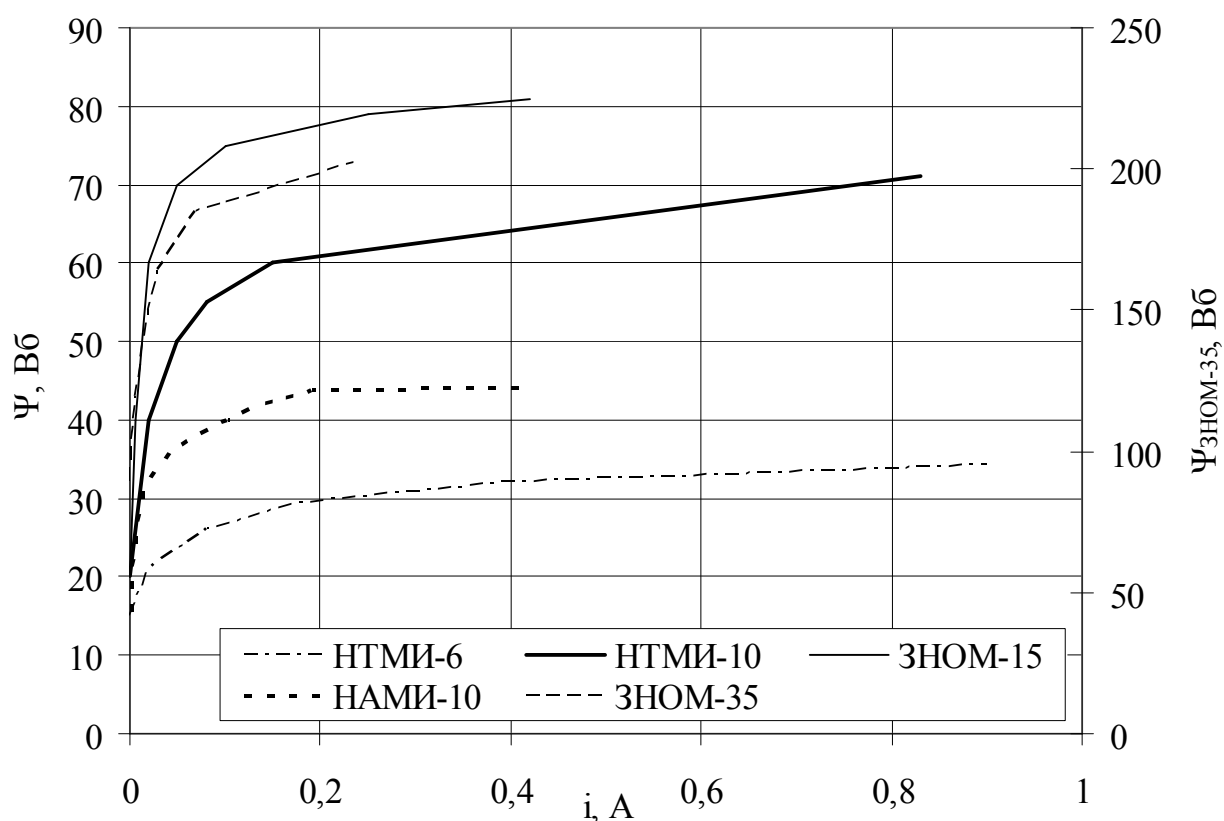


Рис. 2.10. Кривые намагничивания ТН разных типов

Схема замещения трансформатора напряжения отличается от схемы силового трансформатора только наличием ветви намагничивания, и имеет вид изображенный на рис. 2.11.

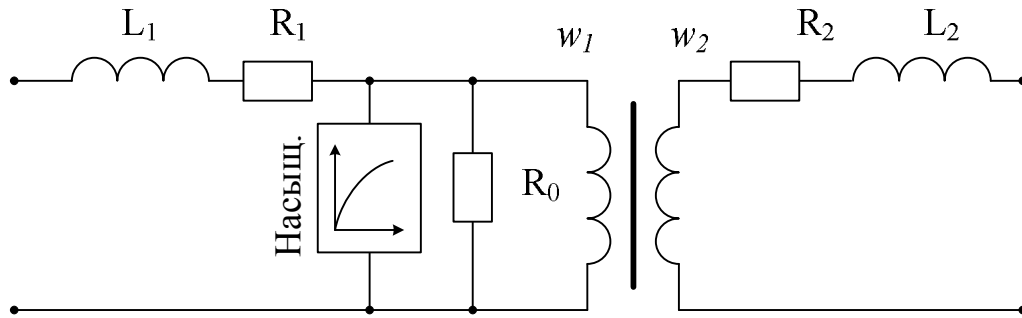


Рис. 2.11. Схема замещения трансформатора напряжения.

Согласно [57] сопротивления вторичных обмоток ТН принимаются равными сопротивлениям первичной обмотки. Для решения поставленных задач это допущение приемлемо.

Таблица 2.6

Электромагнитные параметры наиболее распространенных трансформаторов напряжения

Тип трансформатора	$R_{ВН},$ кОм	$L_{\sigma},$ Гн	$L_{НАС},$ Гн	$\Psi_{НОМ},$ В·с	$\frac{\Psi_{НАС}}{\Psi_{НОМ}}$	$w_1$	$w_2$	$R_0,$ МОм
НТМИ-6-66	1,2	1,8...2,5	2,5...3,7	15,6	2	5930	57	3,546
НТМИ-10-66	1,8	2,8...4	4...6	26	2,24	9880	57	7,334
НТМИ-18	2,5	4...6	8	46,8	2	15000	48	10,1
ЗНОМ-15-63	2,2	5	7,5	39	2,14	12740	49	9,765
ЗНОМ-20-63	5	5	7,5	52	2	17000	49	15,946
ЗНОМ-24	7,5	40...60	80...90	62,4	2	20400	49	21,446
ЗНОМ-35-65	7,5	40...60	80...90	91	1,96	29730	49	45,61

### 2.2.6. Моделирование трансформаторов тока

При измерении тока нулевой последовательности используются два различных основных способа [68]:

а) с помощью одного общего ТТНП, на магнитопроводе которого располагаются первичная трехфазная и одна вторичная обмотка (рис. 2.12). Таким путем осуществляется суммирование магнитных потоков, создаваемых токами трех фаз, а во вторичной обмотке возникает ЭДС, пропорциональная связанному с нею результирующему суммарному магнитному потоку.

б) с помощью трех отдельных ТТ, устанавливаемых на фазах

контролируемой первичной цепи (рис. 2.13). Вторичные обмотки всех трех ТТ соединяются согласованно параллельно в ФТНП. При таком соединении обмоток эквивалентная результирующая ЭДС во вторичной цепи пропорциональна сумме ЭДС трех ТТ, т.е. здесь непосредственно производится суммирование этих ЭДС.

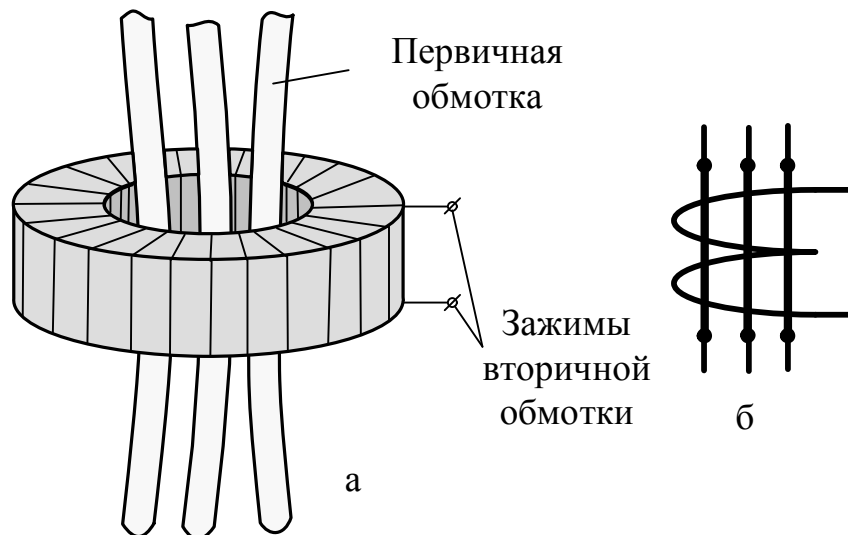


Рис. 2.12. Схема ТТНП (а) и его обозначение (б)

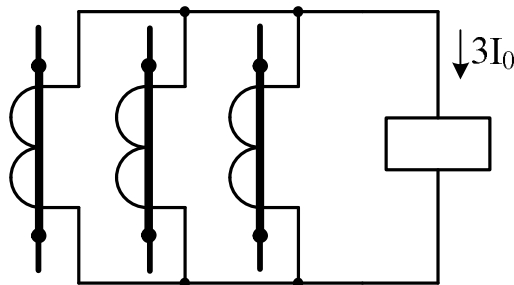


Рис. 2.13. Схема трехтрансформаторного ФТНП с присоединенным к нему реле

Строго говоря, в соответствии с определением [69, 70] трансформаторы тока нулевой последовательности не являются трансформаторами тока в точном понимании этого термина, поскольку трансформатором тока называется такой трансформатор, в котором при нормальных условиях работы выходной сигнал является током, практически пропорциональным первичному току и при правильном включении сдвинутым относительно него по фазе на угол, близкий к нулю. В отечественных ТТНП типа ТЗЛ, ТЗЛМ, ТЗР, ТЗРЛ и других это требование обычно не выполняется, поэтому их скорее можно назвать

измерительными преобразователями или датчиками тока [71]. При этом коэффициент трансформации меняется как при изменении нагрузки ТТНП, так и от одного типа ТТНП к другому, а также в разных экземплярах одного типа.

Как описано в [72], погрешность ТТНП возможно снизить следующими способами:

- использованием при изготовлении магнитопроводов магнитных материалов с большей магнитной проницаемостью, чем применяемые в настоящее время (аморфное железо, некоторые марки феррита и т.д.);
- увеличением площади поперечного сечения магнитопровода;
- увеличением числа вторичных витков (повышение коэффициента трансформации);
- снижением вторичной нагрузки и т.д.

Схема замещения ТТ принципиально не отличается от схемы замещения любого трансформатора, из исключением одной особенности – ветвь намагничивания находится на вторичной стороне трансформатора тока (рис. 2.14).

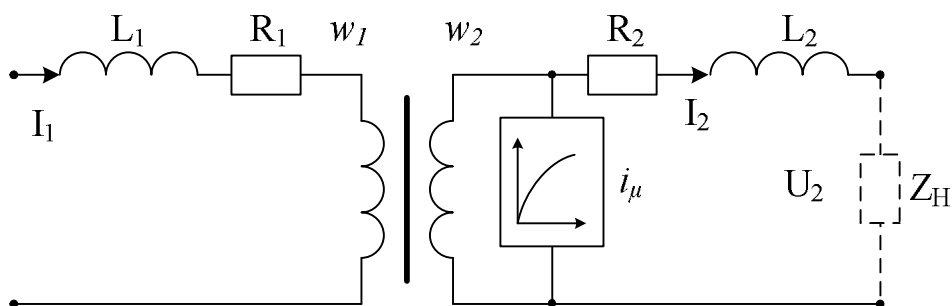


Рис. 2.14. Схема замещения трансформатора тока

Данная схема может быть упрощена [73]. Первичная обмотка трансформатора тока представляет собой проходящую насквозь трансформатор тока шину, а это значит, что активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки трансформатора тока можно принять равными нулю. Индуктивность рассеяния вторичной обмотки очень мала и тоже может быть принята равной нулю. Остается только активное сопротивление вторичной

обмотки ТТ и его характеристика намагничивания.

При больших токах происходит насыщение ТТ и снижение вторичного тока. В области номинальных токов характеристика намагничивания ТТ практически линейна, небольшая нелинейность всегда присутствует на начальном участке кривой намагничивания, поэтому при моделировании ТТ для анализа работы защит от замыканий на землю необходимо учитывать намагничивание ТТ на малых тока.

Как было сказано выше значительно на работе ТТ сказывается вторичная нагрузка, однако при применении цифровой техники нагрузка на ТТ стремится к минимуму. Другими методами снизить погрешность ТТ не представляется возможным.

### **2.3. Создание расчетной схемы сети с изолированной нейтралью**

На основании предложенных моделей можно создать модель сети 6-35 кВ, любой сложности. Для моделирования таких сетей используются специализированные программные комплексы, позволяющие создавать модели обширных электрических систем. В частности можно выделить наиболее распространенные из них:

- MatLAB с расширением Simulink:SimPowerSystems (США)
- PSCAD (Канада)
- ATP(EMTP) (основана в США)

Отличие по функциональным возможностям между такими программными комплексами практически отсутствует, все они реализуют тот необходимый минимум, что требуется для моделирования любой из сетей. Среди энергетических университетов Америки, Европы и Азии наиболее распространен программный комплекс ATP (EMTP). В данном комплексе реализована возможность моделирования кабельных и воздушных линий электропередачи, имеющих частотные зависимости параметров.

Созданная модель сети 10 кВ, включающая кабельные и воздушные линии электропередачи, реализована в программном комплексе ATP (EMTP)

(рис. 2.15). Каждый элемент этой сети моделируется согласно приведённым выше допущениям и принципам.

Данная модель сети включает в себя кабельные и воздушные линии различного сечения и исполнения, которые могут подключаться и отключаться в процессе работы сети трехфазными выключателями с определенным током среза и установленным временем разрыва каждой из фаз. Точка замыкания может быть установлена на любом из присоединений. Само замыкание может моделироваться как фиксированным значением сопротивления, так и нелинейной зависимостью состояния промежутка от приложенного напряжения и тока (перемежающееся замыкание).

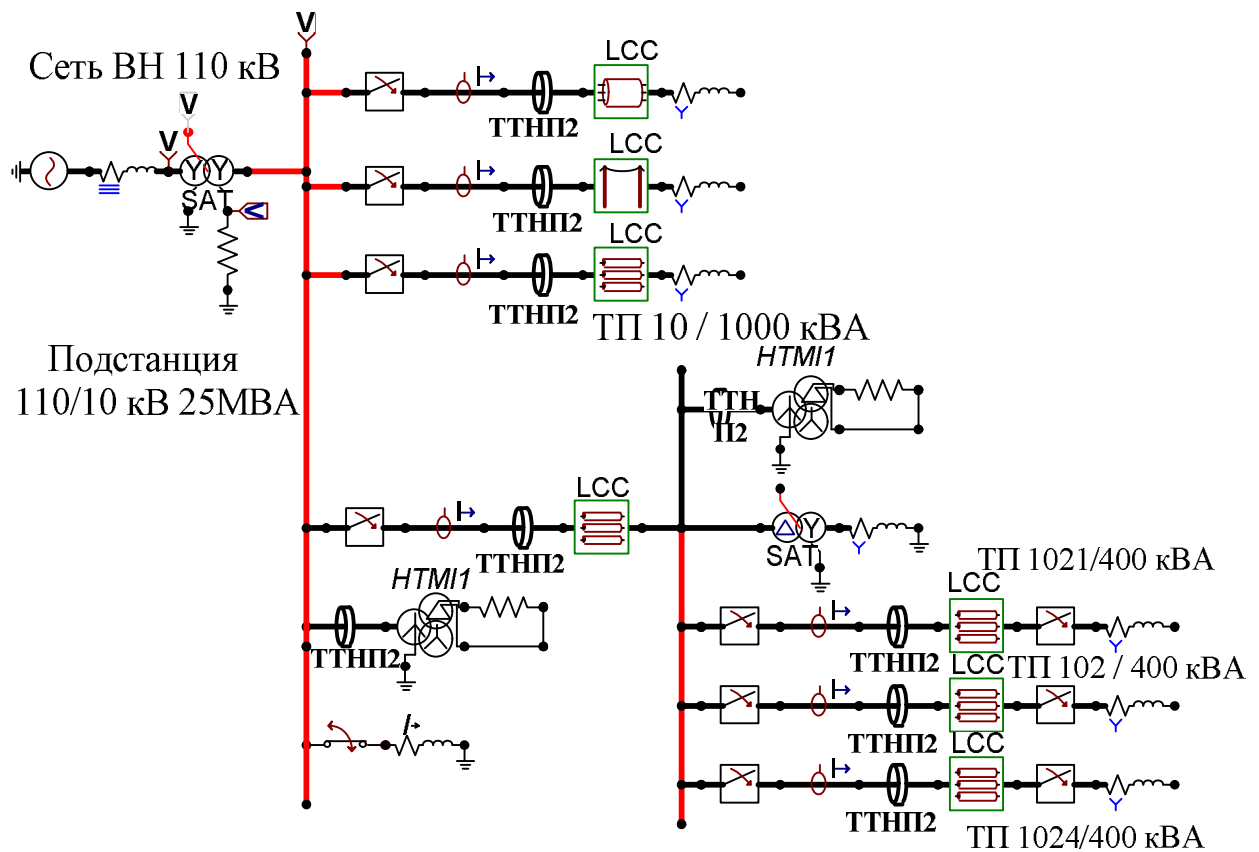


Рис. 2.15. Схема модели сети 10 кВ

## 2.4. Оценка адекватности модели сети

В ходе регистрации<sup>1</sup> замыканий на землю в городской кабельной сети 10 кВ города Ханты-Мансийска получен большой объем осциллограмм замыканий на землю. На основании этих данных возможно провести сравнительный анализ процессов, происходящих в реальной сети, и в модели. Можно выделить два основных вида замыканий на землю. Первый вид – это металлическое замыкание. В случае такого замыкания ток не прерывается, содержит основную гармонику промышленной частоты и нечетные гармоники, среди которых максимальными являются третья и пятая. Вторым видом замыканий являются дуговые замыкания на землю. Этот вид замыканий очень разнообразен [74]. Среди основных вариантов таких замыканий можно выделить следующие (см. приложение 3):

- прерывистые замыкания, когда само замыкание происходит реже раза в полупериод промышленной частоты;
- замыкания с погасанием дуги при переходе тока промышленной частоты через ноль;
- замыкания с погасанием дуги при переходе тока первой и третьей гармоники через ноль (четыре зажигания в период);
- замыкания с погасанием дуги при переходе высокочастотных составляющих тока замыкания через ноль.

По собранным данным (см. приложение 3) вероятность возникновения дуговых замыканий в кабельной сети составляет около 27%. Это говорит о том, что этим видом замыканий пренебречь нельзя. При этом разделение по вероятности возникновения разных дуговых замыканий приблизительно равно, а зачастую один вид дугового замыкания переходит в другой и при длительном горении дуги переходит в металлическое замыкание на землю.

Созданная математическая модель позволяет рассчитывать параметры

---

<sup>1</sup> Для анализа осциллограмм использовалось разработанное специальное программное обеспечение (приложение 2)

процессов при любых типах замыканий. Моделируя характерные процессы при замыканиях на землю, получаем ряд осциллограмм (рис. 2.17, 2.19), которые сравниваем с экспериментальными осциллограммами (рис. 2.16, 2.18), полученными при замыканиях в кабельной сети 10 кВ.

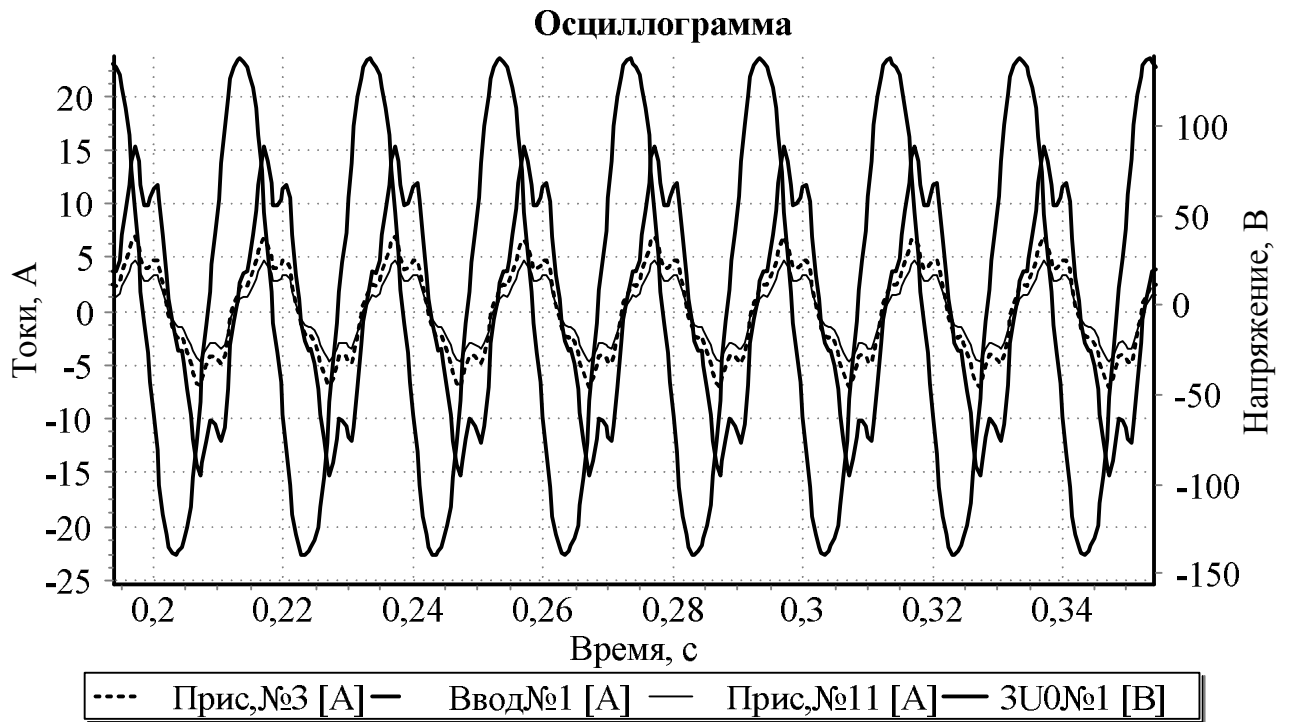


Рис. 2.16. Металлическое замыкание на землю (21.07.2008 16:22:13)

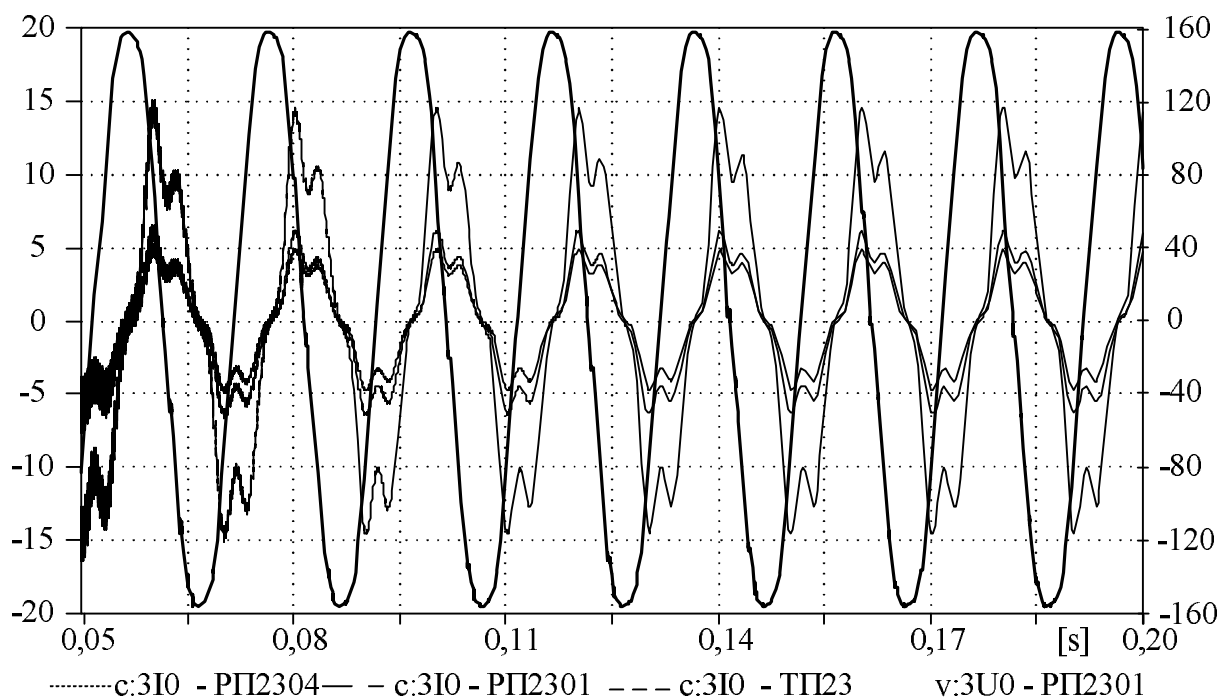


Рис. 2.17. Металлическое замыкание на землю (расчетные кривые)



Несмотря на большое значение высших гармоник в токе, основной является первая гармоника. Большинство защит способно определять поврежденное присоединение при таком виде повреждений.

Немного сложнее обстоит дело с дуговыми замыканиями. Расчет параметров дугового замыкания описан в приложении 4.

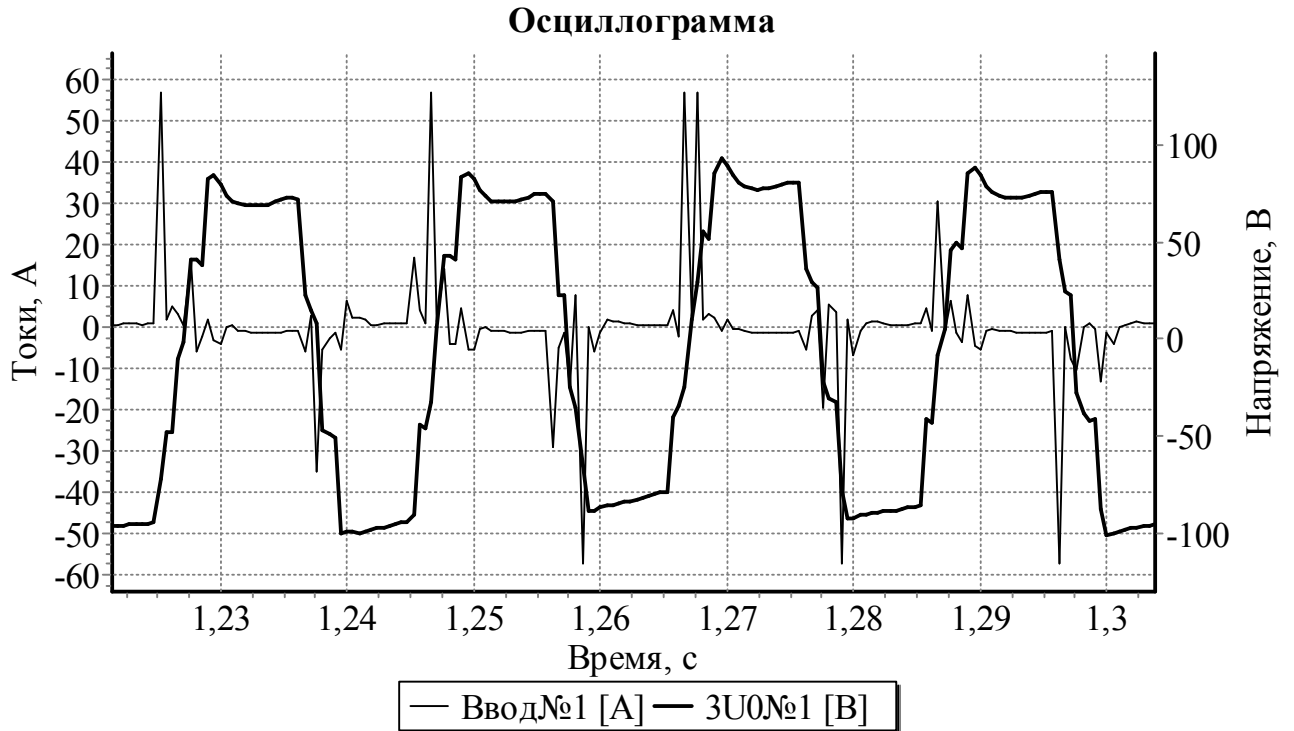


Рис. 2.18. Дуговое замыкание на землю (осциллограмма от 20.06.2008 20:29:50)

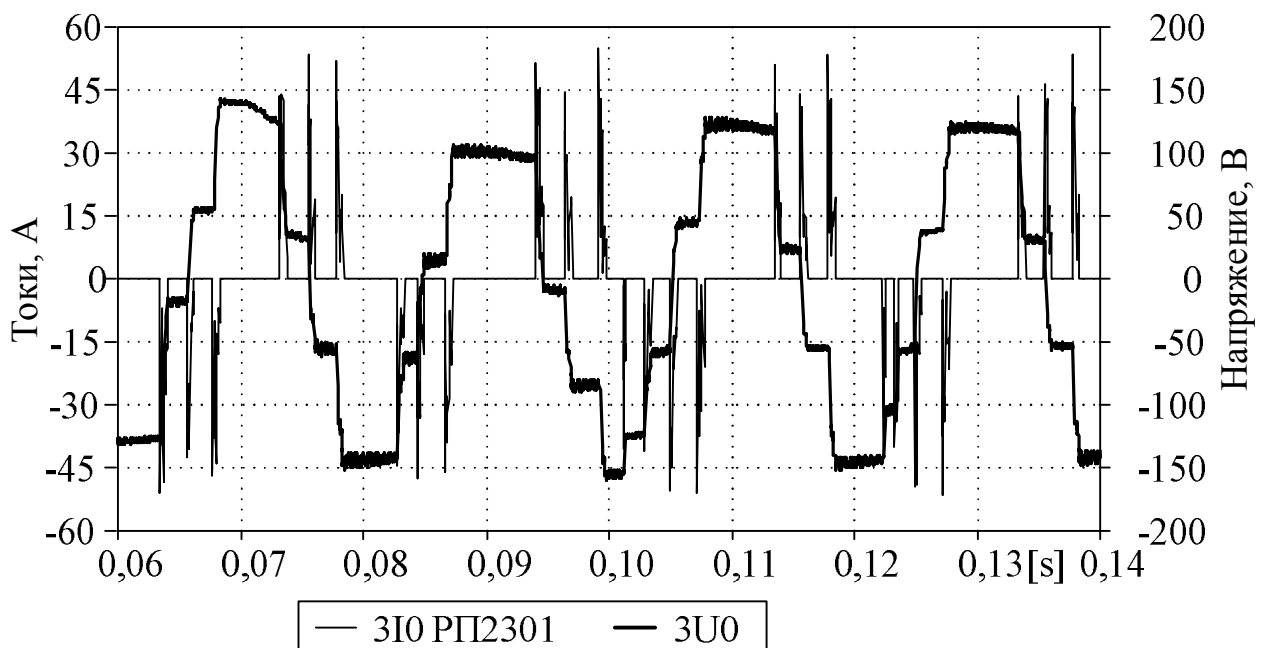


Рис. 2.19. Дуговое замыкание – расчетные осциллограммы

Как видно из рисунков, дуговое замыкание на землю значительно сложнее, при таком типе замыканий отсутствует понятие угла между токами и напряжением нулевой последовательности. Напряжение нулевой последовательности значительно меньше, нежели при металлическом замыкании. Если в напряжении НП первая гармоника промышленной частоты преобладает, то в токе она практически отсутствует.

В результате сравнения полученных осциллограмм с реальными данными можно сделать вывод о том, что принятые допущения и особенности при моделировании каждого отдельного элемента верные. Расчетная модель сети является адекватной, по рассчитанным значениям токов и напряжений можно анализировать функционирование алгоритмов защиты от замыканий на землю. Моделирование позволяет получить сигналы, не всегда доступные для непосредственного измерения в электроустановке.

## **2.5. Определение требований к защите от замыканий на землю**

Из предыдущего параграфа и по данным приложения 3 можно выделить, что защита должна реагировать на следующие виды замыканий:

- металлическое замыкание на землю с большим уровнем высших гармоник. В некоторых случаях коэффициент несинусоидальности кривой тока достигает более 50 %;
- перемежающиеся замыкания на землю, как в виде отдельных замыканий, так и предшествующие металлическим замыканиям. При этом запуск отсчета выдержки времени должен происходить на всех защитах одинаково, вне зависимости от значений токов в защищаемых присоединениях;
- перемежающиеся замыкания с многократным погасанием и зажиганием дуги в течение периода промышленной частоты.

Большинство защит хорошо работают при металлических замыканиях на землю. Два последних условия в основном и определяют те замыкания на землю, при которых происходит отказ в срабатывании защит. Поэтому требуется выявить параметр, на основании которого защита должна

производить запуск выдержки времени, этот параметр не должен зависеть от места замыкания в сети. И основное требование к защите – функционирование при перемежающихся замыканиях на землю.

## **2.6. Выводы по главе**

Сравнение осциллограмм полученных в результате регистрации в кабельной сети 10 кВ и расчетных осциллограмм режимов модели этой сети показало, что модель является адекватной и характер протекания процессов совпадает с действительным.

Адекватность расчётной модели реальным процессам, происходящим при ОЗЗ, обеспечивается:

- Учётом частотных характеристик кабельных и воздушных линий электропередачи по выражениям представленным в данной главе. В случаях упрощенного расчета для оценки тех или иных параметров режима предложены упрощенные выражения для расчета погонных параметров линий электропередачи.

- Использованием в моделях трансформаторов напряжения и трансформаторов тока реальных характеристик ветвей намагничивания, снятых для соответствующих типов этих аппаратов.

Кроме того, показано, что применительно к задачам исследования можно использовать модель дуги в виде автоматического ключа, действующего в соответствии с динамикой токов и напряжений, отражённой в реальных осциллограммах однофазного дугового замыкания (ОДЗ).

### **3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ**

#### **3.1. Основной алгоритм централизованной защиты**

Рассмотренные в первой главе централизованные устройства защиты от замыканий на землю имеют ряд недостатков. Разрабатываемое современное устройство большинство недостатков позволит обойти по причине того, что основано на современной элементной базе. Последняя принципиально позволяет обеспечить: высокое быстродействие, одновременный опрос каналов, комбинация нескольких алгоритмов в одном устройстве, возможность записи осциллограмм для последующего анализа аварийной ситуации.

Внедрение микропроцессорных систем в устройства автоматики и релейной защиты позволило создать универсальные устройства, совмещающие несколько функций, и обрабатывающие множество сигналов в реальном времени. Для централизованных защит от замыканий на землю, построенных на старой элементной базе, именно одновременная обработка сигналов являлась слабым местом, которое можно ликвидировать благодаря современным технологиям. Базовый алгоритм функционирования централизованной защиты от ОЗЗ реализует сравнение амплитуд токов нулевой последовательности во всех элементах данного напряжения подстанции и определяет поврежденный элемент по наибольшей амплитуде. Пуск защиты происходит по напряжению НП. Такое устройство не требует отстройки от бросков переходных токов, обусловленных собственными ёмкостями присоединений, что позволяет обеспечить селективность и чувствительность в сетях с изолированной нейтралью.

Отстройка от токов небаланса при пусковых токах возможна по времени. Значения токов небалансов при пусковых режимах зависят напрямую от несимметрии по продольным сопротивлениям фаз и от неодновременности замыкания фаз выключателя. На рис. 3.1 приведена расчетная осциллограмма

токов отходящего присоединения П1 при пуске двигателя<sup>2</sup>. Отличие сопротивлений фаз этого присоединения составляет 1%, полюса выключателя замыкаются с разницей в 5 мс. Осциллограммы напряжения и тока НП для этого случая приведены на рис. 3.2.

При разности во времени между срабатыванием каждой из фаз выключателя равной 1 мс, напряжения и токи НП значительно снижаются (рис. 3.3).

Установка выдержки времени большей времени завершения сверхпереходного процесса в пускающейся нагрузке позволяет не отстраиваться от этого режима. Степень селективности по времени обычно равна 0.5 секунды и минимальная уставка принимается равной этому значению.

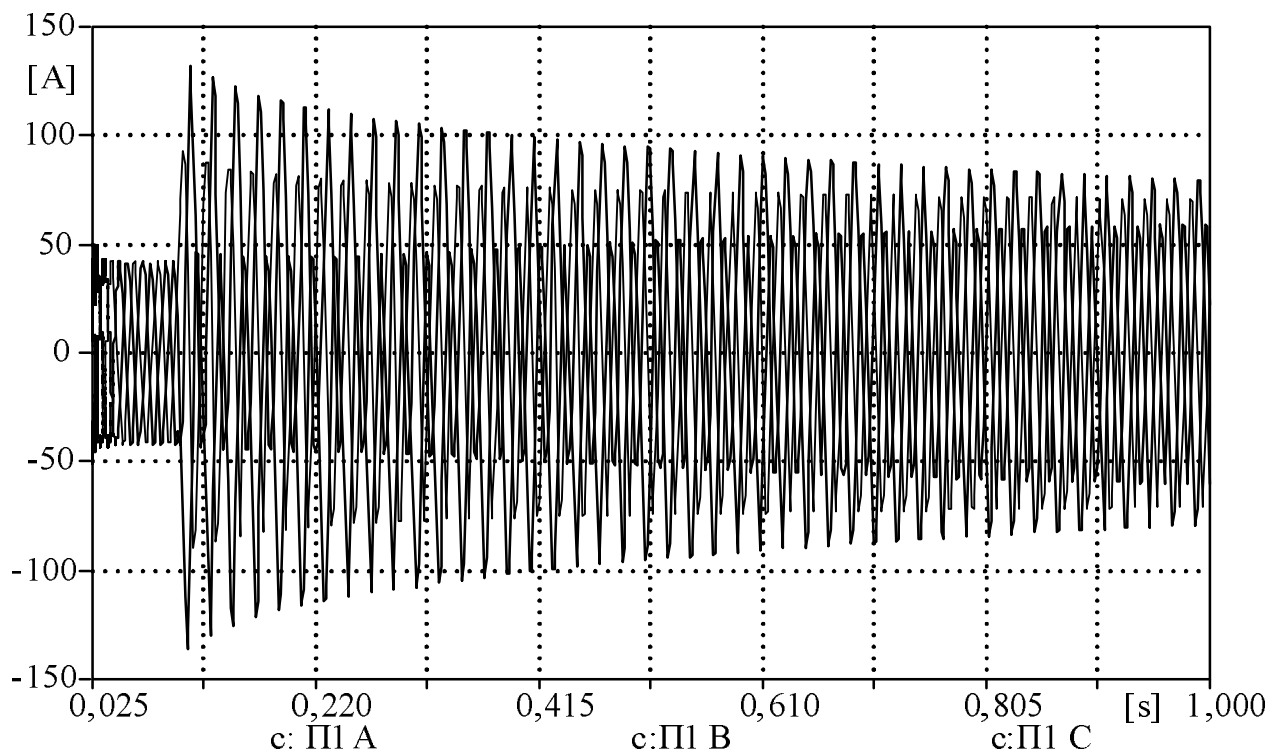


Рис. 3.1. Расчетные осциллограммы фазных токов присоединения П1 ТП23 при пуске двигателя при несимметрии фаз и несинхронности работы фаз выключателя

<sup>2</sup> Здесь и далее все расчёты проводятся для конкретных схем городских сетей г. Ханты-Мансийска, где внедрялись опытные образцы разрабатываемых защит.

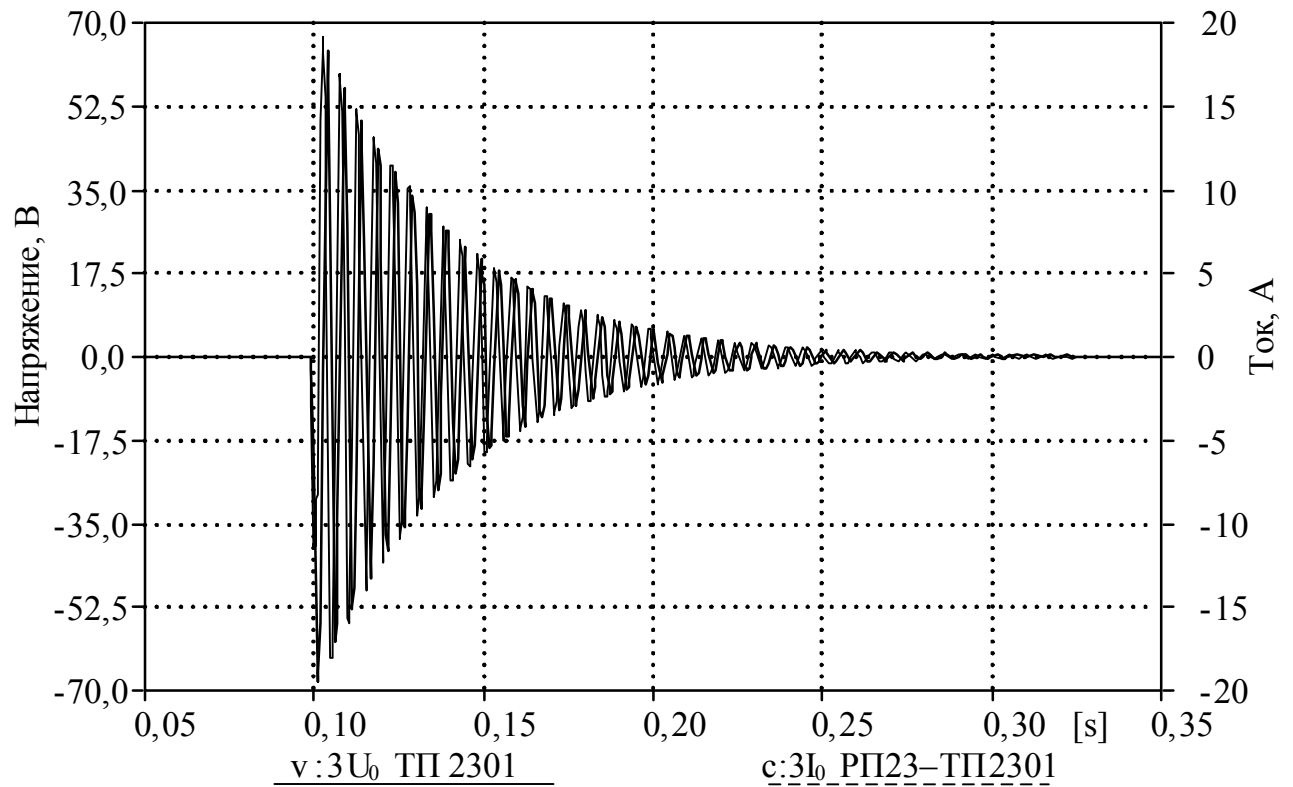


Рис. 3.2. Расчетные осциллограммы напряжения и тока НП при пуске двигателя подстанции на ТП23 с несинхронной работой фаз выключателя в 5 мс.

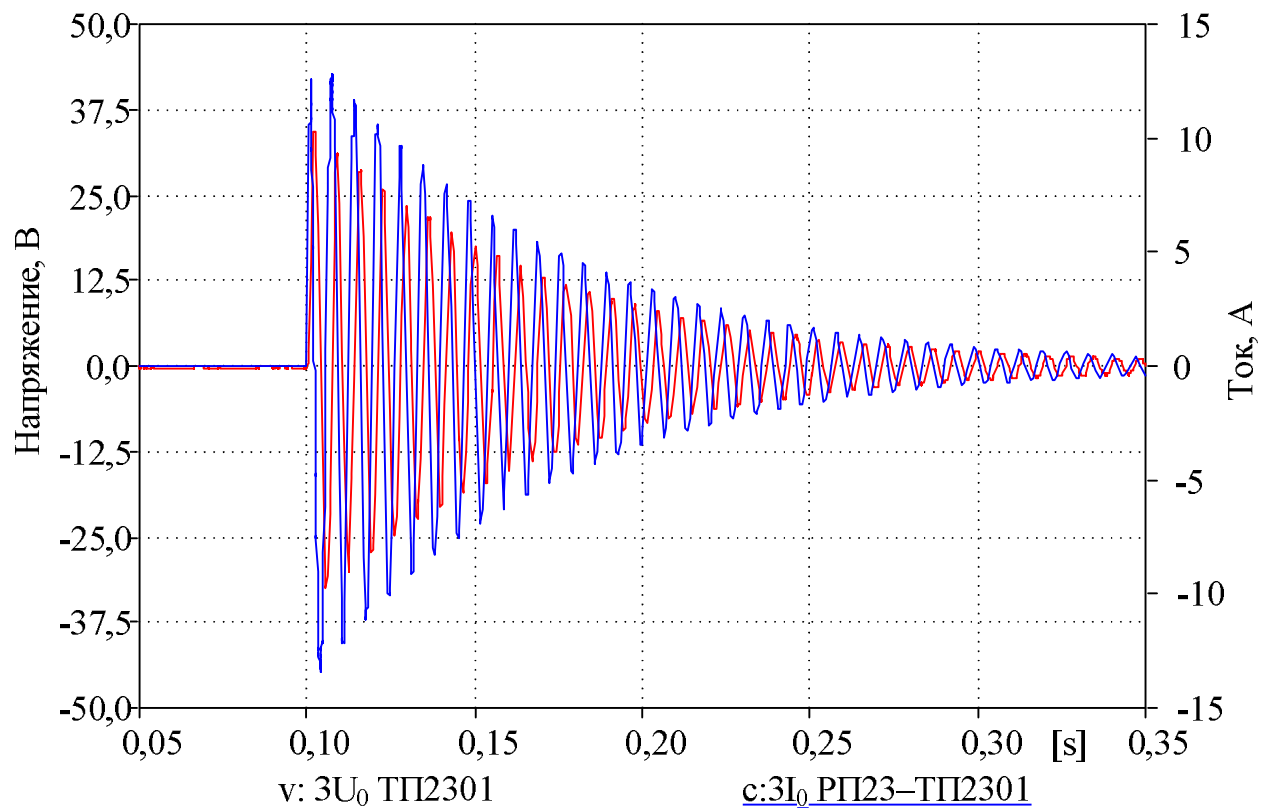


Рис. 3.3. Расчетные осциллограммы напряжения и тока НП при пуске двигателя подстанции на ТП23 с несинхронной работой фаз выключателя в 1 мс.

При необходимости мгновенного действия защиты, требуется отстройка от таких режимов, для этого с целью минимизации уставок по напряжению устройств защиты от замыканий на землю необходимо производить аналитические расчеты процессов происходящих в сети при параметрах модели сети соответствующих заданным условиям эксплуатации.

Один блок централизованной защиты обрабатывает сигналы от всех присоединений и выдает команду на отключение выключателя. Алгоритмы обработки сигналов и их сравнения при этом могут быть различными, базовым алгоритмом для таких защит является принцип относительного замера. На нем основано большинство централизованных защит от замыканий на землю.

Для запуска защиты используется пусковой орган по напряжению нулевой последовательности, в качестве которого может использоваться либо реле напряжения, включенное на  $3U_0$ , либо непосредственно  $3U_0$ , подаваемое на вход датчика напряжения. В первом случае запускающий сигнал подается на дискретный вход электронного блока. Второй способ пуска позволяет контролировать напряжение нулевой последовательности и является предпочтительным, но при этом необходимо использовать дополнительный аналоговый вход.

Напряжения нулевой последовательности во всей сети практически одинаковы [14], так как падения напряжения от токов  $I_0$  в сопротивлениях  $Z_0$  линий ничтожно малы по сравнению с падениями напряжений в ёмкостных сопротивлениях фаз сети на землю, и это позволяет использовать напряжение НП для согласованного пуска защит от замыканий на землю. Пуск каждого комплекта защиты будет происходить одновременно во всей электрически связанной сети. Основными условиями для создания такого универсального метода пуска являются задание единой уставки для защит и проведение предварительной калибровки каналов напряжения для всех комплектов защит. Как показала практика, оптимальная уставка для пуска защиты равна 30 В. В таком случае не возникает излишних пусков защиты при отключениях секции шин, при которых кратковременно появляется напряжение нулевой

последовательности. Напряжение появляется в связи с неодновременностью момента размыкания контактов высоковольтного выключателя (рис. 3.4-3.7, 3.2-3.3).

В момент отключения присоединения в течение разности моментов отключения фаз появляется напряжение и ток НП. Отстройка от этого режима возможна только по времени. Однако напряжение НП не спадает некоторое время и после полного размыкания фаз выключателя отключаемого присоединения, для отстройки от этого режима необходимо блокировать действие защиты на отключение при токе меньше определенного значения.

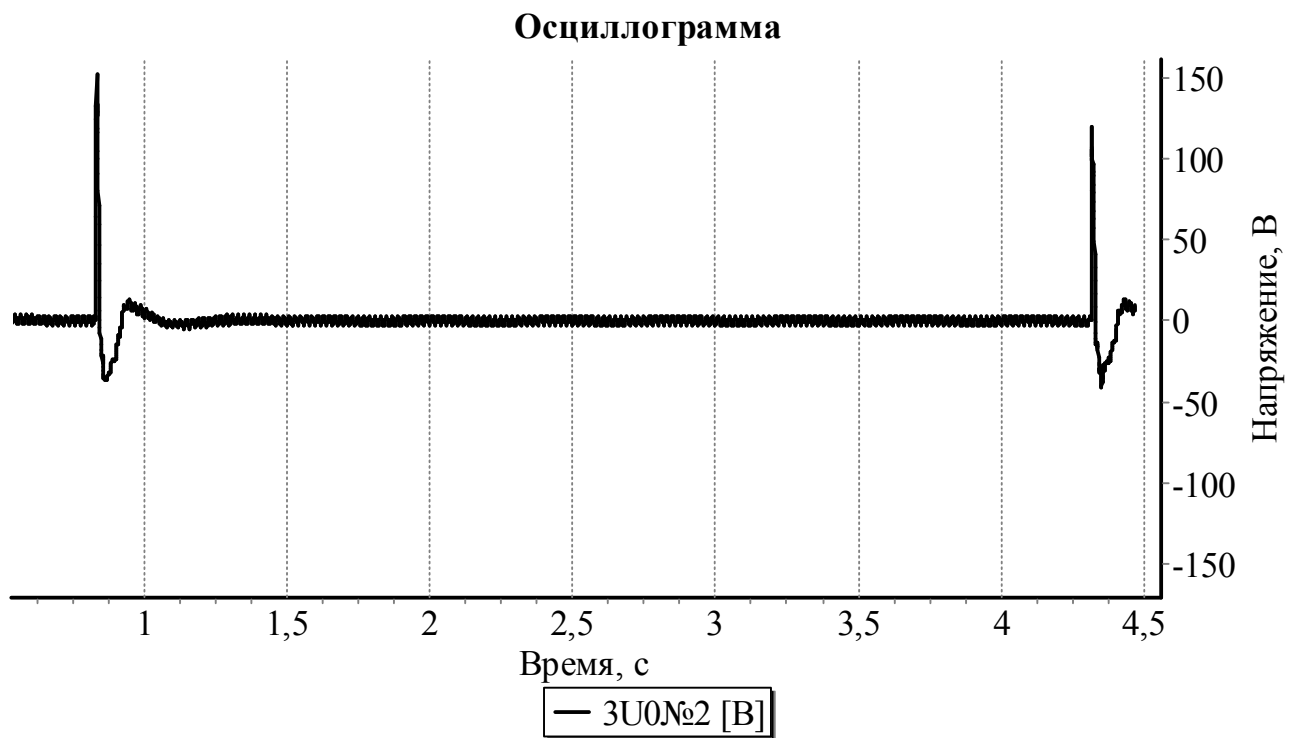


Рис. 3.4. Напряжение нулевой последовательности при отключении присоединения секции



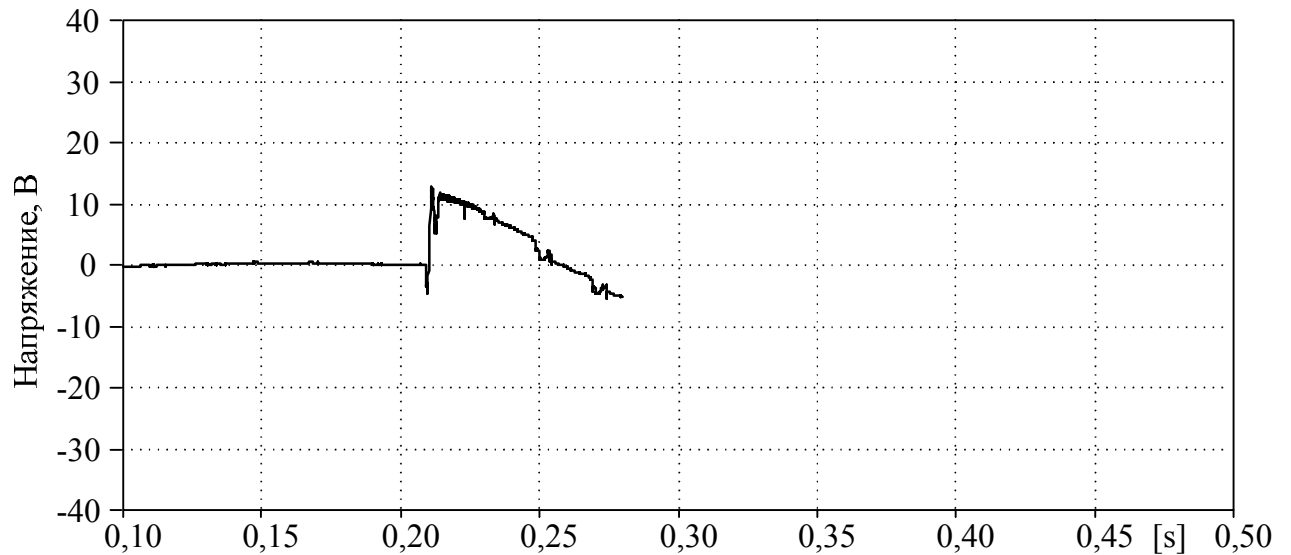


Рис. 3.5. Напряжение НП секции при отключении присоединения секции  
(моделирование)

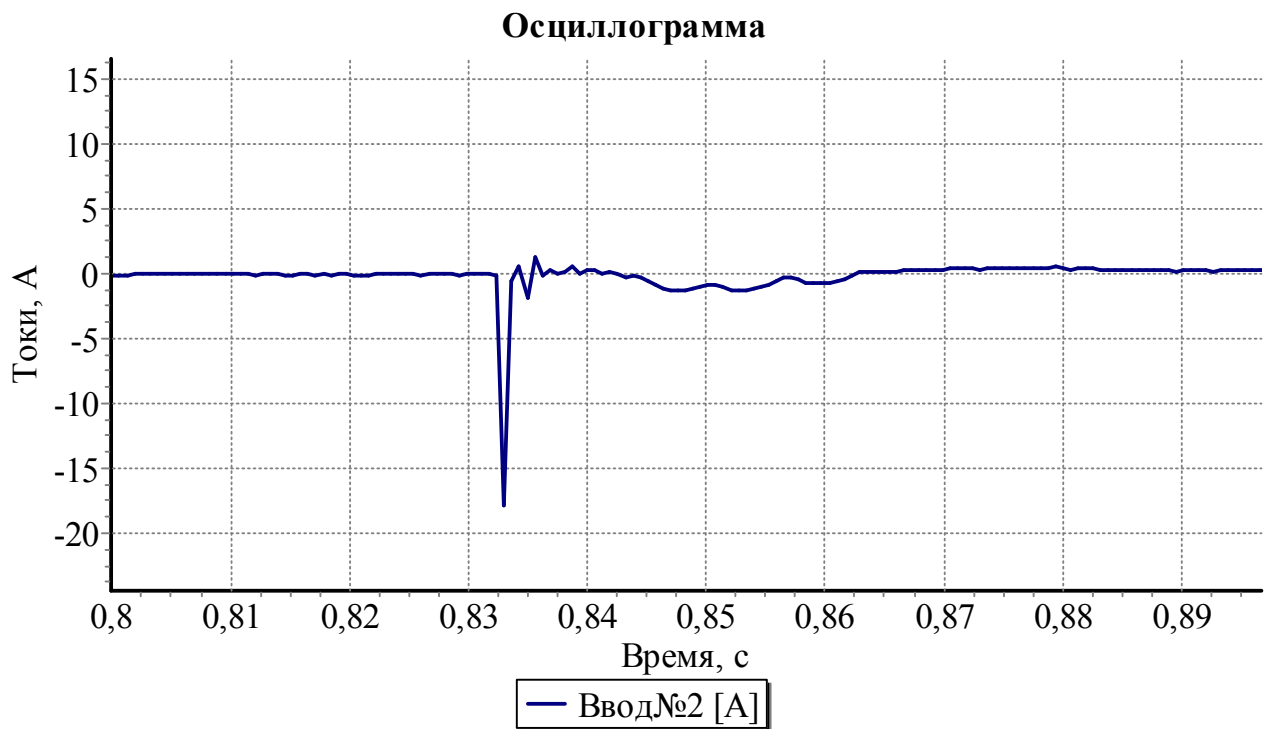


Рис. 3.6. Ток НП присоединения в момент отключения присоединения

Как видно из представленных осциллограмм, простое применение принципа относительного замера в ряде случаев может вызвать неселективные действия защиты. По этой причине требуется дополнять принцип относительного замера условиями, которые позволят обойти такие режимы. Но не все режимы возможно обойти простыми условиями, например, для

выявления замыкания на секции шин требуется сравнение иных величин, нежели значения токов, а при сравнении одинаковых по значению сигналов, требуется дополнять относительный принцип условиями настолько, что сам принцип уже оказывается совершенно иным.

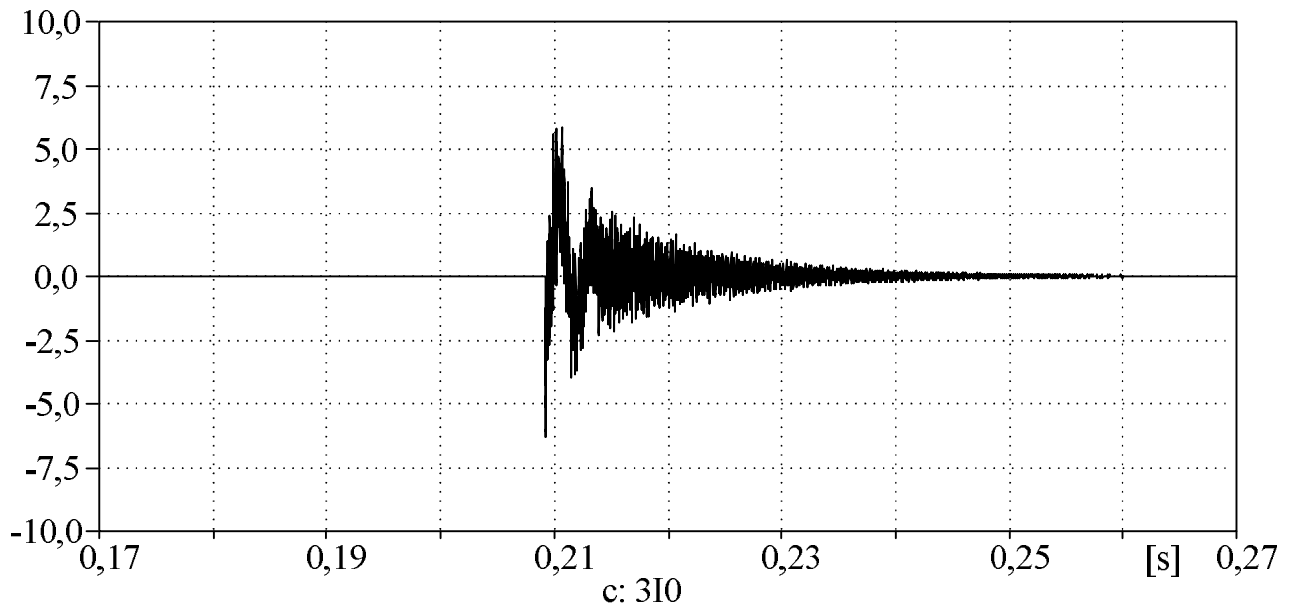


Рис. 3.7. Ток НП присоединения в момент отключения присоединения (моделирование)

### 3.2. Базовый алгоритм с суммированием

Принцип относительного замера имеет недостатки, описанные выше, поэтому в первую очередь необходимо их устранить. Для этого достаточно ввести дополнительный признак, основанный на определении при ОЗЗ действующего значения суммы мгновенных значений токов всех присоединений [75].

При использовании одного комплекта защиты на обе секции и замыкании на одной из них (К2 на рис. 3.8) вычисленное действующее значение суммы токов по всем  $n$ -присоединениям будет равно току в месте замыкания и будет больше максимального из токов присоединений  $I_{KMAX}$ :

$$\left( \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{j=1}^n i_j \right)^2 dt} = I_{3\Sigma} \right) > I_{KMAX}, \quad (3.1)$$

где  $T$  – период промышленной частоты,  $i_j$  – мгновенное значение тока НП

$j$ -присоединения,  $n$  – число присоединений.

Данное условие необходимо дополнять коэффициентами отстройки, ведь оно работает только в идеальном случае – отсутствия погрешности трансформаторов тока. Кроме погрешности ТТ к результату геометрического суммирования могут добавиться и другие токи. Все присоединения шин, необработанные ТТНП, вносят свои ёмкостные и активные токи в результат суммирования. Для определения коэффициентов отстройки необходимо проанализировать данные по замыканиям на землю и на основании рассчитанных величин принимать значения коэффициентов.

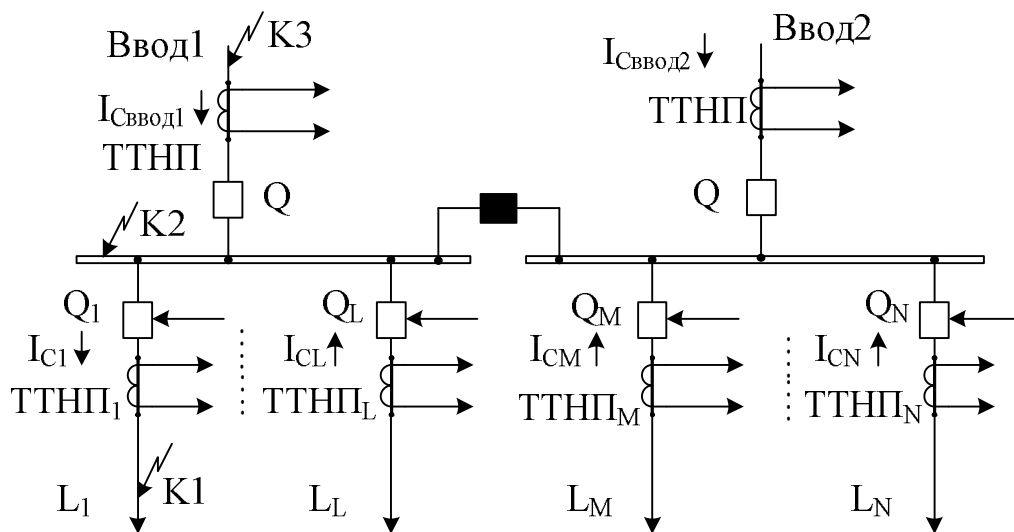


Рис. 3.8. Схема распределительной подстанции 10 кВ

Как видно из таблицы 3.1 геометрическая сумма токов всегда превышает арифметическую, следовательно, необходимо закладывать большие коэффициенты отстройки<sup>3</sup>. Если нанести эти данные на график (рис. 3.9), то явно видно, что отношения геометрической и арифметической сумм описывают кривую погрешности трансформаторов тока. При малых значениях тока погрешности очень велики, при больших же значениях – заметно снижаются и держатся в пределах 10%.

<sup>3</sup> Суммирование производилось путем анализа осциллограмм замыканий в программе описанной в приложении 2.

Таблица 3.1

Процентное отношение арифметической и геометрической сумм токов

Дата	Токи, А				Отношение суммы к максимальному току, %	
	Ввод	Присое- динение	Остальные присоединения	Геом. сумма	арифм.	геом.
19.03.08 10:31	85,44	84,19	0,39	3,90	1,01	4,56
16.04.08 16:21	4,66	3,81	1,01	0,28	3,40	6,00
05.05.08 5:58	1,98	1,88	0,23	0,21	6,60	10,80
05.06.08 9:20	3,15	2,34	0,93	0,13	3,80	4,00
05.06.08 9:52	87,45	88,25	0,37	4,10	1,34	4,69
15.09.08 3:41	0,98	0,30	0,73	0,08	5,10	8,20
08.10.08 9:51	72,02	71,33	1,49	1,90	1,11	2,64
29.11.08 23:35	5,88	6,04	0,18	0,43	5,78	7,31
23.01.09 21:33	9,22	9,30	0,00	0,99	0,87	10,76
10.03.09 14:56	61,87	63,03	1,16	3,50	3,75	5,66
11.03.09 14:52	68,98	73,06	0,07	4,67	6,01	6,77
22.03.09 18:44	13,58	6,15	7,09	1,60	2,50	11,80
19.06.09 5:55	6,01	6,34	0,25	0,58	9,65	9,65

Существует также и угловая погрешность ТТ, что может также увеличивать результат суммирования. Однако рис. 3.10. показывает, что кривые не сдвинуты на определенный угол, а имеют различные составляющие, что в сумме дает сигнал, по форме значительно отличающийся от исходных кривых тока.

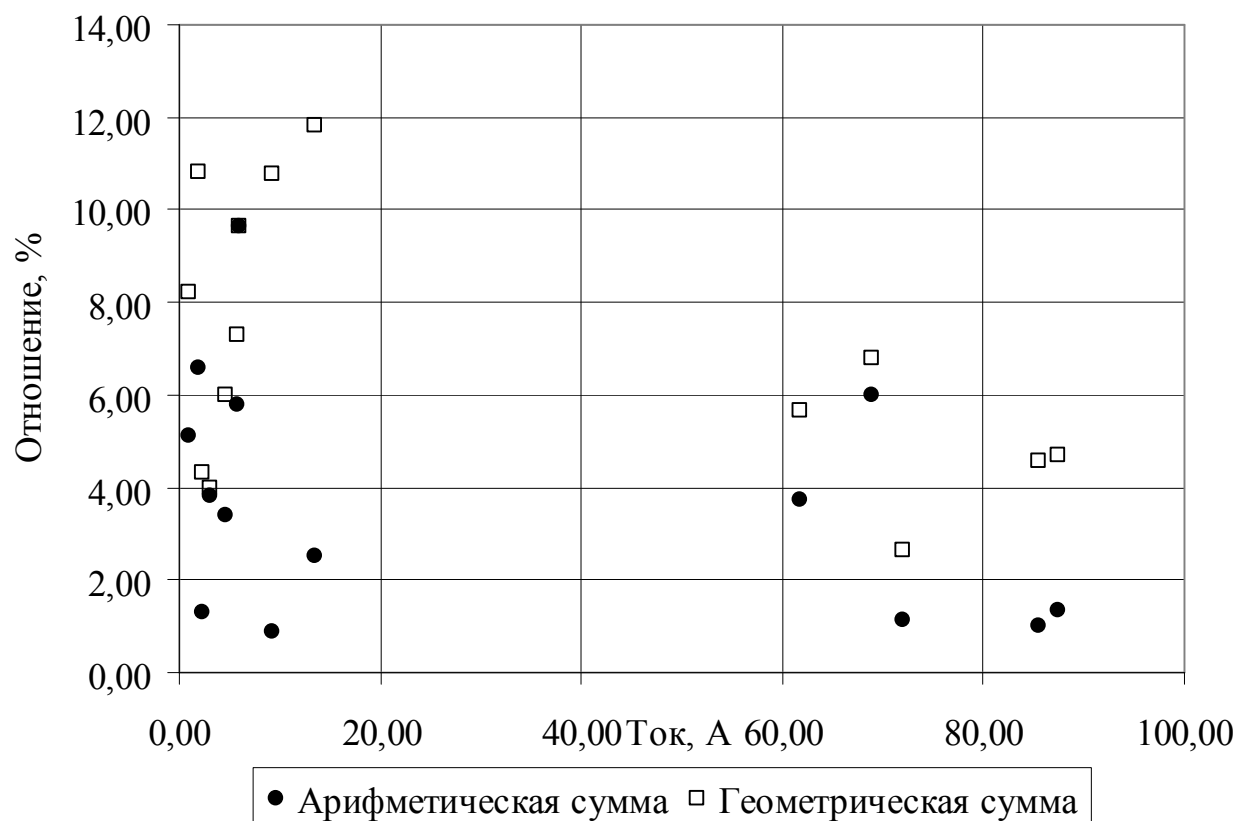


Рис. 3.9. Отношения арифметических и геометрических сумм токов НП к максимальному току НП

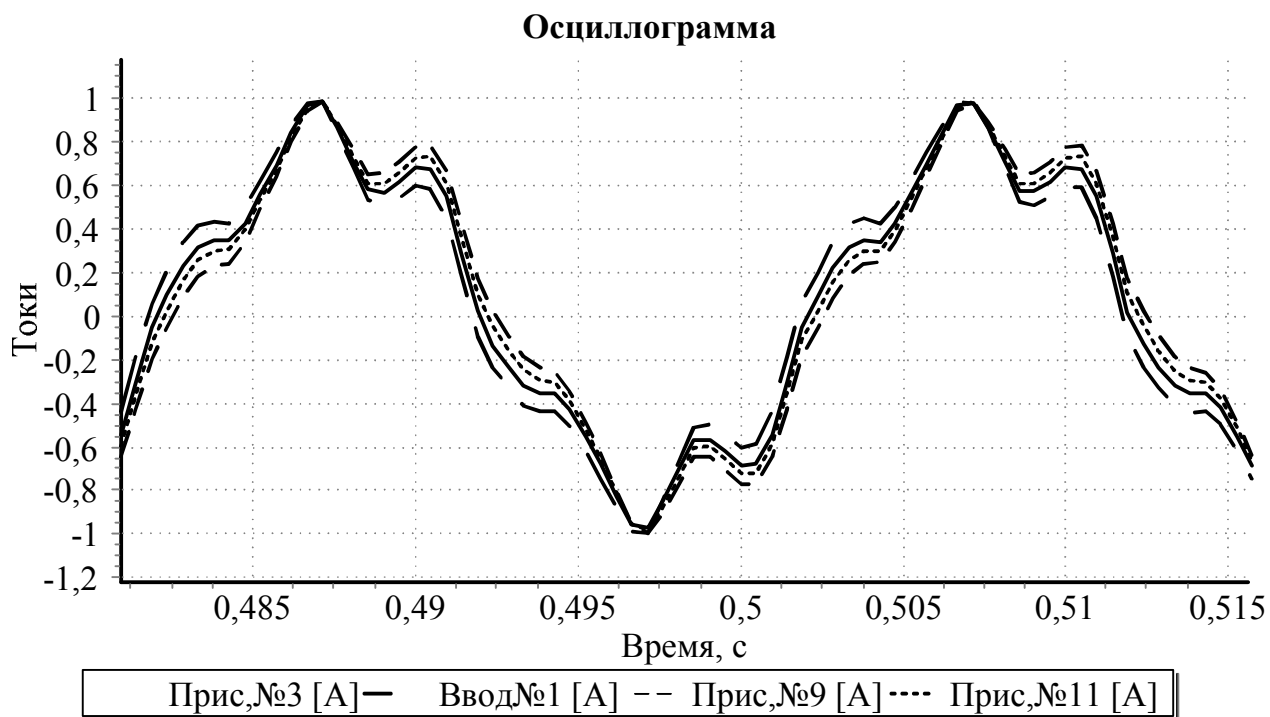


Рис. 3.10. Осциллограмма выравненных по значению ёмкостных токов ТП3020  
(21.07.2008 г 16:22:13)

Максимальное значение отношения геометрической суммы токов к максимальному току равно 12%, необходимо принять с запасом коэффициент отстройки по геометрическому суммированию в 20%. Таким образом, условие при замыкании на секции будет выглядеть следующим образом:

$$\left( K_{OTC1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_1^n i_j \right)^2 dt} = K_{OTC1} \cdot I_{3\Sigma} \right) > K_{OTC2} \cdot I_{KMAX} \quad (3.2)$$

где  $I_{KMAX}$  – максимальный из токов присоединений,  $K_{OTC1}=0.8$ , коэффициент отстройки,  $K_{OTC2} = 1.15$ , коэффициент отстройки.

При замыкании на отходящем присоединении (K1) векторная сумма токов неповрежденных присоединений равна в идеальном случае току, выделяемому ТТНП поврежденного присоединения. Разность этой векторной суммы и тока поврежденного присоединения равна нулю. Или, если не задаваться фиксированной уставкой по току, в этом случае будет выполняться неравенство:

$$\left( \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \left( \sum_2^n i_j \right) - i_1 \right)^2 dt} \approx 0 \right) < \left( I_{KMAX} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_2^n i_j \right)^2 dt} \right), \quad (3.3)$$

где  $i_1$  – ток, выделяемый ТТНП поврежденного присоединения.

Если использовать коэффициенты отстройки, то геометрическую сумму необходимо заменить  $(1-K_{OTC1}) \cdot I_{KMAX}$ , а в правую часть неравенства добавится коэффициент, учитывающий погрешность ТТ:

$$(1 - K_{OTC1}) \cdot I_{KMAX} < K_{OTC2} \cdot I_{KMAX}$$

где  $I_{KMAX}$  – максимальный из токов присоединений,  $K_{OTC1} = 0.8$ , коэффициент отстройки по ошибке геометрического суммирования,  $K_{OTC2} = 0.85$ , коэффициент отстройки по погрешности ТТ и устройства сопряжения (УСО).

Как показывают данные таблицы 3.2, данное условие выполняется всегда. Предельный случай, когда данное неравенство будет на границе выполнения, может возникнуть при наличии присоединения с большим ёмкостным током не имеющем ТТНП. Тогда левая часть неравенства (3.3) возрастет, и если

ёмкостной ток такого присоединения не превысит 65% от максимального тока всех присоединений, то алгоритм будет работать без ошибок.

Таким образом, при выполнении условия (3.2), защита сигнализирует о наличии ОЗЗ на секции. Если выполняется условие (3.3), защита действует на отключение присоединения с максимальным током. Эти условия иллюстрируются рис. 3.11.

Действующее значение суммы токов по всем присоединениям равно 1.63 А, действующее значение тока в присоединении №1 – 9.69А. Условие (3.3) выполняется с шестикратным запасом. Геометрическая сумма токов представляет собой практически идеальную синусоиду, и имеет преимущественно активный характер. При этом практически отсутствует корреляция значения этого активного тока со значениями остальных токов.

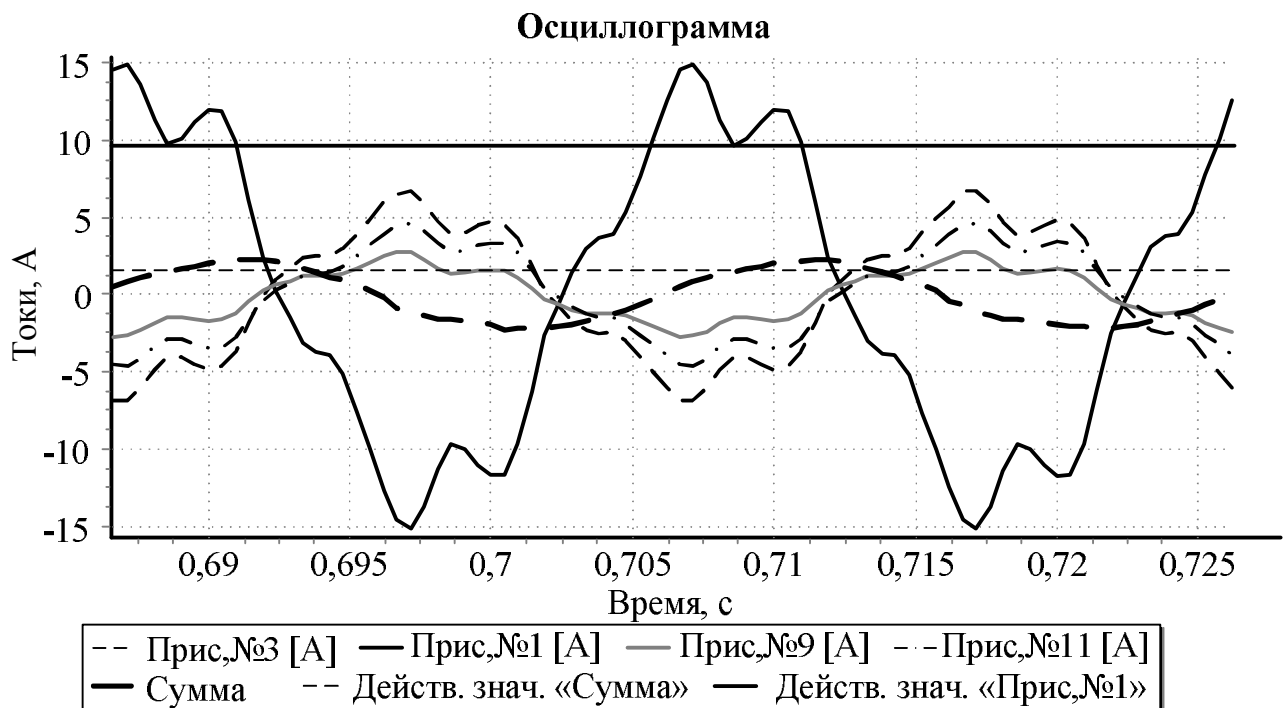


Рис. 3.11. Осциллограмма ёмкостных токов ТП3020 (21.07.2008 г 16:22:13)

При большом числе присоединений подстанции возникает необходимость установки двух комплектов защиты – по одному на секцию шин, каждый из которых запускается по напряжению НП своей секции. При раздельной работе секций алгоритм действия защит будет аналогичным

изложенному выше.

При включенном секционном выключателе и ОЗЗ на секции шин для каждого из комплектов защит секции №1 и №2 будут выполняться условия (3.3):

$$\left( \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_1^m i_j \right)^2 dt} = I_{3\Sigma} \right) > I_{LMAX} \text{ и}$$

$$\left( \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_1^n i_j \right)^2 dt} = I_{3\Sigma} \right) > I_{KMAX}, \quad (3.4)$$

где  $I_{LMAX}$  – максимальное значение тока из всех присоединений секции №1;

$I_{KMAX}$  – максимальное значение тока из всех присоединений секции №2.

При замыкании на присоединении секции №1 для комплекта защиты секции №2 по-прежнему будет выполняться условие (3.4), то есть защита будет определять "ОЗЗ на секции". Это, однако, нельзя относить к неселективной сигнализации второго комплекта, так как в результате срабатывания комплекта защиты секции №1 селективно отключится поврежденное присоединение.

Для комплекта защиты секции №1 действующее значение суммы мгновенных значений токов в этом режиме будет равно суммарному току НП секции №2. Ток от ТТНП поврежденного присоединения будет равен сумме ёмкостных токов присоединений секции №2 и неповрежденных присоединений секции №1, и этот ток будет максимальным из всех токов присоединений первой секции. При этом условие (3.3) для комплекта защиты секции №1 приобретет вид:

$$\left( \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_1^g i_j \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_m^n i_j \right)^2 dt} \right) < \left( I_{KMAX} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_2^g i_j \right)^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_m^n i_j \right)^2 dt} \right),$$

т.е. условие остается таким же, как и для варианта с одним комплектом защиты на обе секции.



### 3.3. Логический алгоритм

При большом токе НП внешней сети и малых собственных ёмкостных токах присоединений, вследствие погрешности ТТНП возможна ситуация, когда вторичный ток ТТНП поврежденного присоединения окажется меньше, чем ток вводного присоединения, что приведет к неселективному действию алгоритма с относительным замером. Для защиты присоединений РП в разветвленных кабельных сетях промышленных предприятий и городов селективность действия защиты может быть обеспечена использованием логического алгоритма, предполагающего применение пускового органа по действующему значению тока.

Логический алгоритм может быть реализован путем введения пускового органа (ПО) для всех присоединений сборных шин с уставкой  $I_{ПО}$ , которая с запасом должна быть меньше минимально возможного тока НП внешней сети (вводного присоединения). При этом для правильной работы логического алгоритма ток срабатывания ПО должен быть больше ёмкостного тока любого отходящего присоединения:

$$I_{С.ПРИСОЕД.МАХ} K_H \leq I_{ПО} = \frac{I_{С.ВНЕШН.МІN}}{K_Ч}, \quad (3.5)$$

где  $I_{С.ПРИСОЕД.МАХ}$  – максимальный ёмкостной ток присоединения,  $K_H$  – коэффициент надёжности,  $I_{С.ВНЕШН.МІN}$  – минимальный ток внешнего замыкания,  $K_Ч$  – коэффициент чувствительности.

По состоянию пускового органа можно реализовать следующий логический алгоритм действия защиты:

- если пусковой орган сработал и по вводу, и по отходящему присоединению (К1) (рис. 3.8), то это присоединение поврежденное, даже если ток в нем меньше, чем во вводном;

- если пусковой орган сработал только по вводу, а максимальный ток в отходящих присоединениях не превысил уставки ПО, то ОЗЗ произошло на шинах (К2). Кроме того, контролируя ток обоих вводов (на подстанции с двумя секциями), можно определить поврежденные шины;

– если ни один пусковой орган не сработал, то замыкание однозначно является внешним (КЗ), отключение вводного присоединения в таком случае не требуется (рис. 3.12).

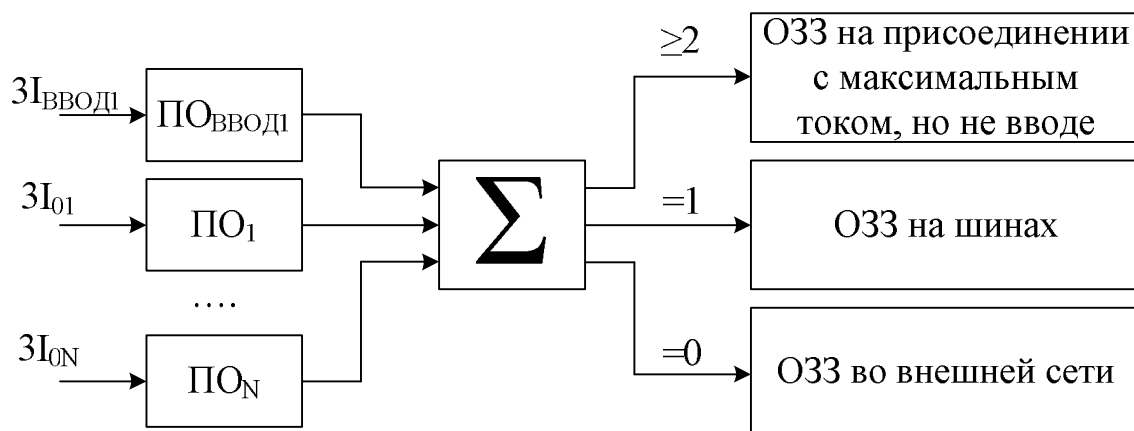


Рис. 3.12. Упрощенная схема логического алгоритма

Ток НП может существенно уменьшиться при замыкании через большое переходное сопротивление. Если он окажется меньше тока срабатывания ПО, то защита будет действовать неселективно при ОЗЗ на шинах и отходящих присоединениях. Для обеспечения селективного действия защиты при замыкании через переходное сопротивление необходимо ввести плавающий ток срабатывания пускового органа. Согласно методу симметричных составляющих, ток нулевой последовательности определяется (рис. 3.13):

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{A1} = \frac{\dot{E}_A}{3R_d + j(X_1 + X_2 + X_0)} = \frac{\dot{E}_A}{3R_d - jX_{C\Sigma}},$$

где  $X_1, X_2, X_0$  – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей,  $R_d$  – сопротивление дуги,  $X_{C\Sigma}$  – результирующее ёмкостное сопротивление нулевой последовательности всех элементов, электрически связанных с точкой замыкания.

Напряжение НП определится следующим образом:

$$U_0 = -jX_0 \cdot \dot{I}_{A1} = \frac{jX_{C\Sigma} \cdot \dot{E}_A}{3R_d - jX_{C\Sigma}}.$$

Как видно из этих выражений, ток зависит от напряжения НП через ёмкостное сопротивление сети.

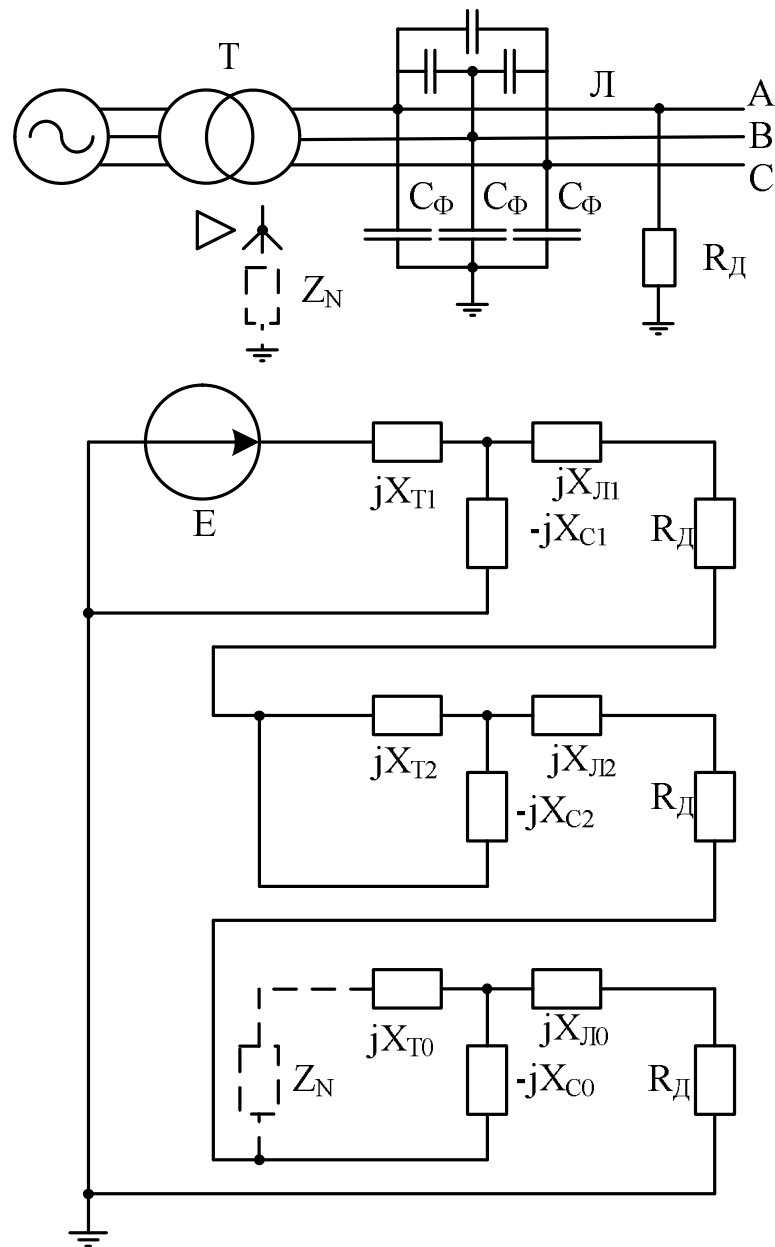


Рис. 3.13. Трехфазная и комплексная схемы замещения при замыкании на землю через дугу

Поскольку при ОЗЗ через переходное сопротивление ток уменьшается пропорционально напряжению  $3U_0$ , то рассчитывать ток срабатывания ПО необходимо в зависимости от напряжения НП:

$$I_{по.т} = I_{по} \cdot \frac{3U_0}{100},$$

где  $I_{по}$  – ток срабатывания защиты, определенный по (3.5) при металлическом ОЗЗ.

Таким образом, пусковой орган будет срабатывать не только при

металлическом замыкании, но и при замыкании через переходное сопротивление при повреждении на отходящих линиях и сборных шинах.

Для определения условий применимости данного алгоритма необходимо определить граничные погрешности совокупности ТТП и устройств сопряжения.

Чтобы проанализировать эти погрешности были проведены измерения характеристик устройств сопряжения с объектом. Так как характеристика достаточно линейная, то на рис. 3.14 представлены зависимости отклонений от идеальной линейной характеристики в процентах.

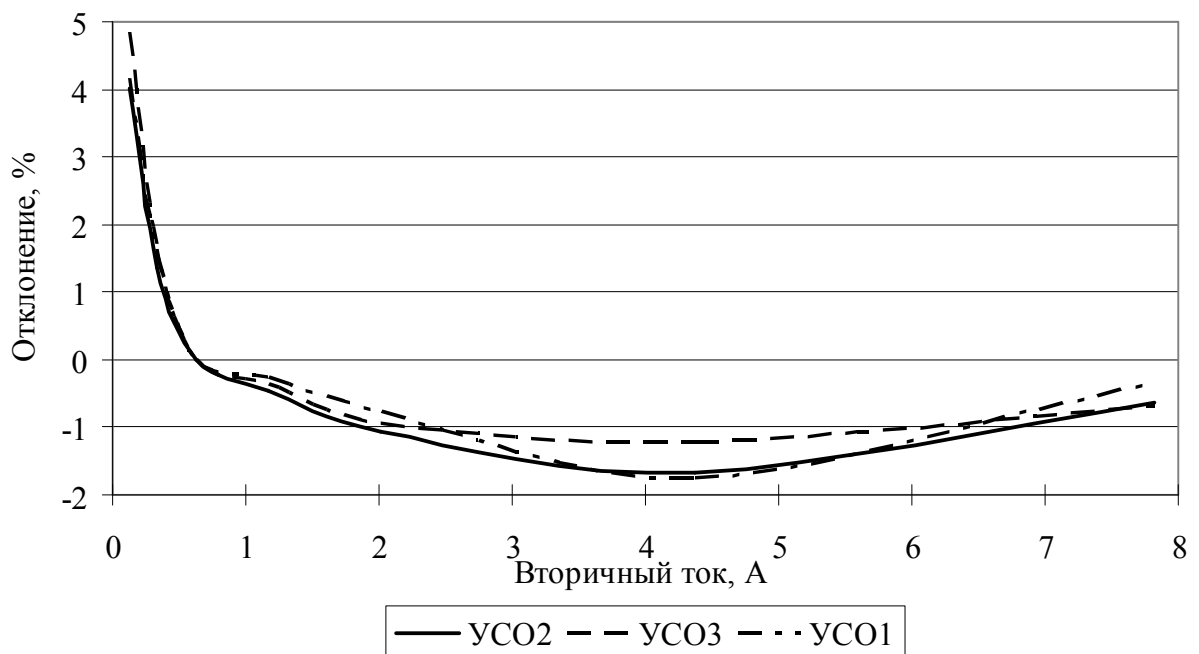


Рис. 3.14. Отклонения характеристик УСО

Как видно из рис. 3.14 характеристики имеют наибольшую нелинейность в области малых значений токов. Однако расхождение характеристик между собой в целом небольшое и не превышает 1% даже в области малых значений. Это обеспечивается как хорошим качеством изготовления датчиков для УСО, так и тем, что каждый канал защиты настраивается под конкретное УСО. Например, для УСО1 и УСО3 без учета тарирования разность показаний составила бы 1.7%.

Для определения нелинейности характеристик ТТП были исследованы 5 образцов: четыре ТТП типа ТЗЛМ-1 и один типа ТЗРЛ. Были сняты

зависимости вторичного тока от первичного и рассчитаны процентные отклонения этих зависимостей от линейных. Они представлены на рис. 3.15. Выравнивание показаний всех трансформаторов тока произведено при значении тока 20 А. При этом отклонения измеряемых значений составили до 4.5% в области малых токов, и до 2% в области больших токов.

Таким образом, характеристика как УСО, так и ТТНП имеет небольшую нелинейность, и в итоге это может сказаться на измеряемом сигнале. При двойном преобразовании сигнала произойдет сложение нелинейных характеристик, и суммарное отклонение в области больших токов можно ожидать равным произведению обратных отклонению величин. Например для первичного тока 80 А, отклонение характеристик УСО от линейной составляет около 1.5%, отклонение характеристик ТТНП – около 2%, значит суммарное отклонение составит:

$$\frac{(100\%-1,5\%)\cdot(100\%-2\%)}{100\%} = 96,5\%, \text{ т.е. } 3.5\%.$$

Аналогично можно определить ожидаемую погрешность. Как указано выше, для УСО погрешность составила 1%, а для ТТНП – 2%, то суммарную максимальную погрешность преобразования можно принять равной около 3%. Для подтверждения данных рассуждений обратимся к рис. 3.16, который отображает характеристику совокупного преобразования сигнала на ТТНП и УСО. Отклонение совокупной характеристики от линейной составило 3.3%, а погрешность между измерениями с помощью разных УСО – 1%, что, впрочем, подтверждает приведённые выше данные. Дополнительно проведённые исследования показали, что разность показаний между различными сочетаниями УСО и ТТНП достигают 2.5%.

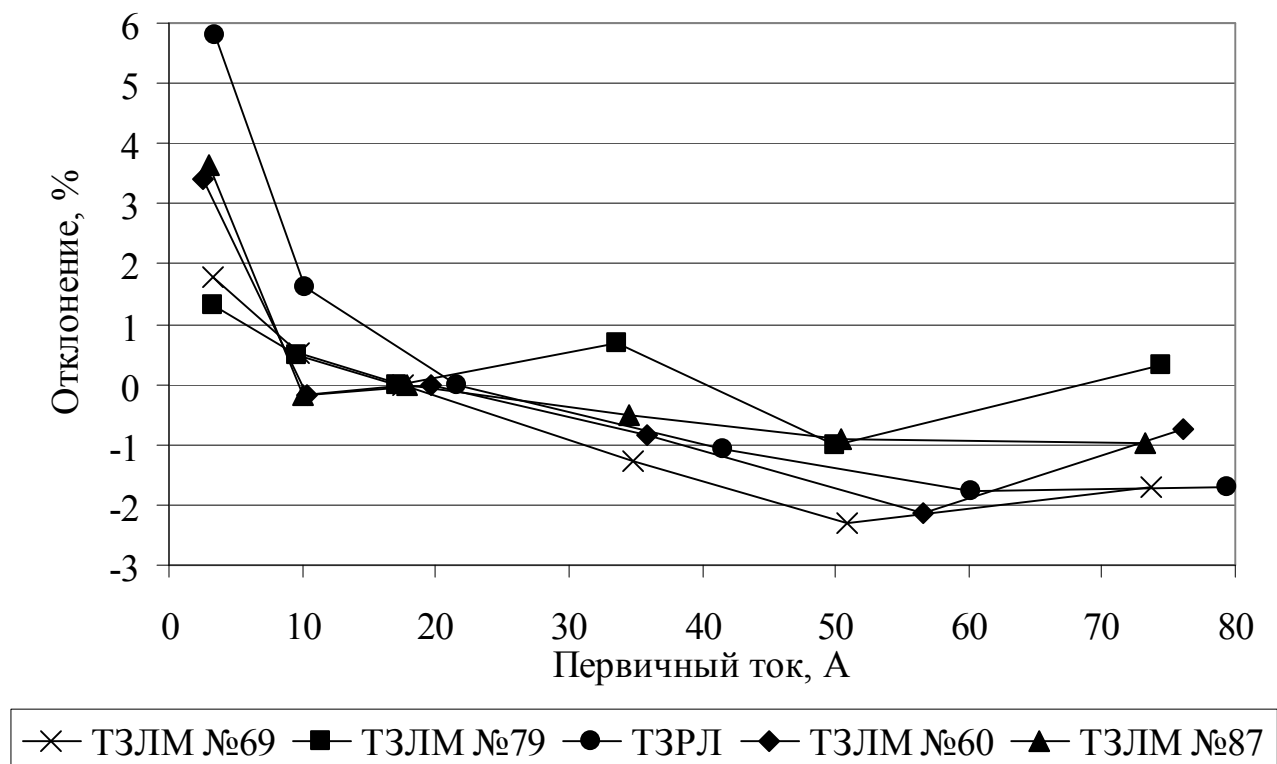


Рис. 3.15. Отклонения зависимостей вторичного тока от первичного от линейных для ТТП

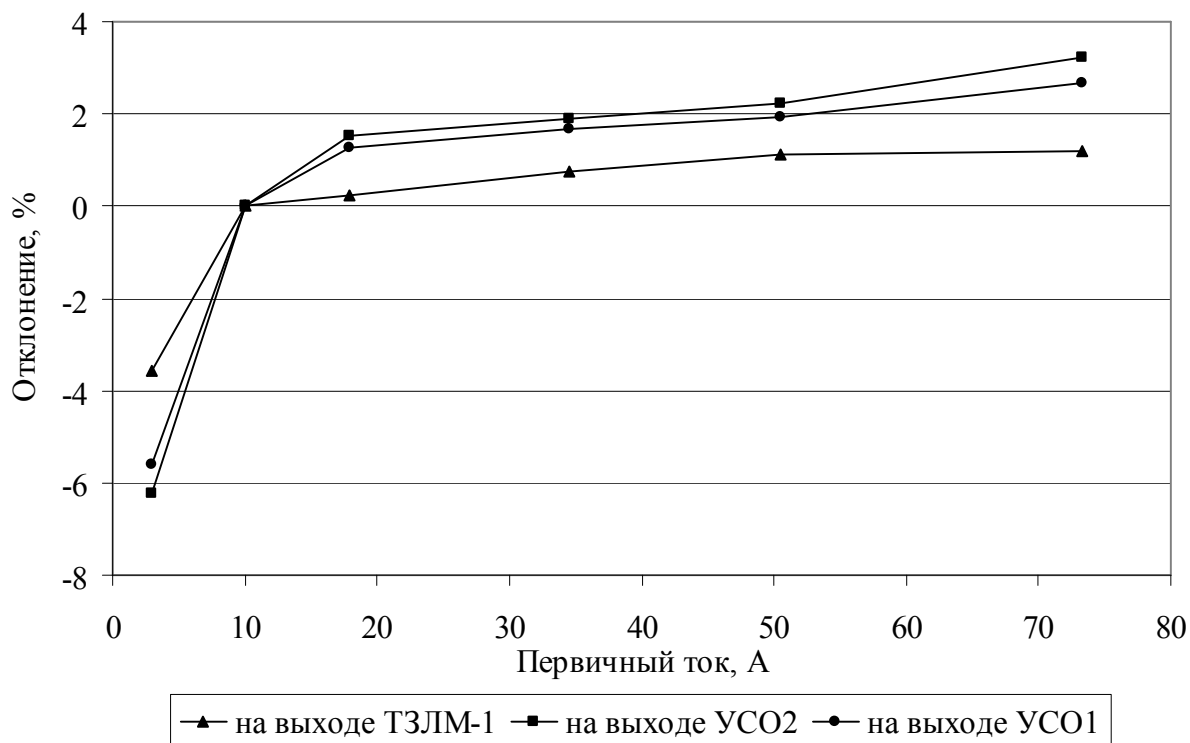


Рис. 3.16. Отклонения зависимостей вторичного тока УСО от первичного тока ТТП от линейных зависимостей

Теоретически полученное значение погрешности практически подтверждается измерением значения погрешности по осциллограммам снятым в 2008-2009 годах в городских сетях г. Ханты-Мансийска. Каналы всех защит были выравнены по значению тока 10 А, это значит что, при значении первичного тока 10 А, расчетное значение сигнала по каждому каналу всех комплектов защит является одинаковым. В ходе наблюдений было зарегистрировано 11 замыканий со значениями токов составляющими около 70-80 А (таблица 3.2).

Таблица 3.2

## Измеренные токи замыкания на землю

Дата	Токи, А			Разность показаний, %
	Ввод	Присоединение	Остальные присоединения	
2008/03/20 14:39:16	88,97	85,01	0,4	5,1
2008/03/19 10:31:31	85,44	84,19	0,39	2
2008/03/19 10:51:31	87,21	87,05	0,12	0,3
2008/06/05 09:39:18	88,25	89,19	0,37	0,6
2008/06/05 09:52:35	87,45	88,25	0,37	0,9
2008/06/05 10:42:38	84,29	85,33	1,09	0,01
2008/10/08 09:41:58	72,94	74,54	1,05	1,35
2008/10/08 17:24:30	96,25	74,87	1,42	28
2009/03/10 14:56:35	61,7	63,35	0,82	1,3
2009/03/10 14:48:18	68,98	73,06	0,68	5
2009/02/03 10:34:25	96,97	93,59	0,5	4,1

В одном случае разность показаний составила 28%, что говорит о неисправности ТТНП и необходимости его замены. Средняя разность показаний замера тока во вводе и в поврежденном присоединении составила около 2%, что хорошо согласуется с расчетной разностью показаний по рис. 3.17 равной 3%. Максимальная разность токов в 5% является предельным значением, которое следует в 1.5-2 раза увеличить для создания надёжного условия применимости логического алгоритма. Таким образом, принцип относительного замера применим в случае, если:

$$I_{СЭПРИС.МІN} > K_{ОТС} \cdot 0,05 \cdot I_{СЭВН. СЕТИ.МАХ}$$

где  $I_{СЭПРИС.МІN}$  – минимальный суммарный ёмкостной ток всех присоединений секции,  $K_{ОТС}$  – коэффициент отстройки ( $K_{ОТС} = 1.5$  для однотипных ТТНП,  $K_{ОТС} = 2$  в остальных случаях),  $I_{СЭВН. СЕТИ.МАХ}$  – максимальный суммарный ёмкостной ток внешней сети.

Однако невыполнение выше описанного условия не означает автоматически возможность применения логического алгоритма. Поэтому требуется отдельно оценивать другое условие, описывающее применимость логического алгоритма:

$$I_{СЭПРИС.МАХ} \cdot K_{ОТС1} < I_{УСТ} < K_{ОТС2} \cdot I_{СЭВН. СЕТИ.МІN},$$

где  $I_{СЭПРИС.МАХ}$  – максимальный суммарный ёмкостной ток всех присоединений секции,  $K_{ОТС1} = 1,15$ , коэффициент отстройки,  $I_{УСТ}$  – ток уставки логического алгоритма,  $K_{ОТС2} = 0,85$ , коэффициент отстройки,  $I_{СЭВН. СЕТИ.МІN}$  – минимальный суммарный ёмкостной ток внешней сети.

Применение плавающего тока срабатывания не исключает отказов в срабатывании защиты при больших переходных сопротивлениях в месте замыкания. Защита может функционировать при минимальном токе НП присоединения равном 0.2 А и напряжении НП 10 В. Как видно из рисунка 3.17 при снижении ёмкостного тока допустимое переходное сопротивление тоже снижается. При ёмкостном токе равном 0.25 А переходное сопротивление равно 17 кОм, однако при этом возможен отказ срабатывания защиты по причине отсутствия запуска по напряжению НП. На рисунке 3.18 показаны зависимости напряжения НП от ёмкостного тока при разных сопротивлениях в месте замыкания. Чем меньше ёмкостные токи, тем больше допустимые переходные сопротивления в месте замыкания, при которых защита будет функционировать. Однако для каждого случая применения защиты в сетях с возможными замыканиями через большие переходные сопротивления необходимо дополнительно уточнять возможности применения как защиты в целом, так и данного алгоритма.



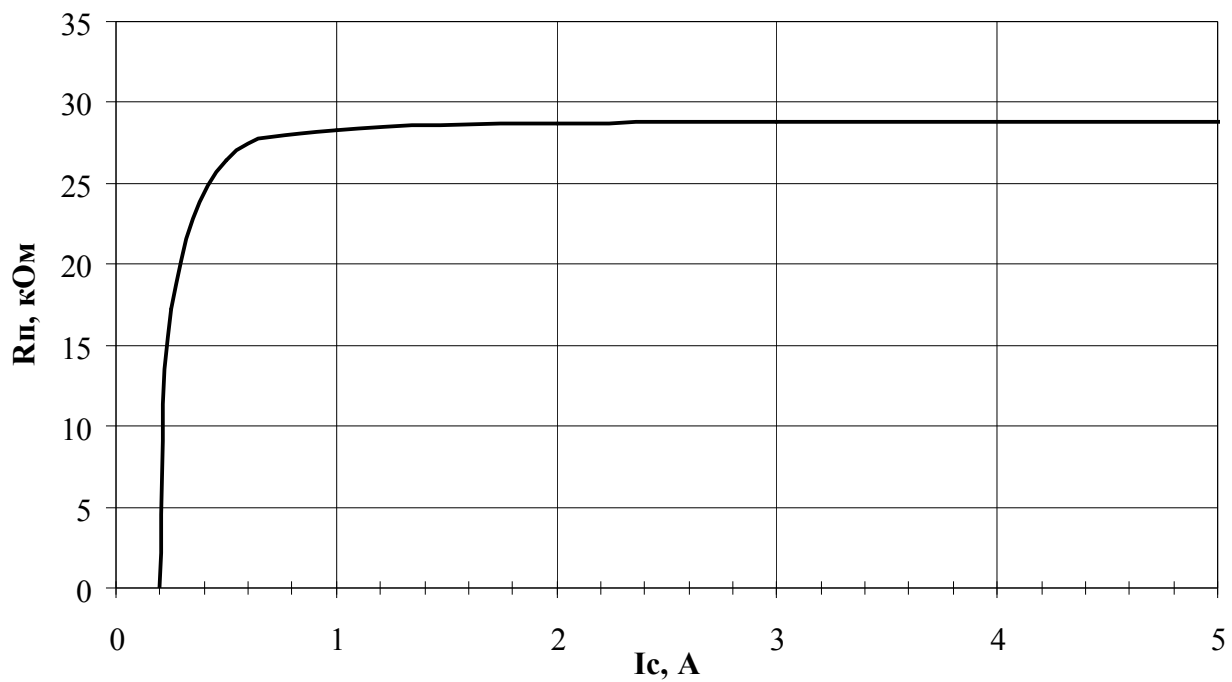


Рис. 3.17. Значение допустимого переходного сопротивления в месте замыкания

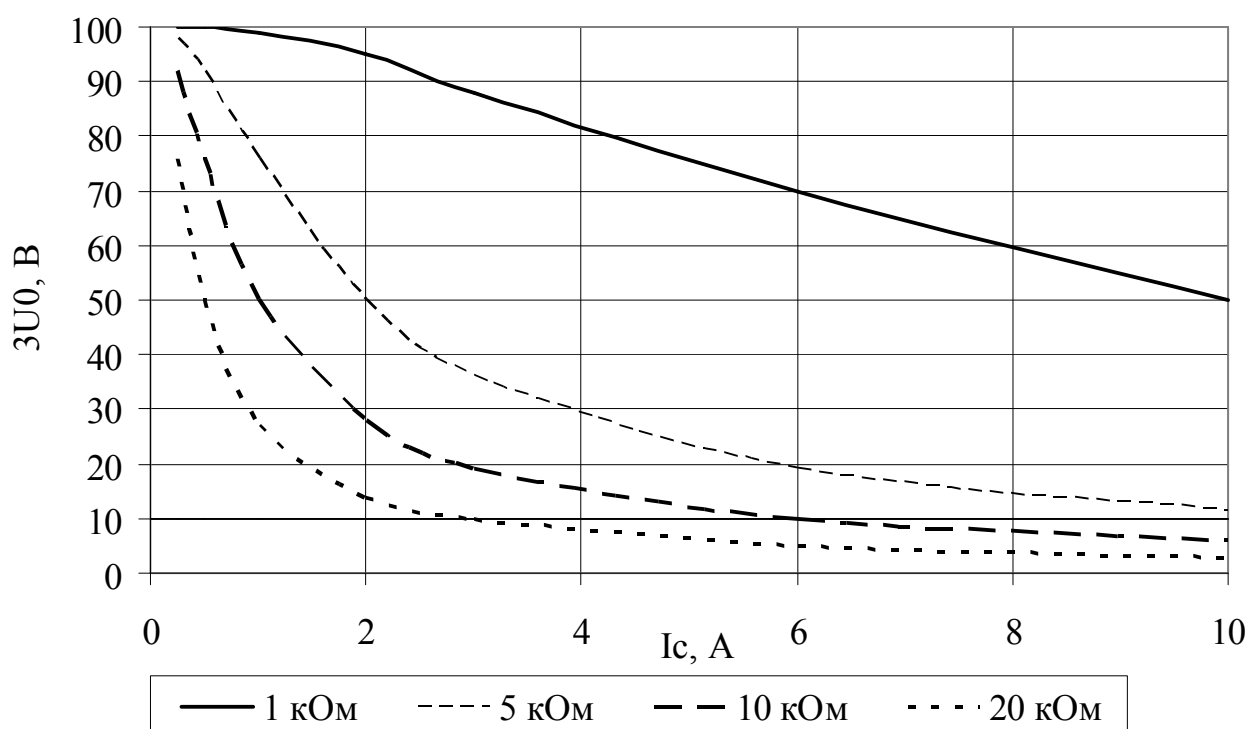


Рис. 3.18. Зависимости напряжения НП от ёмкостных токов сети для различных переходных сопротивлений в месте замыкания

При большом количестве присоединений или при числе секций больше двух, может потребоваться установка двух комплектов защиты (рис. 3.19).

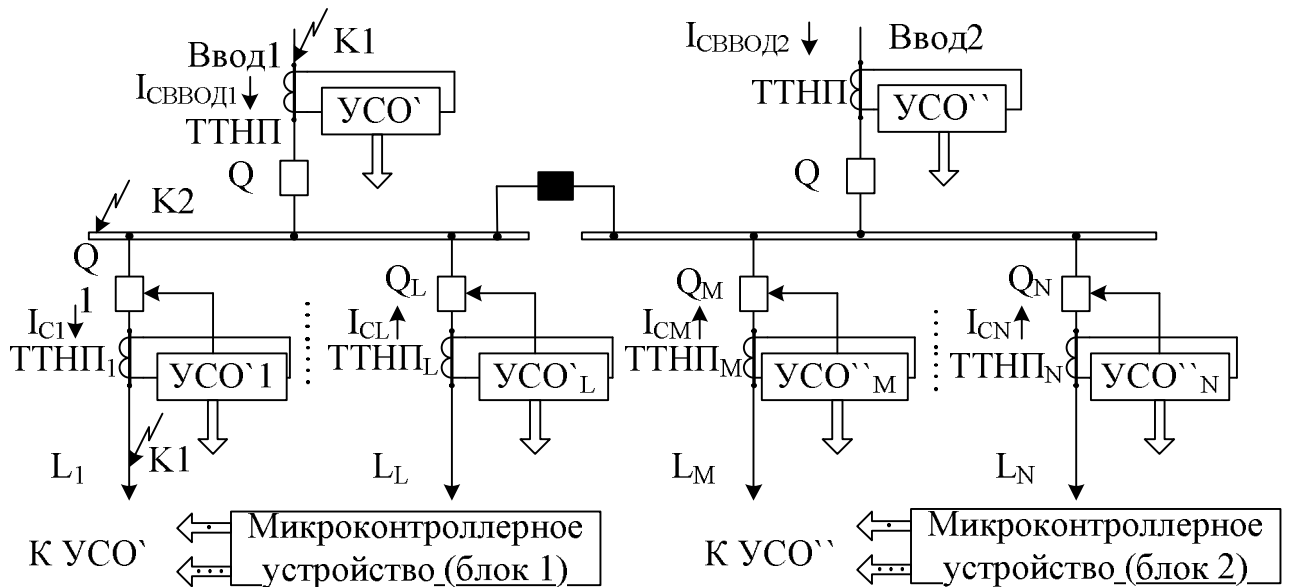


Рис. 3.19. Схема подстанции с двумя установленными блоками защиты

Каждый из комплектов подключается только к трансформаторам тока одной секции. Если секционный выключатель оборудован трансформаторами тока нулевой последовательности, то сигнал с этих трансформаторов тоже необходимо завести в устройство защиты, если имеется такая возможность – с перекрытием зон защиты каждого комплекта. При наличии сигнала от ТТНП секционного выключателя действие защиты не изменится, для устройства защиты сигналы останутся абсолютно такими же во всех рассмотренных выше режимах. Однако, не всегда есть возможность получить сигнал тока нулевой последовательности секционного выключателя. В ситуации, когда секционный выключатель включен, а ТТНП секционного выключателя отсутствует, оба комплекта будут работать селективно, с некоторой оговоркой в том, что определить поврежденную секцию защита не сможет. Тот комплект защиты, через ввод которого осуществляется питание двух секций, покажет замыкание на секции, а другой комплект защиты покажет внешнее замыкание. В случае необходимости можно организовать связь между блоками защиты для передачи

информации о наличии и месте замыкания, что поможет избежать противоречивых действий.

Разработанный алгоритм предназначен для организации защиты сетей с большими токами замыкания, превышающими собственные ёмкостные токи присоединений, согласно вышеописанному условию.

### 3.4. Фазный алгоритм

Большинство разработчиков защит от замыканий на землю предлагают направленные защиты, измеряющие разность фаз между токами и напряжением нулевой последовательности. Как показывает практика и ранее проведённый обзор, подобные алгоритмы функционирования могут отказывать в действии при неметаллических замыканиях. Это связано, в том числе, и со способом определения разности фаз. Современные микропроцессорные терминалы защиты позволяют обрабатывать сигналы в реальном времени, по этой причине стало возможно определять угол непосредственно, проводя математические операции с токами в реальном времени. Такой угол можно назвать условным.

Измерение условного угла удобнее осуществлять через сумму произведения мгновенных значений токов и через их действующие значения [76]. Действующие значения токов определяются для дискретных выборок тока следующим образом:

$$I_k = \sqrt{\sum_1^n \frac{i_k^2}{N}},$$

где  $N$  – число точек на период.

Сумма произведений мгновенных значений токов определяется по формуле:

$$\Pi_{fk} = \sum_1^n \frac{i_f \cdot i_k}{N}.$$

При этом косинус условного угла между токами определяется как

$$\cos \alpha_{fk} = \frac{\Pi_{fk}}{I_f \cdot I_k}.$$

Для доказательства этого утверждения проведем расчет угла между токами для непрерывных сигналов. Такие сигналы в общем случае можно представить в виде:

$$i_f = A_f \cdot \sin(\omega t)$$

$$i_k = A_k \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $A_f$  и  $A_k$  – амплитудные значения токов,  $\omega$  – циклическая частота.

Тогда действующее значение можно определить по следующим формулам:

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_k^2 dt}$$

$$I_f = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_f^2 dt}$$

Сумма произведений мгновенных значений будет представлена в виде:

$$\Pi_{kf} = \frac{1}{T} \int_0^T i_k \cdot i_f dt$$

Данные выражения необходимо преобразовать, проинтегрировав подынтегральные выражения:

$$I_k = A_k \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{\omega t - \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t)}{2\omega} \right) \Big|_0^T} = A_k \sqrt{\frac{1}{T} \left( \frac{2\pi - 1}{2\omega} - \frac{0 - 1}{2\omega} \right)} = \frac{A_k}{\sqrt{2}}$$

$$\begin{aligned} I_f &= A_f \sqrt{\frac{1}{2T} \left( t - \frac{\sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos(\omega t - \varphi)}{\omega} - \frac{\varphi}{\omega} \right) \Big|_0^T} = \\ &= A_f \sqrt{\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{2\pi} - \frac{\varphi}{2\pi} - 0 + \frac{\sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi)}{2\pi} + \frac{\varphi}{2\pi} \right)} = \frac{A_f}{\sqrt{2}} \end{aligned}$$

$$\Pi_{kf} = A_k A_f \frac{1}{T} \left( \frac{1}{2} \left( \cos \varphi \cdot t - \frac{\sin(2\omega t - \varphi)}{2\omega} \right) \right) \Big|_0^T =$$

$$= A_k A_f \frac{1}{2} \left( \cos \varphi - \frac{-\sin \varphi}{4\pi} - 0 + \frac{-\sin \varphi}{4\pi} \right) = A_k A_f \frac{1}{2} (\cos \varphi)$$

После проведённых преобразований подставляем полученные выражения в предлагаемую формулу расчета условного угла между токами:

$$\frac{P_{kf}}{I_k \cdot I_f} = \frac{A_k A_f \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{2} \sqrt{2}}{2 A_k A_f} = \cos \varphi$$

При наличии высших гармоник сигнал не является такой простой функцией, и результат расчета условного угла по данному выражению может очень сильно отличаться от истины. Для оценки влияния высших гармоник и помех на расчет угла и определения области применимости данного алгоритма необходимо провести расчеты углов по данному принципу и рассчитать ошибку. Если дополнительный сигнал высшей частоты содержится только в одном из сравниваемых сигналов, то погрешность определения угла будет минимальной и достигает 27 градусов. Угол между сигналами промышленной частоты принимаем равным 0 градусов, так как при этом ошибка определения угла оказывается максимальной. В зависимости от отношения амплитуды помехи к амплитуде полезного сигнала график зависимости ошибки определения условного угла показан на рис. 3.20.

Если амплитуда сигнала высокой частоты по первому каналу составляет 50% от сигнала промышленной частоты, то в зависимости от амплитуды и фазы такого сигнала высокой частоты во втором канале будет изменяться ошибка расчета условного угла. Как видно из рис. 3.21 такая ошибка максимальна при противофазной помехе в полезных сигналах с амплитудой равной 50% и составляет 53 градуса. Минимальная ошибка будет при синфазной помехе равной амплитуды. Это обусловлено тем, что метод определения фазы работает также для суммы циклических функций.

Для случая, когда помехи имеют одну амплитуду, но имеют сдвиг по фазе, на рис. 3.22 приведены зависимости ошибок расчета угла.

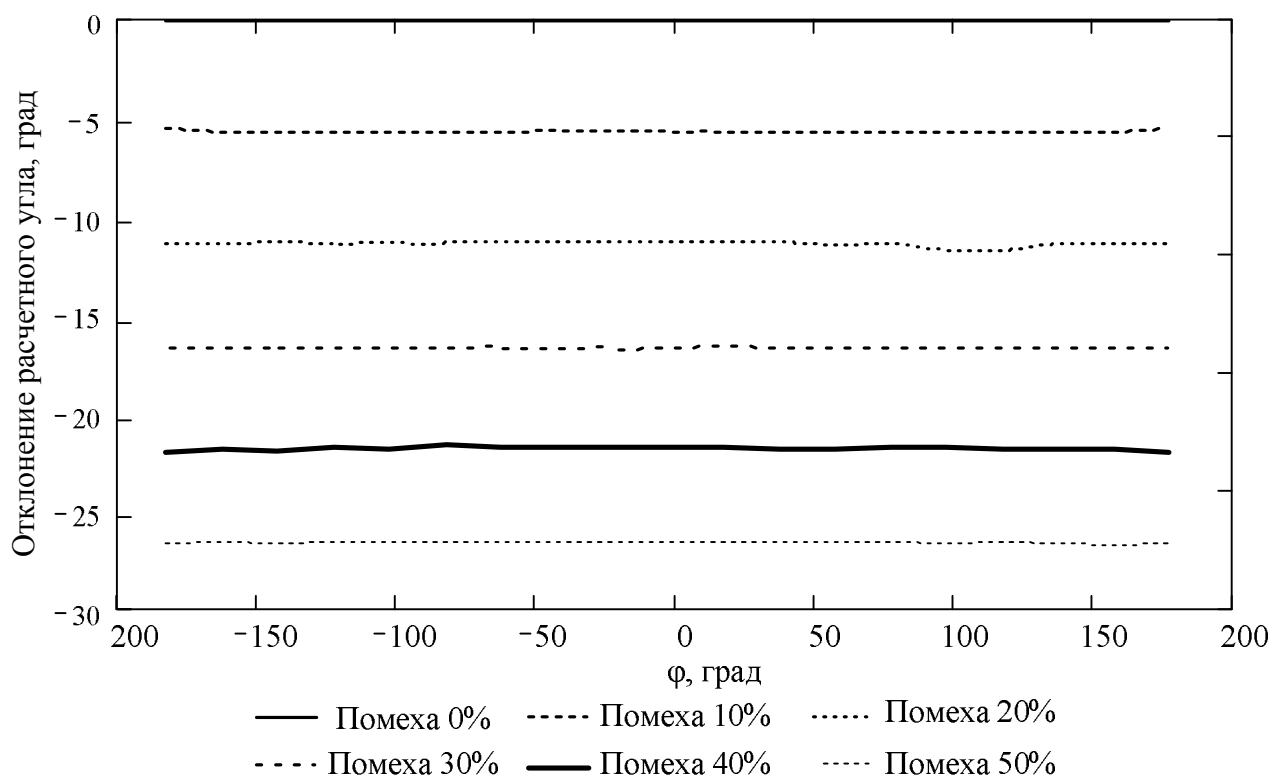


Рис. 3.20. Ошибка вычисления условного угла при наличии помехи только в одном сигнале

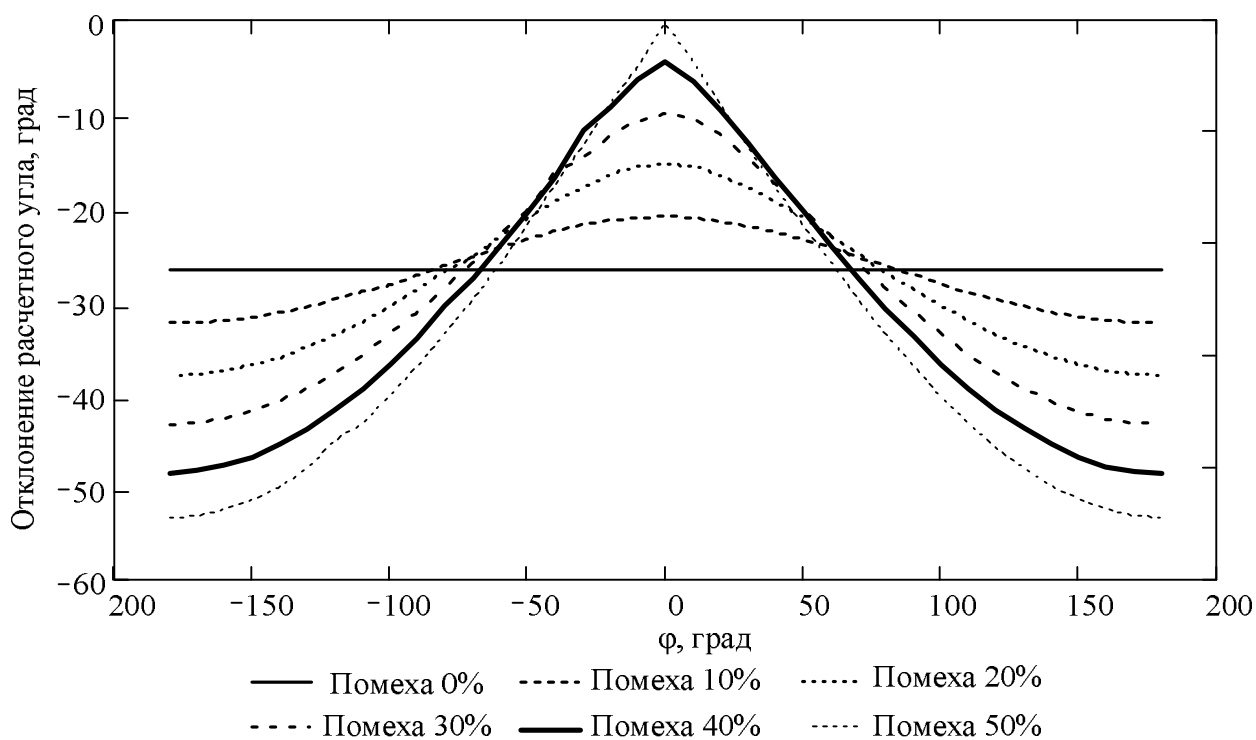


Рис. 3.21. Ошибка вычисления условного угла при помехе в первом сигнале амплитудой 50% от полезного сигнала

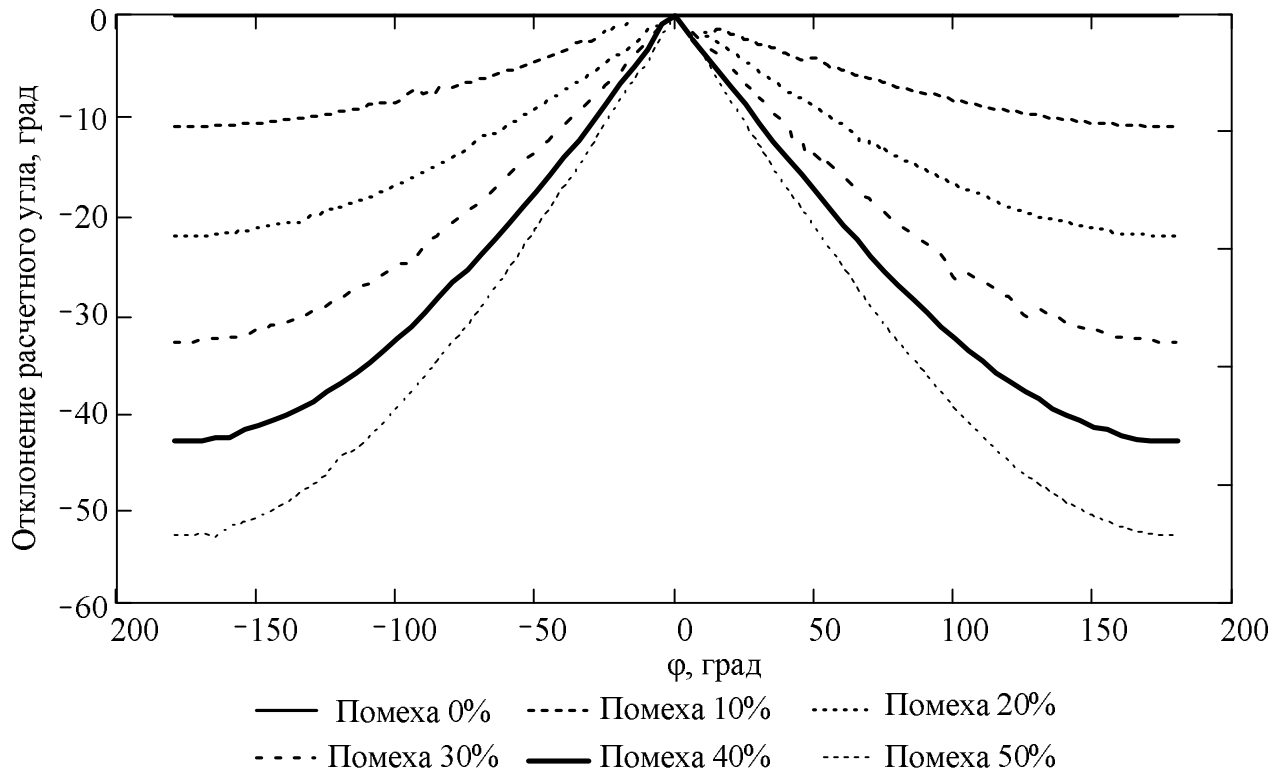


Рис. 3.22. Ошибка вычисления условного угла при помехах равной амплитуды и разной фазы

Как показывают рис. 3.20-3.22, наибольшая ошибка в определении угла получается при противофазных помехах. Чем больше амплитуда таких помех, тем больше и ошибка в определении угла между полезными сигналами.

Для правильного функционирования защиты необходимо чтобы расчетный условный угол попадал в диапазон углов срабатывания. Т.е. при получении угла между кривыми в диапазоне от  $-90$  до  $+90$  они определяются защитой как сонаправленные, а если угол попадает в диапазон от  $90$  до  $270$  градусов, то эти сигналы разнонаправлены. Даже помеха в 50% от амплитуды полезного сигнала не приводит к сбою функционирования. Ошибка при этом может составить до 53 градусов при противофазных помехах в сравниваемых сигналах, но и этот угол попадет в диапазон  $-90$  до  $90$  градусов, что является достаточным для определения сонаправленных сигналов.

Для уменьшения влияния помех необходимо правильно проводить монтаж защит, если помеха будет синфазной, то влияния на расчет угла между токами она окажет намного меньше. Для этого фазировку токовых цепей

защиты необходимо проводить на физическом уровне, а не путем изменения знака в ходе обработки данных. Однако это не поможет снижению влияния токов высших гармоник, протекающих в первичной сети, на расчетный условный угол, а оградит только от части помех во вторичных цепях.

Основной недостаток фазных принципов действия защит от замыканий на землю – отказ в срабатывании, либо неселективное действие при перемежающихся замыканиях на землю. При перемежающемся замыкании угла между током и напряжением нулевой последовательности как такового нет, потому что понятие разности фаз между двумя циклическими функциями существует для функций одной частоты. На рис. 3.23 представлена осциллограмма токов и напряжения НП при перемежающемся замыкании в городской кабельной сети, из которой видно, что угла между током и напряжением не существует. Токи НП имеют одинаковую физическую природу

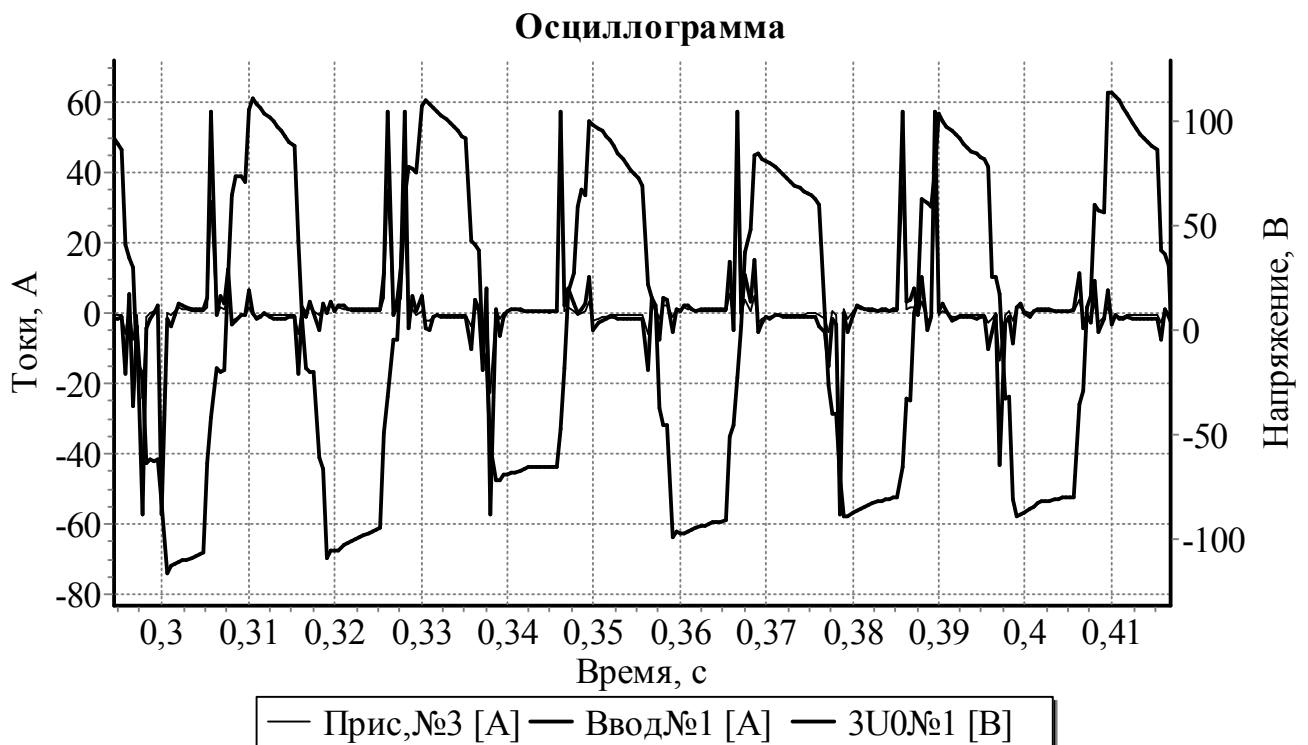


Рис. 3.23. Осциллограмма токов и напряжения НП

и на осциллограмме отличаются только амплитудой. В сетях без резистивного заземления нейтрали углы между токами могут быть либо 0, либо 180 градусов. Определяя разность фаз токов между всеми токами можно определить



поврежденное присоединение. При замыкании на присоединении защищаемой секции ток НП в поврежденном присоединении будет иметь противоположное направление относительно других токов.

Если рассматривать два тока одной физической природы (рис. 3.27), то можно видеть, что форма их сигналов отличается по амплитуде пиков, но моменты возникновения бросков тока одинаковы. В таком случае для рассмотрения можно заменить импульсный ток отдельными импульсами (рис. 3.24). В таком случае, условный угол между токами будет вычисляться по формуле:

$$\cos \varphi = \frac{A_{1.1} \cdot A_{2.1} + \dots + A_{1.n} \cdot A_{2.n}}{\sqrt{A_{1.1}^2 + \dots + A_{1.n}^2} \cdot \sqrt{A_{2.1}^2 + \dots + A_{2.n}^2}}$$

где  $A_m$  – амплитуды дискретных сигналов.

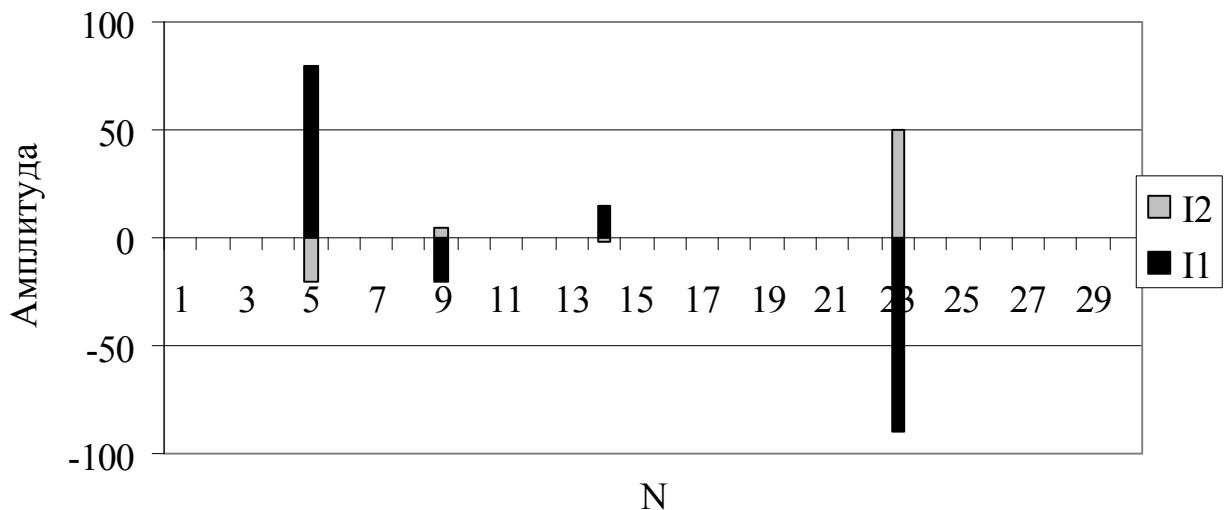


Рис. 3.24. Упрощенный дискретный вид тока дугового замыкания на землю

Токи дугового замыкания на землю отличаются амплитудой в разных присоединениях, при этом отношения амплитуд отличаются между собой незначительно, так как эти токи в основном обусловлены ёмкостью каждой линии. Но искажения амплитуд этих токов возможны. В таком случае необходимо проанализировать определение угла по данной формуле, с учетом таких искажений. Если токи зависят от ёмкостей присоединений, то отношения токов в таком случае будут равны постоянному значению. Для удобства

обозначим эту величину символом  $k$ . Если амплитуду первого сигнала привести к единице, то косинус угла можно будет определить по выражению:

$$\cos \varphi = \frac{k_1 + \dots + k_n}{\sqrt{N} \cdot \sqrt{k_1^2 + \dots + k_n^2}}$$

где  $N$  – число точек на рассматриваемом промежутке времени.

Из-за наличия погрешностей трансформаторов тока и большого уровня помех именно при дуговых замыканиях, отношения амплитуд дискретных сигналов могут отличаться и не быть постоянными. Например, если число точек сигнала в расчетном участке времени с одинаковым значением отношения амплитуд равно 20%, а амплитуды остальных сигналов равны нулю, то расчетный угол будет равен 65 градусам (рис. 3.25).

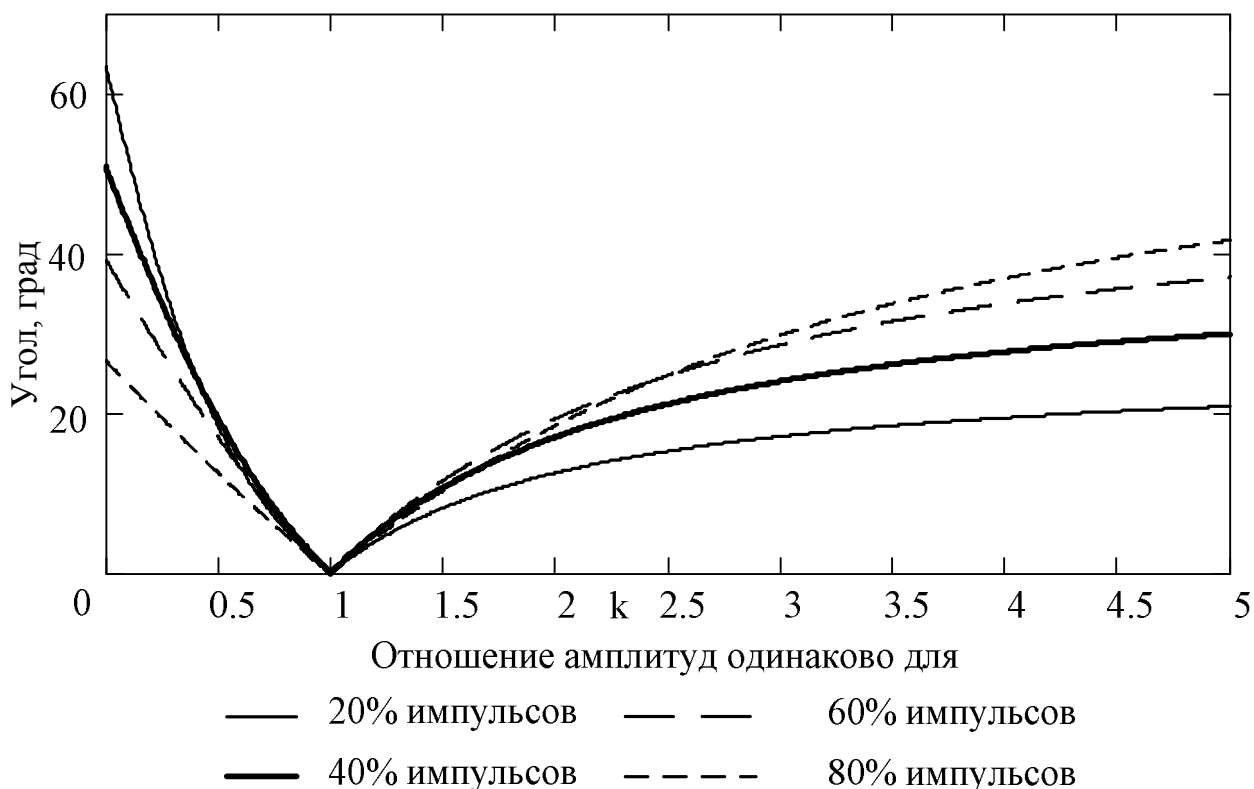


Рис. 3.25. Расчетный угол при различии в отношениях амплитуд сигналов

Наиболее распространенный на практике случай, определенный при анализе осциллограмм дуговых замыканий на землю – отношения половины импульсов тока отличаются не более чем на 50%, что по рисунку 3.25 соответствует 20 градусам. В любом из рассмотренных случаев, угол будет попадать в диапазон  $-90$  до  $90$  градусов, что позволяет судить по направлению

тока, используя данное выражение и при дуговых замыканиях.

На рис. 3.26 представлена осциллограмма смоделированного процесса перемежающегося замыкания на землю и углы, рассчитанные по этим кривым тока. Присоединения №1 и №3 – отходящие, неповрежденные, присоединение №2 – поврежденное. Расчетный условный угол между присоединениями 1 и 3 – 35 градусов, между присоединениями 1 и 2 – 170 градусов.

Аналогичные расчеты для осциллограмм, полученных путем сбора данных защитами типа МКЗЗП подтверждают работу данного алгоритма. При сонаправленных токах расчетный условный угол составляет 5 градусов, при противоположно направленных – 175 градусов (рис. 3.27).

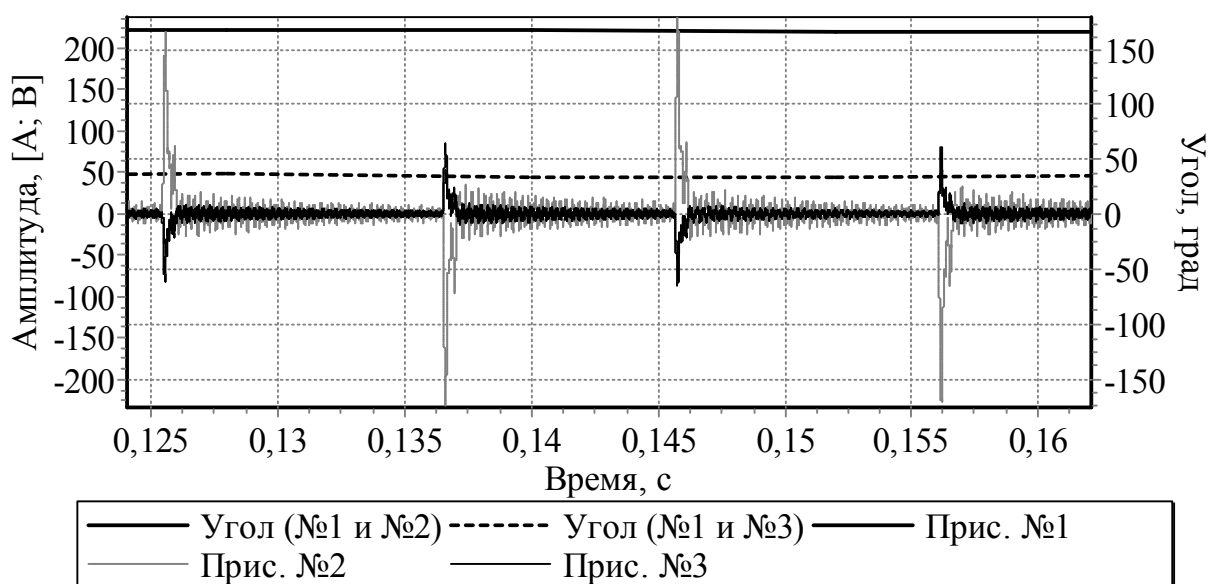


Рис. 3.26. Результат моделирования тока перемежающейся дуги

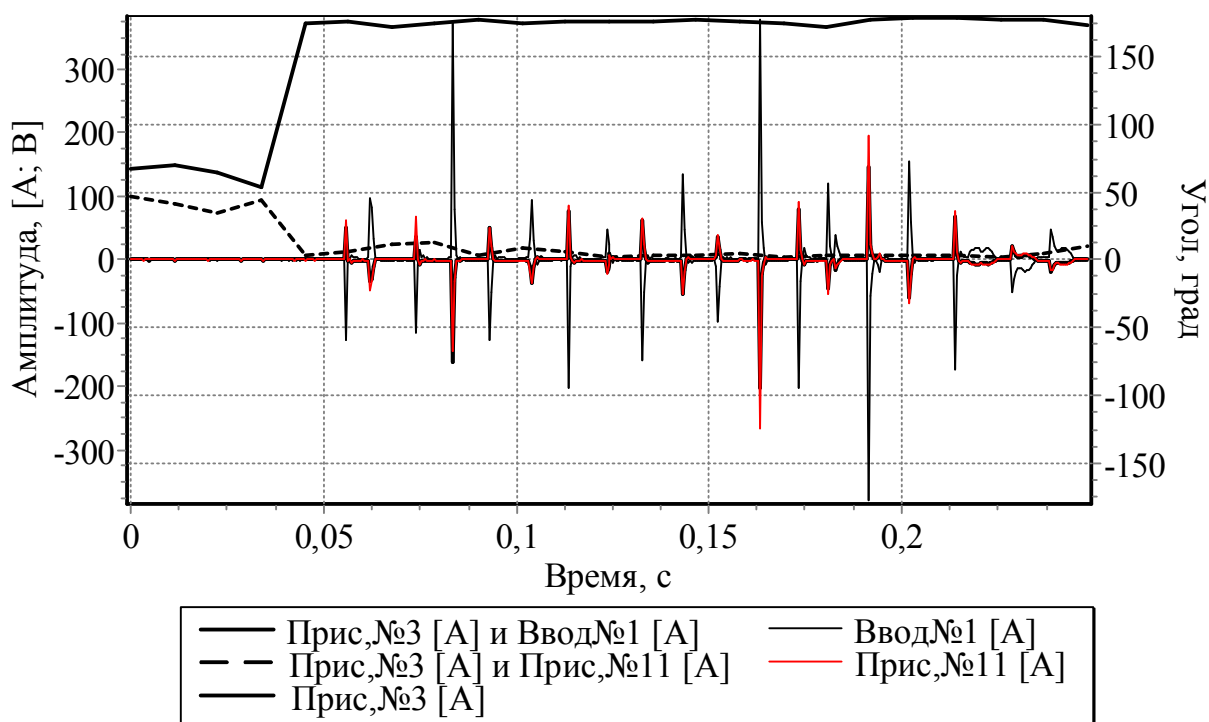


Рис. 3.27. Осциллограмма токов ТП 3020 (22.03.2009 18:44:10)

Как видно из сравнения рисунков 3.26 и 3.27 в первом случае сигналы содержат высокочастотную помеху, которая и приводит к ошибке в определении угла. В том же случае, когда токи перемежающегося замыкания практически не содержат сигналов различных частот, а одинаковы по своей физической природе, то и ошибка в определении угла оказывается минимальной, как на рис. 3.27, несмотря на различные амплитуды токов.

При замыкании на секции шин все токи сонаправлены, что является достаточным признаком для выявления такого режима. При включенном секционном выключателе на подстанции с большим количеством присоединений и установленных двух комплектах защиты во всех присоединениях второй секции при ОЗЗ в  $K1$  токи будут иметь одинаковое направление, в присоединениях первой секции поврежденное присоединение будет иметь противоположное направление по сравнению с неповрежденными и в нем будет максимальный ток. По предложенному алгоритму защита секции №1 сработает селективно. Во втором комплекте будет выполнено условие о замыкании на секции. При замыкании на секции ( $K2$ ) при параллельной работе секций в обоих комплектах будет выполняться условие о замыкании на секции.

Однако назвать такое действие комплектов защит неселективным нельзя, ведь секция получается в таком случае общая, и информация о токе нулевой последовательности секционного выключателя отсутствует. По тем данным, что приходят в каждый комплект защиты другого вывода получить невозможно.

Такой фазный принцип позволяет более точно определять направления между токами или между напряжением нулевой последовательности и током, потому что используется вся информация о токе.

### **3.5. Комбинированный алгоритм**

Каждый из представленных алгоритмов имеет некоторые недостатки. Используя комбинацию этих алгоритмов, можно создать универсальный алгоритм, селективно работающий во всех режимах [75].

Комбинация алгоритмов может происходить как автоматически, так и вручную, при настройке комплекта защиты.

Защита может применяться на трансформаторных подстанциях с распределительным устройством, на распределительных пунктах сетей 6-10 кВ. Основопологающим принципом для защиты является принцип относительного замера. Этот принцип хорошо работает на питающих трансформаторных подстанциях. На таких подстанциях токи НП присоединений имеют значения одного порядка, и количество присоединений существенно превышает три присоединения. В таком случае принцип относительного замера можно дополнить суммирующим алгоритмом, либо заменить фазным алгоритмом. При этом конечное срабатывание защиты будет определяться по логике, представленной на рис. 3.28 и 3.29. В первом случае защита будет определять поврежденное присоединение по максимальному току, а повреждение секции – по сумме токов. Если же число присоединений меньше 3, то алгоритмы определения места повреждения работать будут некорректно, в таком случае необходимо задействовать алгоритм определения фазы между током и напряжением нулевой последовательности. Такие режимы возможны на

подстанциях с небольшим числом присоединений. Зачастую это либо трансформаторные подстанции городских сетей, либо подстанции 35 кВ, число отходящих ВЛ на таких подстанциях обычно невелико.

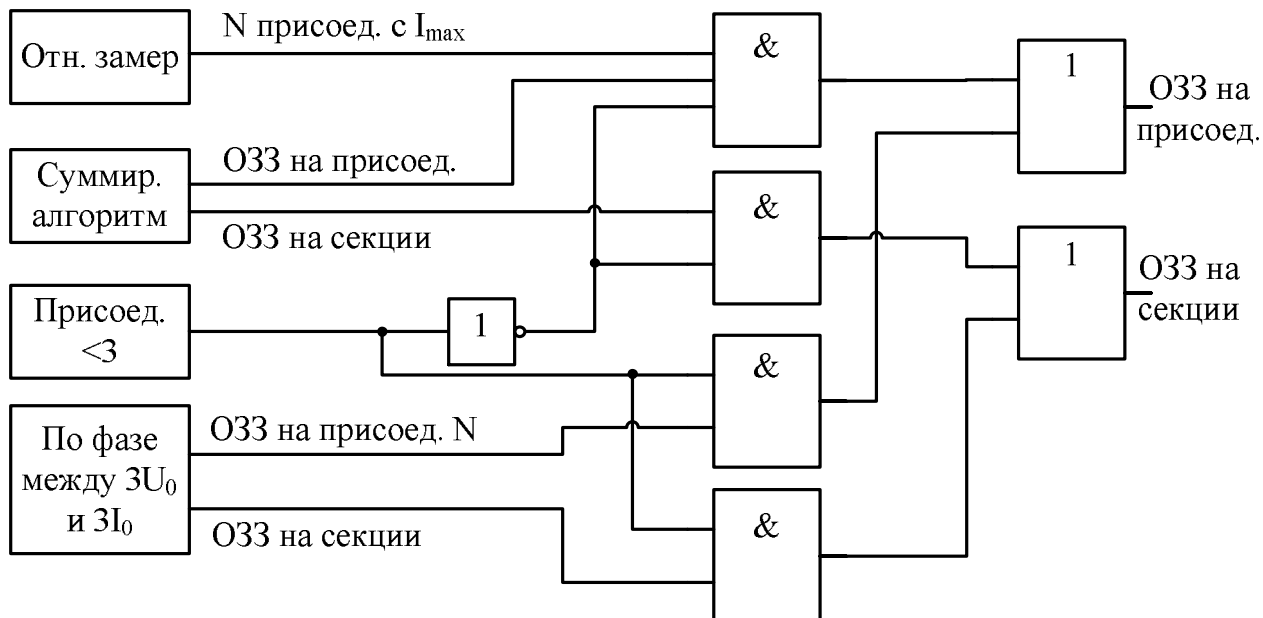


Рис. 3.28. Сочетание суммирующего алгоритма, принципа относительного замера и алгоритма с определением направления

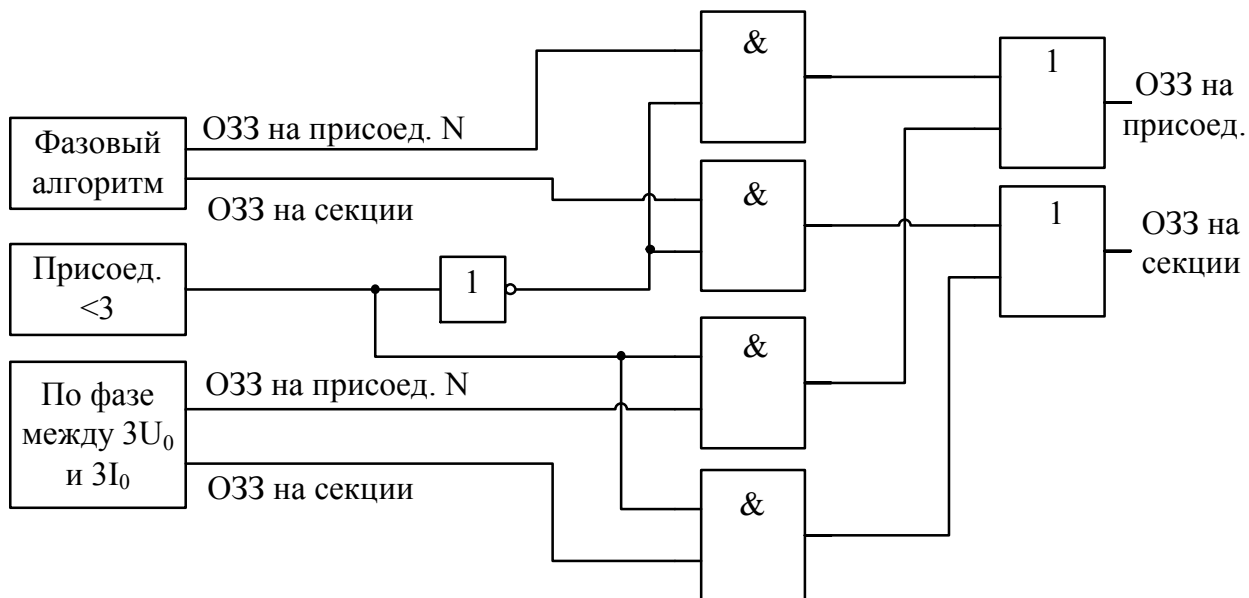


Рис. 3.29. Комбинированный алгоритм, основанный на расчете разности фаз между токами

Число обтекаемых током присоединений определяется следующим

алгоритмом:

- сравниваются два присоединения с максимальными токами – если разница в токах больше 10%, это значит что число присоединений больше двух;
- если разница меньше 10%, то далее сравниваются токи второго и третьего (по убыванию величины тока) присоединений. Если ток третьего присоединения составляет более 10% от тока второго присоединения, то фиксируется число присоединений больше двух. Если же ток третьего присоединения составляет менее 10% от тока второго, то фиксируется наличие двух присоединений;
- если все токи меньше тока уставки  $3I_{0min}$ , определяемого минимально возможным ёмкостным током присоединения, то фиксируется число присоединений меньше двух, т.е. защита сигнализирует о наличии замыкания, не определяя поврежденное присоединение.

Такое сочетание алгоритмов позволяет охватить те режимы, которые алгоритмы по отдельности не в состоянии селективно определить.

Заземление нейтрали через резистор приводит к увеличению тока замыкания на землю, что может только благоприятно сказаться на эффективности использования рассмотренных выше алгоритмов для защиты от ОЗЗ, особенно при малых токах НП. Действительно, при ОЗЗ на отходящем присоединении ток в поврежденном присоединении возрастет за счет активной составляющей тока резистора, как в абсолютном выражении, так и в относительном. Кроме того, это позволяет избежать использования сопоставления направлений токов и напряжения нулевой последовательности, потому что появится дополнительный источник тока нулевой последовательности – ток резистора.

В случае применения защиты на распределительных и трансформаторных подстанциях обширных кабельных сетей наиболее эффективным будет применение логического алгоритма, при этом такой алгоритм не нуждается в комбинации с другими принципами и обеспечивает селективное действие защиты во всех режимах.

### 3.6. Выводы по главе

1. Для сетей с отношением ёмкостного тока отдельного присоединения к току замыкания на землю большим 0,1 применим алгоритм относительного замера. Его суть состоит в одновременном сравнении значений всех токов НП присоединений; максимальный ток будет в поврежденном присоединении. Данный алгоритм дополнен признаком геометрической суммы токов НП всех присоединений, позволяющим определять замыкания на секции шин. При этом действующее значение тока замыкания на землю должно превышать максимальный ток НП присоединений более чем на 44%. Эти условия обеспечивают применение данного алгоритма на головных подстанциях 6-35 кВ.

2. В том случае, если первый алгоритм не применим, возможно применение логического алгоритма. Его суть состоит во введении пусковых органов по току на каждом присоединении секции. По числу сработавших ПО можно определить место повреждения: на присоединении, на шинах или во внешней сети. Уставка пусковых органов выбирается по условиям отстройки от максимального собственного тока НП присоединения и от минимального тока замыкания в сети при металлическом замыкании на землю. Для стабильной работы защиты при замыканиях через переходные сопротивления ток срабатывания ПО автоматически изменяется пропорционально напряжению нулевой последовательности.

3. Предложенный фазный алгоритм позволяет обеспечить защиту присоединений от замыканий на землю во всех остальных режимах работы. Работа алгоритма основана на вычислении направления между токами путем интегрирования и мультипликации токов НП за период. Данный принцип позволяет определять направление между токами, как при металлических, так и при дуговых замыканиях на землю. Анализ возможных погрешностей трансформаторов тока и последующих преобразований сигналов по предложенному алгоритму показал, что предельная ошибка определения угла



при дуговом замыкании на землю составляет 53 градуса, что позволяет оценить направление токов и выявить поврежденное присоединение.

4. Предложенные комбинированные алгоритмы исключают недостатки алгоритмов относительного замера и фазного при работе в сети с числом присоединений равным двум. А комбинация признака геометрической суммы токов НП всех присоединений и принципа относительного замера исключает недостаток второго по определению замыкания на шинах секции.

5. Путем анализа погрешностей трансформаторов тока для всех разработанных алгоритмов определены критерии применимости и предложены выражения для расчета их уставок.

6. Для защиты подстанций с большим числом присоединений показана возможность применения отдельных устройств защиты на каждой секции шин.

## 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ В ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

### 4.1. Электрические и магнитные влияния на контрольные кабели

В электрических сетях существуют разного рода электромагнитные помехи, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования технического средства [77].

Любая цифровая техника работает с небольшими уровнями сигналов, поэтому требуется преобразование первичных сигналов тока и напряжения до приемлемых уровней.

На рис. 4.1 представлена общая схема преобразования сигналов для защит микропроцессорного типа.

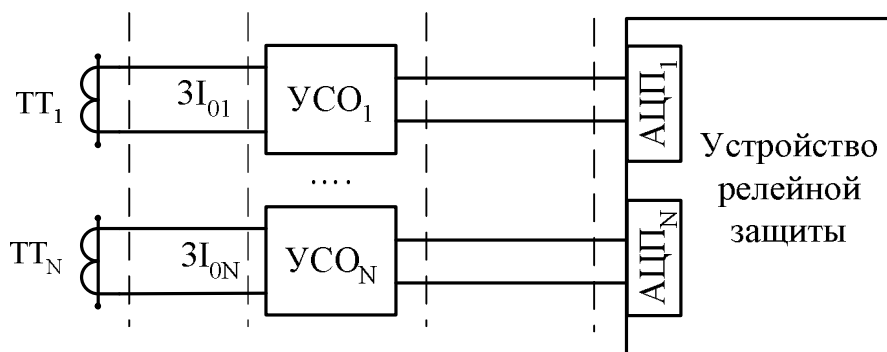


Рис. 4.1. Упрощенная схема подключения микропроцессорной защиты

Устройства сопряжения могут быть либо совмещены с блоком защиты, либо выполнены в виде отдельных блоков. В ряде случаев применяют специальные преобразователи – трансформаторы тока и напряжения, выходные значения которых соответствуют требуемым для микропроцессорных устройств РЗ. В связи с этим может меняться число контрольных кабелей, а также их параметры. Для медных контрольных кабелей, соединяющих ТТ и УСО, сечение должно быть не менее  $2.5 \text{ мм}^2$ . А для соединения устройств сопряжения с блоком релейной защиты кабель может иметь меньшее сечение. При больших расстояниях от трансформаторов тока до

устройств релейной защиты это может привести к существенной экономии на материалах при монтаже УРЗ.

Централизованное устройство защищает сразу несколько присоединений, поэтому от каждого присоединения необходимо подвести сигналы токов и напряжений нулевой последовательности к защите. Для подстанций 6-10 кВ длина соединительных кабелей может быть относительно небольшой – до 20 метров, а на подстанциях 35 кВ распределительное устройство выполняется открытым, поэтому расстояния там значительно больше, и длина кабелей, связывающих трансформаторы тока и напряжения и устройство защиты, значительно больше, и может достигать 150 м.

Как видно из рис. 4.1 УСО можно установить как непосредственно около самой защиты (совместить с защитой), так и преобразовывать сигнал около ТТНП и ТН. Преимуществом последнего варианта является уменьшение нагрузки на ТТ, а также передача меньших сигналов, что уменьшает требования к сечению контрольного кабеля.

УСО уменьшает сигнал в необходимое число раз, чтобы согласовать значение сигнала с необходимым значением входных сигналов микропроцессорной защиты. При больших коэффициентах трансформации УСО полезный сигнал имеет малое значение, и на него возможно наложение помех, потому что их значения могут быть сопоставимы. В зависимости от места установки защиты, пути прокладки кабеля и исполнения линии связи может существенно меняться электромагнитная обстановка, а, следовательно, и уровень помех.

Для оценки ЭМО проводятся исследования, включающие мониторинг помех. При длительном мониторинге помех выявляются возможные виды помех, их амплитудные и временные характеристики. Чем больше класс напряжения подстанции, где расположено устройство защиты, и длина контрольного кабеля, тем больше уровни помех. Требования к защитах среднего класса напряжения приведены в разделе 1.3, однако мониторинг помех в релейных щитах подстанций 220-500 кВ показывает меньшие значения

наведённых сигналов, чем степени жесткости стандарта [41]. Максимальная помеха при мониторинге имела амплитуду 500 В. Что меньше, чем степени жесткости оборудования подстанций среднего напряжения.

Для подтверждения закономерности снижения помех в зависимости от уровня напряжения подстанции, где устанавливается защита, был проведён мониторинг помех в ТП2304 городских сетей г. Ханты-Мансийска.

Мониторинг проводился в течение одной рабочей недели с 19 марта по 23 марта (100 часов). Длины контрольных кабелей, соединяющих устройство защиты и трансформаторы тока, составили от 10 до 20 метров. За время мониторинга в ТП2304 производились неоднократные операции по отключению и включению присоединений.

За период регистрации было зафиксировано 16 возмущений во вторичных цепях с уровнем помехи выше 60 В.

За первый час регистрации было зафиксировано 66 возмущений амплитудой 20 В и 28 возмущений с амплитудой 40 В. После этого порог регистрации был загрублен до 60 В. При этом превышение различных уровней на выбранных жилах в период регистрации составило:

60 В – 16 раз,

100 В – 2 раза.

Максимальная зарегистрированная помеха составила 170 В по амплитуде.

Подавляющее большинство зарегистрированных помех представляет собой одиночный или серию высокочастотных периодических затухающих импульсов. Частотный диапазон помех составляет 100 кГц – 1 МГц.

Ежедневно фиксировались импульсы помех длительностью 1.5-2 мкс и амплитудой 25-30 В на всех каналах одновременно.

На рис. 4.2-4.5 приведены наиболее характерные виды зарегистрированных помех.

На рис. 4.2 приведена осциллограмма напряжения на токовом входе защиты в момент замыкания на землю. Нарастание импульса идет со скоростью 2 В/мкс.

На рис. 4.3 приведён стандартный импульс, который появляется во вторичной цепи несколько раз в сутки, меняется при этом только амплитуда.

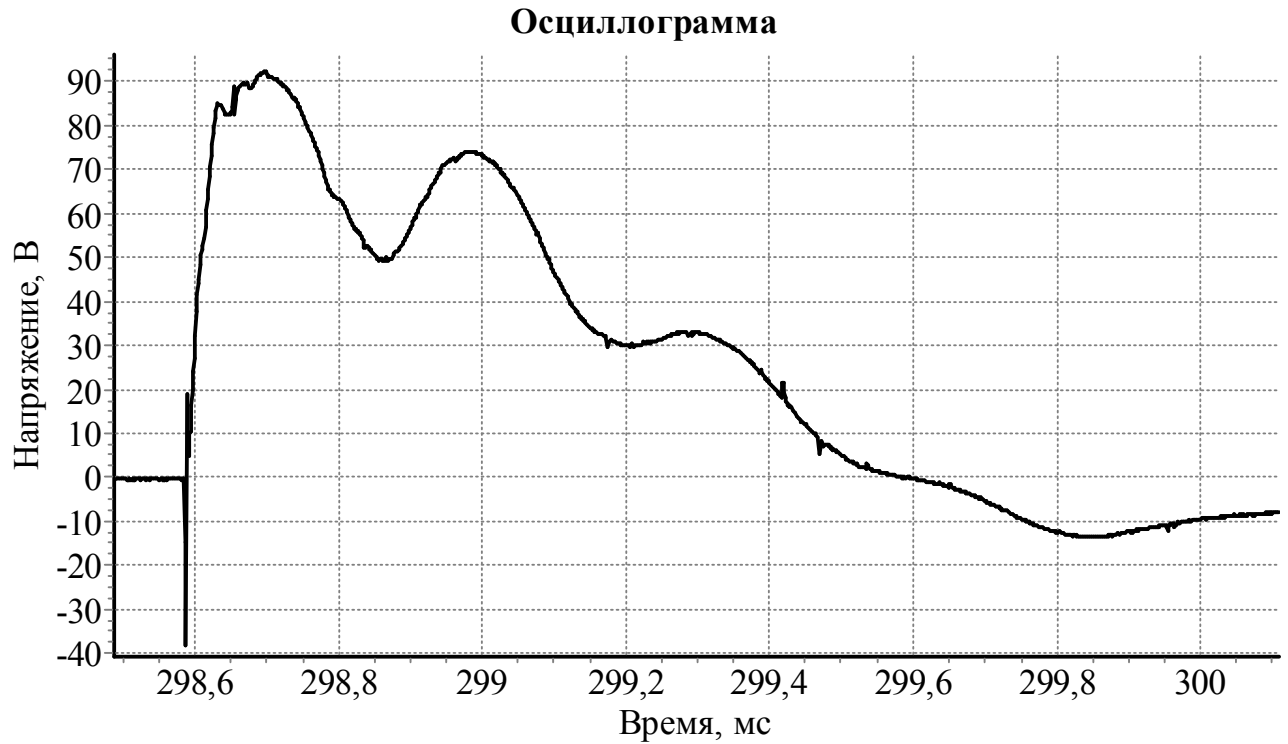


Рис. 4.2. Импульс напряжения на входах токовых каналов при замыкании на землю

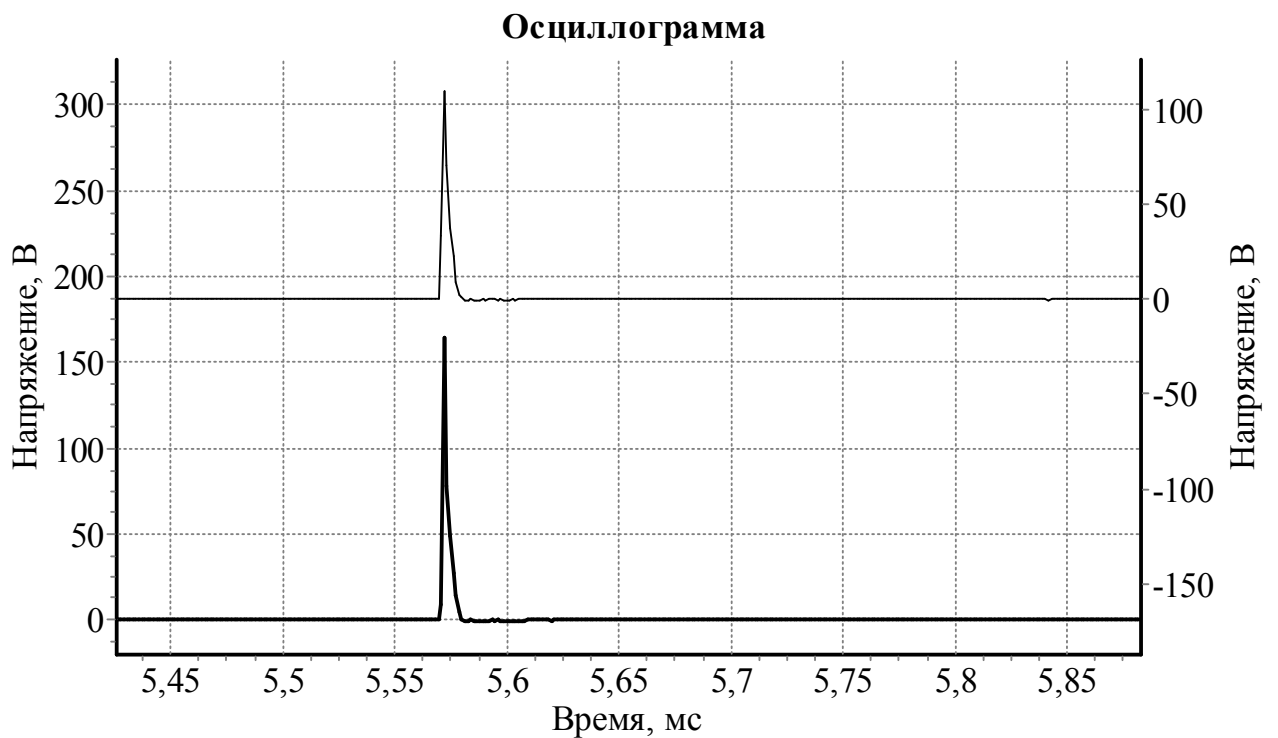


Рис. 4.3. Вид стандартного одиночного импульса

Длительность фронта импульса – 1 мкс. Зачастую такие импульсы приходят в пачке как показано на рис. 4.4. И последний наблюдаемый вид помехи – колебательная затухающая помеха, приведённая на рис. 4.5.

Ни одна из помех не превышает уровень, регламентируемый по стандарту [41]. Максимальная амплитуда помехи составила 170 В, при этом минимальная степень жесткости регламентирует амплитуду помехи в 500 В для колебательной затухающей помехи и 1 кВ для импульсной помехи, как в зафиксированном случае.

Устройство защиты МКЗЗП было сертифицировано на устойчивость к помехам и на соответствие ГОСТ по ЭМС (приложение 5).

Но в некотором случае помехи небольшой амплитуды могут вызвать неселективное действие разрабатываемой защиты. В том случае, если значение помехи станет соизмеримым с полезным сигналом, возможно некорректное функционирование в основном фазного алгоритма. Если помеха превышает полезный сигнал, то и остальные алгоритмы будут работать неселективно.

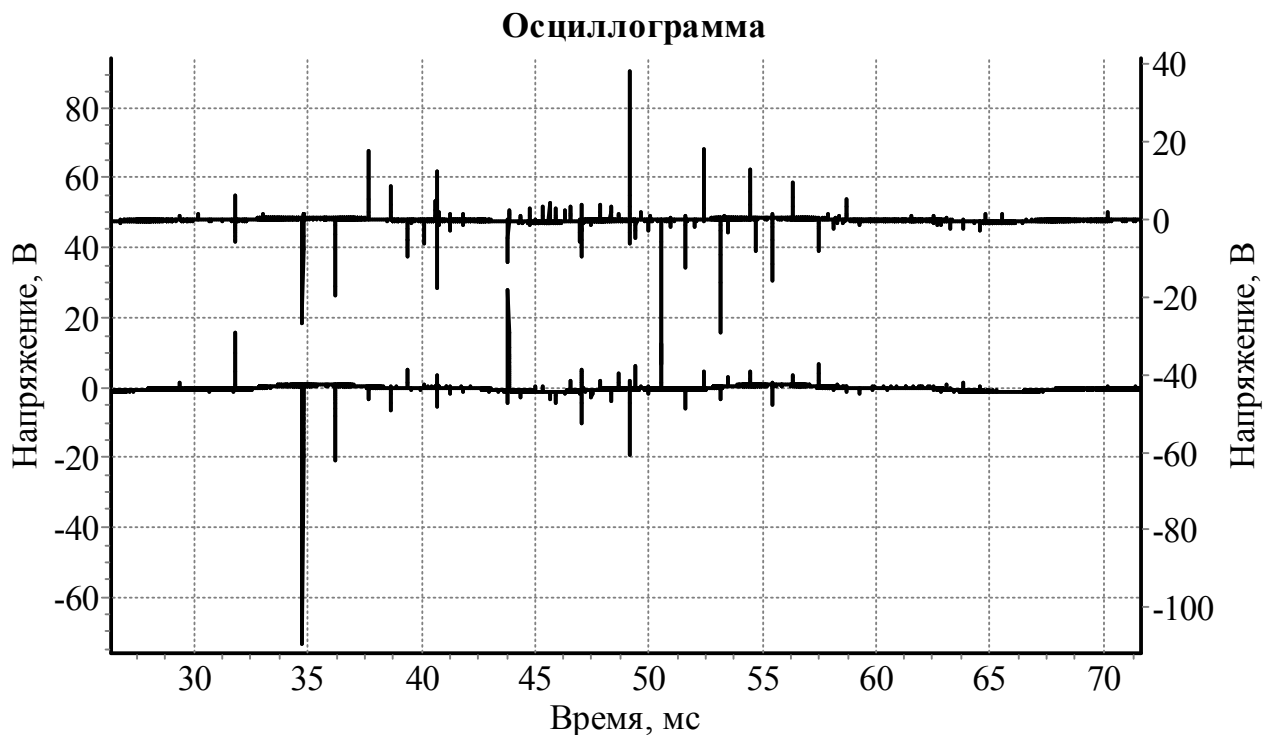


Рис. 4.4. Пачка импульсов на токовых входах защиты

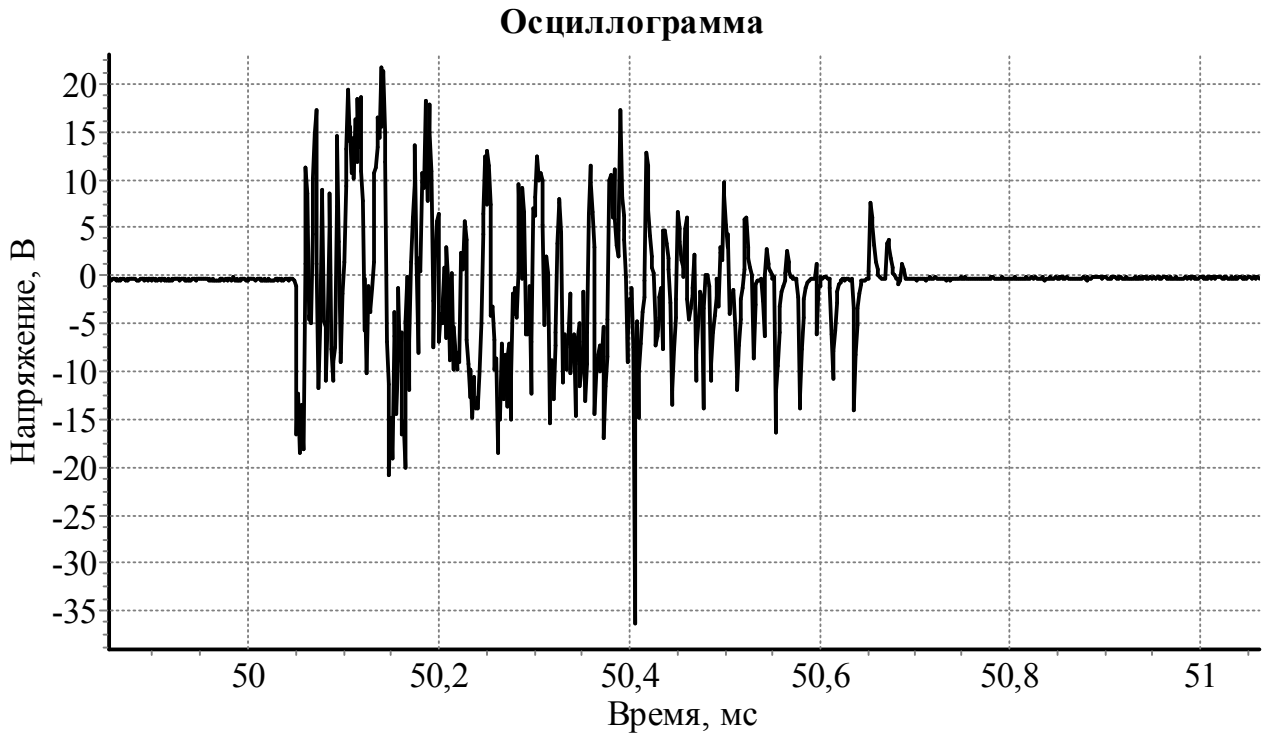


Рис. 4.5. Повторяющаяся колебательная затухающая помеха на токовом входе  
МП терминала защиты

При исследовании помех в линиях связи, соединяющих защиту и УСО, необходимо учитывать влияние самого устройства РЗА. При больших входных сопротивлениях уровень помехи будет больше. Например, значение помехи, наводимой электрическим путем, будет максимальным именно при высоких входных сопротивлениях.

Существуют два основных типа связи: электрическая и магнитная и два основных способа уменьшения шумовых помех: экранирование и заземление [78].

Упрощенное представление ёмкостной связи между двумя проводниками дано на рис. 4.6. Здесь  $C_{12}$  – паразитная ёмкость между проводниками 1 и 2,  $C_{13}$  – ёмкость между проводником и землей,  $C_{23}$  – суммарная ёмкость между проводником 2 и землей, а  $R$  — сопротивление проводника 2 относительно земли.

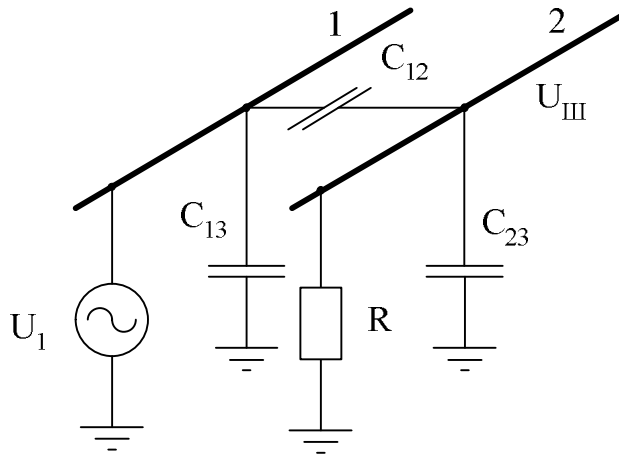


Рис. 4.6. Ёмкостная связь между двумя проводниками.

Сопротивление  $R$  относительно земли обычно имеет достаточно большое значение, поэтому напряжение на проводнике 2 можно записать в виде:

$$U_{III} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23}} \cdot U_I,$$

где  $U_{III}$  – действующее значение наведённого напряжения,  $U_I$  – действующее значение напряжения источника помехи.

Если экранировать проводник сплошным экраном, то напряжение шумов на проводнике снизится до нуля. Но экран обычно имеет разрывы по краям кабеля, тогда можно записать напряжение на проводнике:

$$U_{III} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{23} + C_{2Э}} \cdot U_I,$$

где  $C_{2Э}$  – ёмкость между проводником и экраном.

В этом выражении величина  $C_{12}$ , а следовательно, и  $U_{III}$  зависят от длины части проводника 2, выступающей за экран.

Таким образом, для хорошего экранирования электрического поля необходимо: 1) минимизировать длину центрального проводника, выходящего за пределы экрана, и 2) обеспечить хорошее заземление экрана.

На рис. 4.7 дано упрощенное представление индуктивной связи. При прохождении тока  $I$  через замкнутую цепь возникает магнитный поток  $\Phi$ , пропорциональный этому току. Можно записать, что

$$\Phi = L \cdot I,$$

где коэффициент пропорциональности  $L$  – индуктивность.



Если магнитный поток, создаваемый током, проходящим в одной цепи, пересечет другую цепь, то имеет место взаимная индукция между этими цепями, коэффициент которой определяется как

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_1}$$

Здесь  $\Phi_{12}$  обозначает поток через цепь 2, вызванный током  $I_1$  цепи 1.

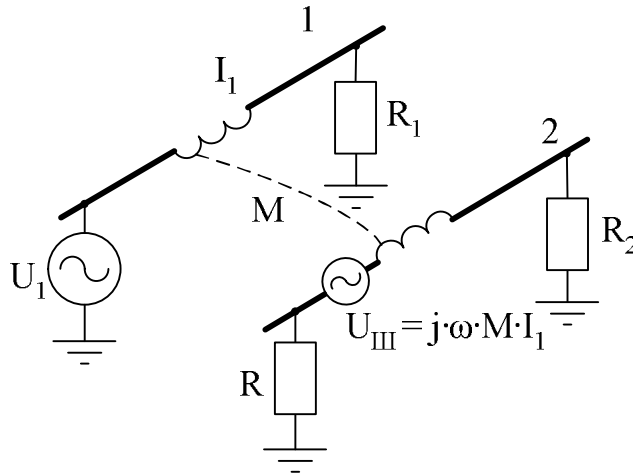


Рис. 4.7. Магнитная связь между двумя цепями.

Если контур с проводником охватывает площадь  $S$ , то

$$U_{ш} = j \cdot \omega \cdot B \cdot S \cdot \cos \theta$$

Как показано на рис. 4.8,  $S$  – площадь замкнутого контура,  $B$  – действующее значение плотности магнитного потока, изменяющегося по синусоидальному закону с частотой  $\omega$ , выраженной в радианах в секунду, а  $U_{ш}$  – действующее значение наведённого напряжения.

Данное соотношение можно выразить также через коэффициент взаимной индуктивности  $M$  двух цепей:

$$U_{ш} = j \cdot \omega \cdot M \cdot I_1 = M \frac{dI_1}{dt}$$

Для уменьшения напряжения шумов необходимо уменьшить  $B$ ,  $S$  или  $\cos \theta$ . Величину  $B$  можно уменьшить, разнося цепи в пространстве или применив в цепи источника скрученную (витую) пару проводов. Применение витой пары для приемника позволяет уменьшить площадь  $S$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что помещение проводника в экран

и заземление экрана с одной стороны не влияют на значение напряжения, наводимого на этот проводник магнитным полем.



Рис. 4.8. Магнитное поле с плотностью потока  $B$  пересекает площадь  $S$  под углом  $\theta$ .

#### 4.2. Экспериментальное определение уровней помех на контрольном кабеле

При монтаже защит на действующих подстанциях 6-10 кВ контрольные кабели прокладываются поверх существующих жгутов, и путь прокладки прямого и обратного кабелей не всегда совпадает. Это вызывает в некоторых случаях значительное наведение помехи на полезный сигнал. На рис. 4.9 представлена осциллограмма сигналов, приходящих на вход блока оцифровки защиты. Токи во всех присоединениях различные, однако, на уровне сигнала это сказывается незначительно, что говорит о том, что основную часть сигнала составляют помехи, а не небаланс ТТНП.

Для определения действительного влияния способа организации связи между УСО и устройством релейной защиты требовалось провести эксперимент, в ходе которого можно было бы измерить значения помех при различных способах подключения УСО. Этот эксперимент позволит выявить наиболее простой и эффективный способ организации связи.

Для проведения эксперимента была собрана схема А, представленная на рис. 4.10. Длина контрольного кабеля составила 18 метров, что соответствует реальным длинам контрольных кабелей на подстанциях 6-10 кВ. Для создания электрических и магнитных полей параллельно контрольному кабелю был проложен на расстоянии 0.2 метра проводник с током равным 100 А,

протяженностью 1.5 метра. В ходе эксперимента устройством релейной защиты записывались осциллограммы токов и напряжений.

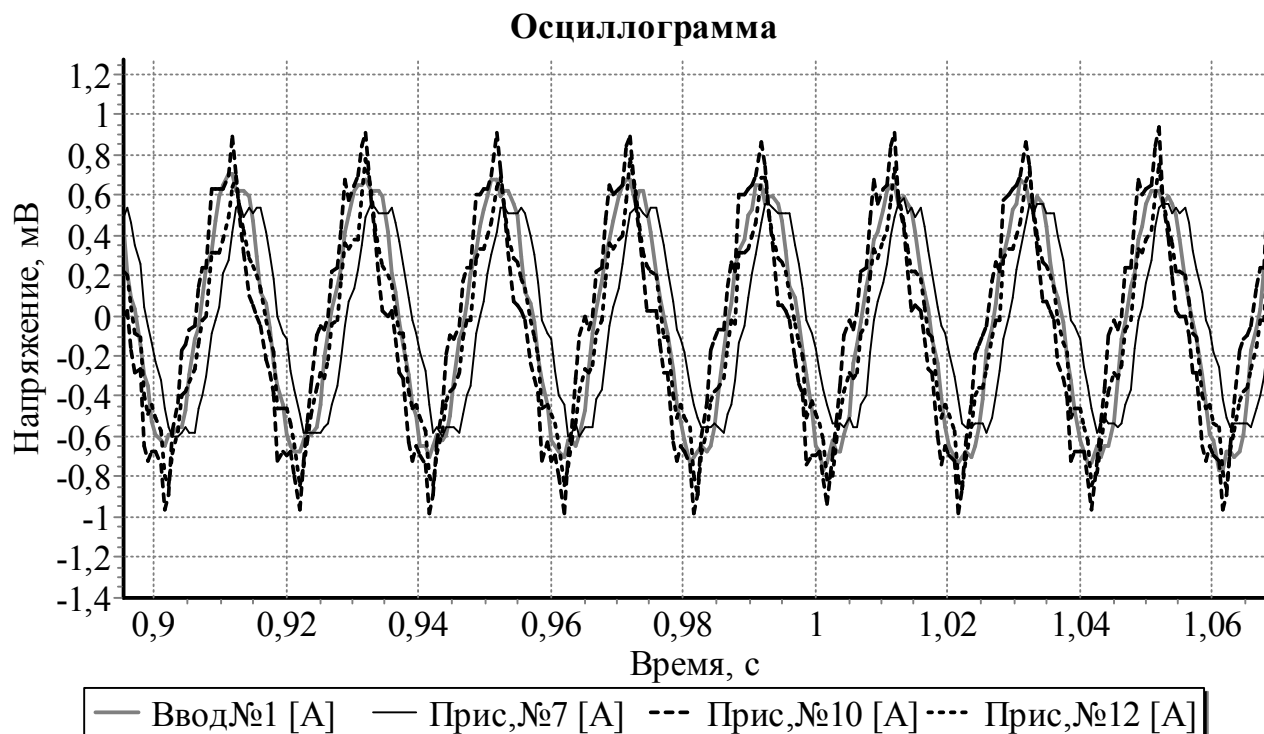


Рис. 4.9. Осциллограмма напряжений на входе блока оцифровки

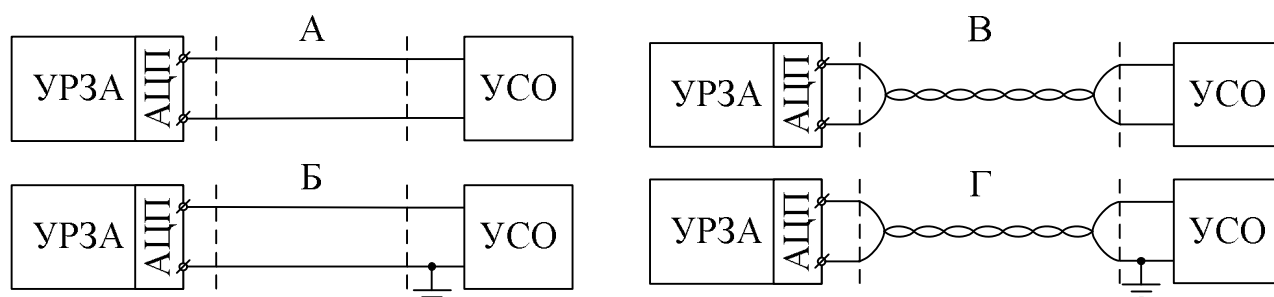


Рис. 4.10. Схемы подключения УСО к устройству защиты

Рассмотрено четыре варианта подключения УСО. По варианту А (рис. 4.10) устройство сопряжения подключалось двумя отдельными проводами, расстояние между которыми достигало двух метров. Осциллограмма для этого случая представлена на рис. 4.11. Амплитудное значение напряжения помехи на входе блока оцифровки составило 1,55 мВ. При заземлении обратного провода (рис. 4.10., Б) непосредственно около УСО позволило снизить уровень помехи до 0,25 мВ (рис. 4.12).

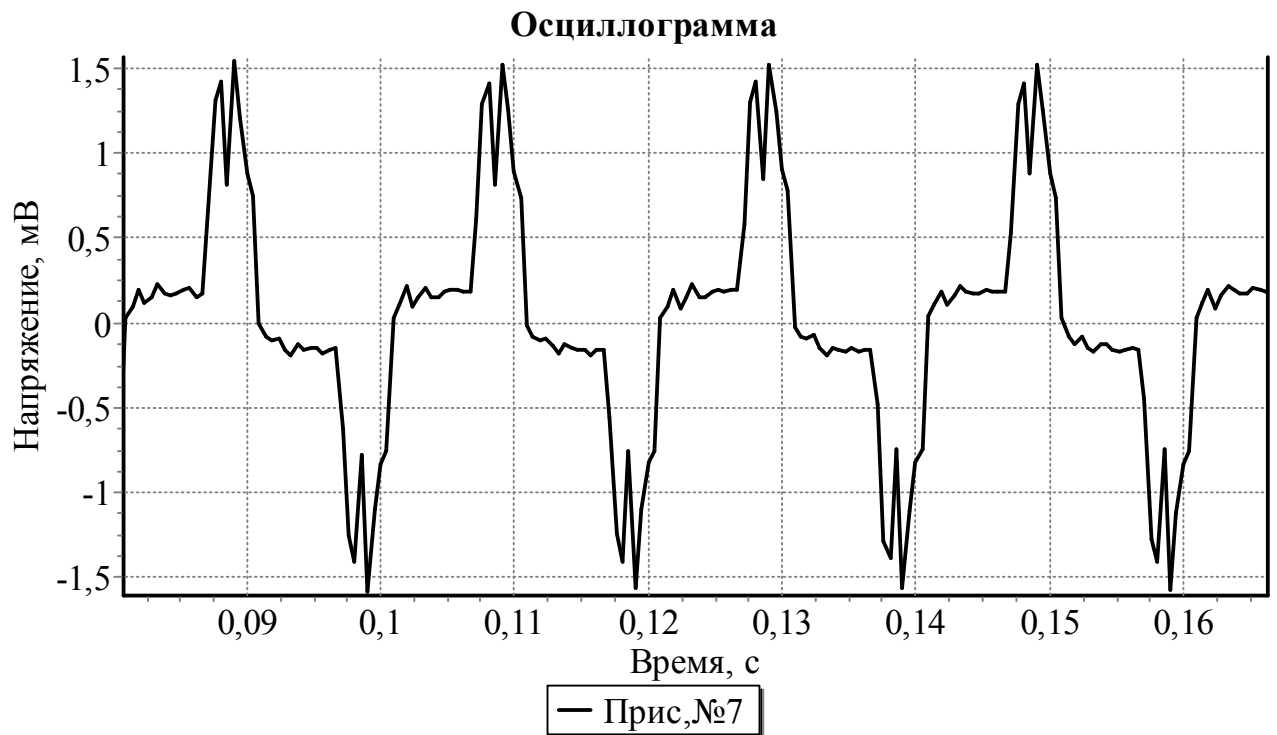


Рис. 4.11. Осциллограмма помехи при обычной прокладке контрольного кабеля

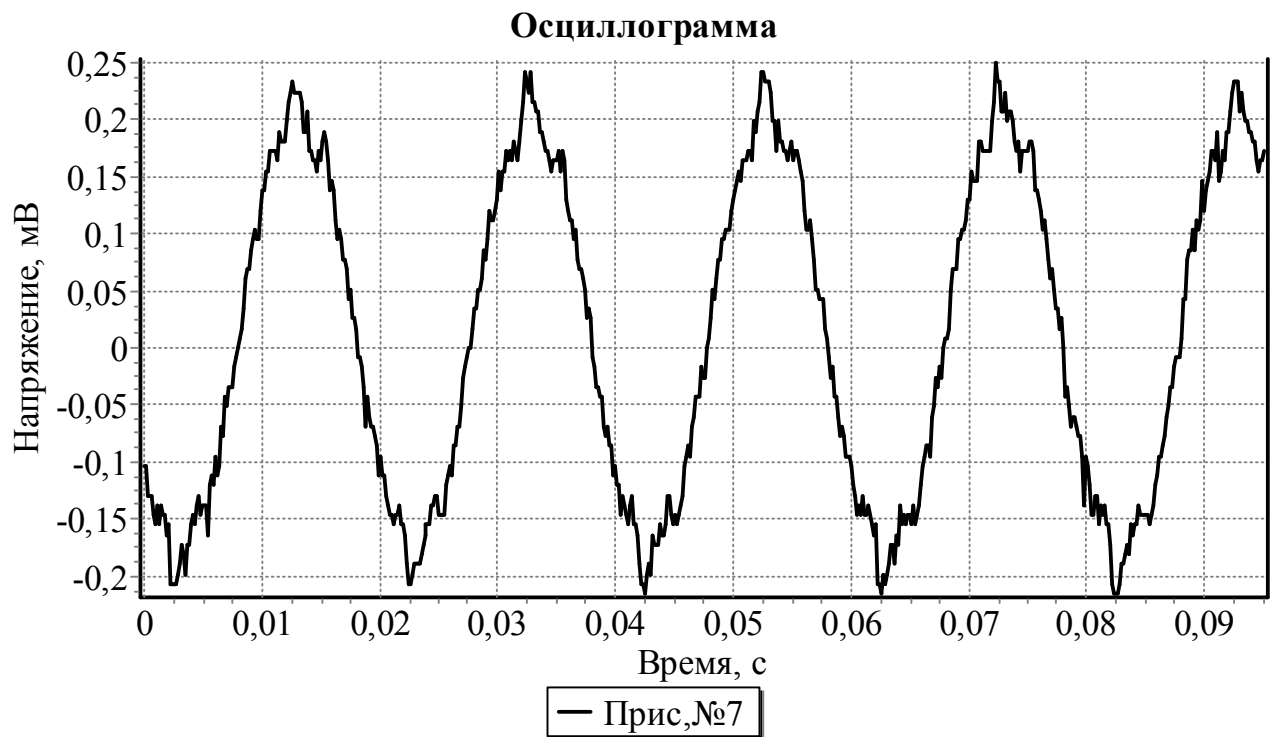


Рис. 4.12. Осциллограмма помехи при заземлении контрольного кабеля в одной точке

Ещё больший эффект на ограничение помех оказывает применение витой пары — контрольного кабеля, прямой и обратный провода которого свиты

между собой (рис. 4.10., В). Максимальная амплитуда помехи в этом случае стала равна 0,9 мВ (рис. 4.13). Как и ожидалось, наименьший уровень помехи будет при заземлении витой пары – 0,08 мВ (рис. 4.14).

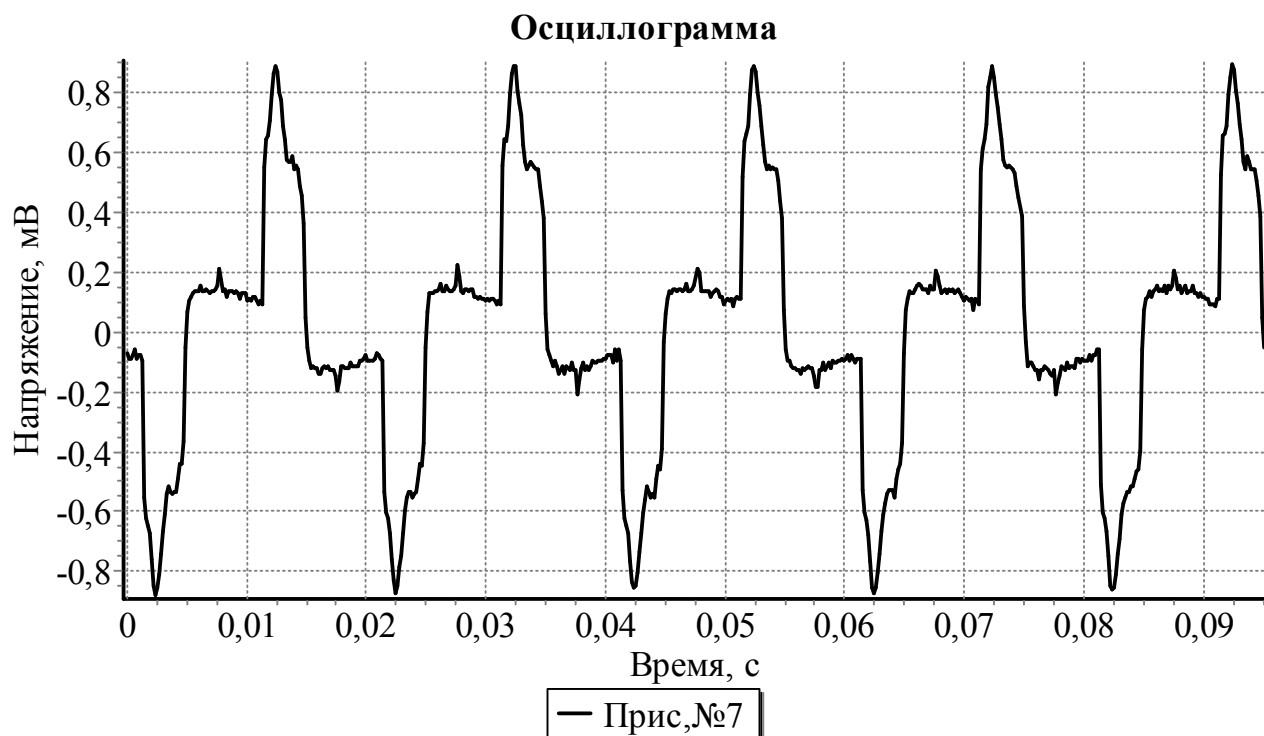


Рис. 4.13. Осциллограмма помехи при прокладке контрольного кабеля витой парой

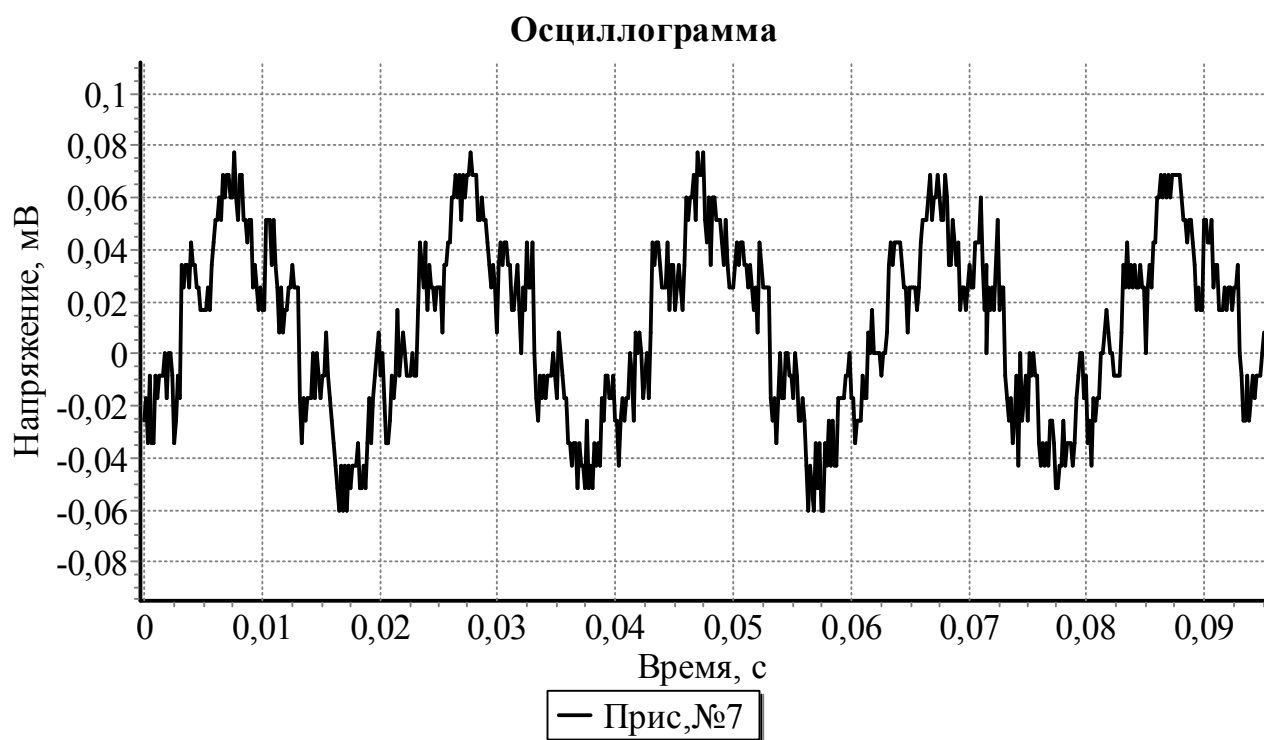


Рис. 4.14. Осциллограмма помехи при заземлении в одной точке витой пары

Для сравнения результатов работы собранной экспериментальной установки на трансформаторной подстанции одной из городских сетей был проведён эксперимент, в ходе которого производилось осциллографирование помехи средствами устройства централизованной защиты от замыканий на землю. При разземлении общей точки, соединяющей контрольные кабели с землей, уровень помех возрос на всех каналах и составил 4 мВ по амплитуде (рис. 4.15). Форма сигнала помехи оказалась схожей с помехой, полученной в ходе экспериментальных исследований. При заземлённой же общей точке, связывающей все каналы токов, помеха имеет небольшое значение и не превышает 0.15 мВ (рис. 4.16).

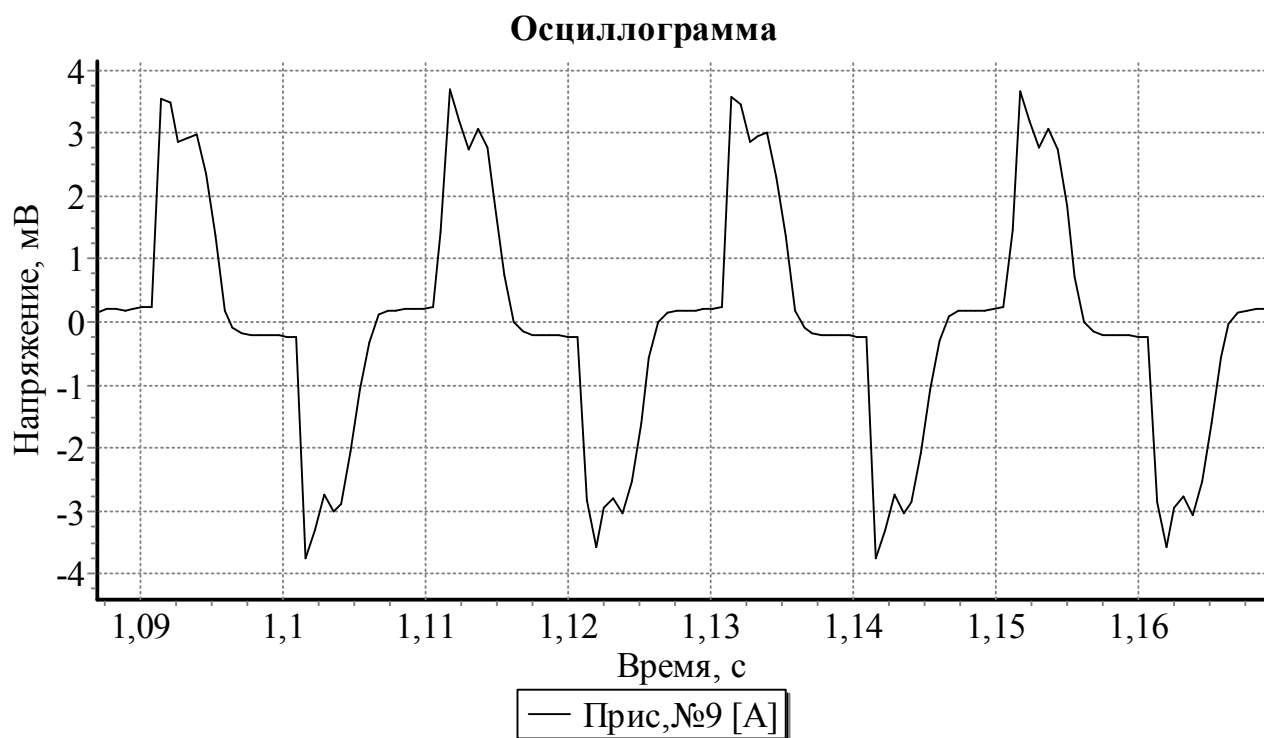


Рис. 4.15. Осциллограмма помехи при отсутствии заземления общей точки контрольных кабелей

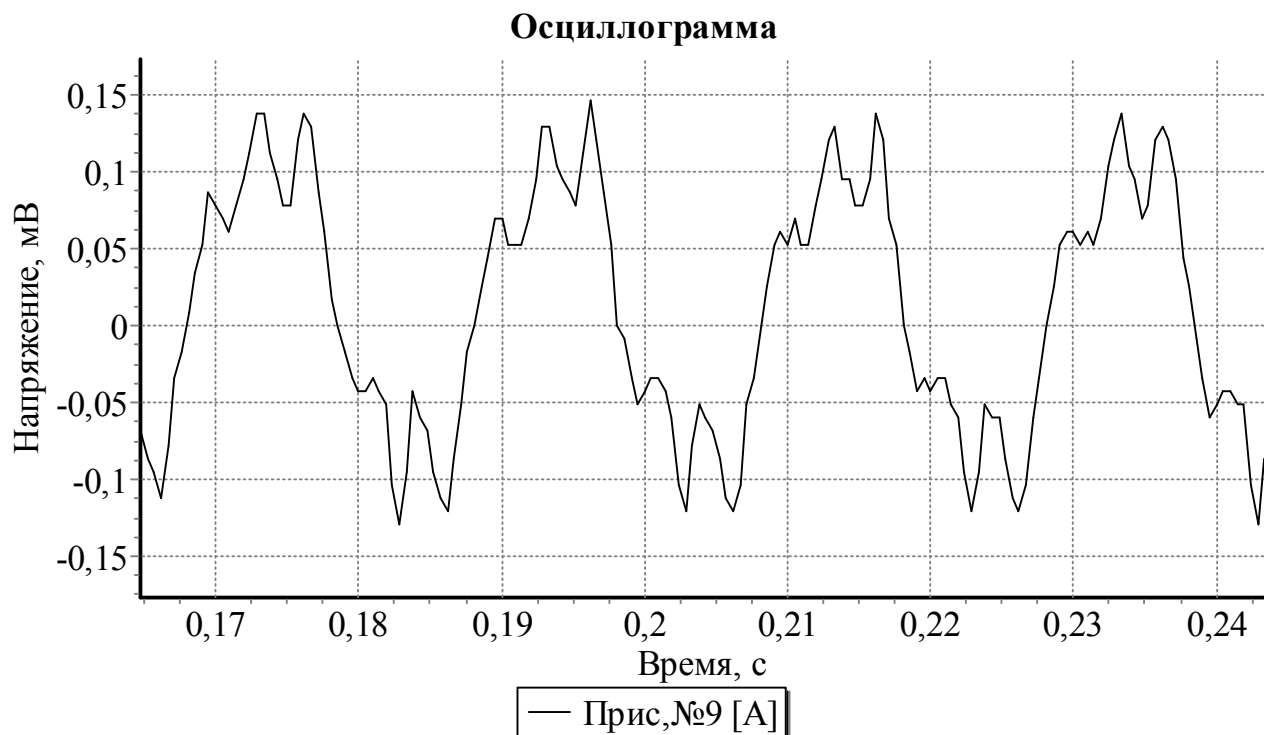


Рис. 4.16. Осциллограмма помехи при заземленной общей точке контрольных кабелей

Можно выделить два основных варианта организации канала связи – прямой разводкой кабеля с заземлением в одной точке и витой парой с заземлением в одной точке. Первый вариант подключения широко применяется при монтаже устройств релейной защиты и не требует специального кабеля. При этом общий провод всех датчиков тока может быть общим, что сокращает общую длину используемого кабеля. Такой вариант исполнения применим при небольших длинах контрольного кабеля, например, на подстанциях 6-10 кВ с небольшим числом присоединений и на подстанциях 35 кВ.

Необходимо организовывать соединение УСО и устройства защиты с помощью витой пары, заземлённой в одной точке, либо уменьшать длину кабелей связи путем выноса УСО к устройству защиты в следующих случаях:

- при большом числе присоединений на подстанциях 6-10 кВ;
- длине контрольного кабеля более 10 метров;
- на подстанциях с собственными ёмкостными токами присоединений менее 1 А.

#### 4.3. Выводы по главе

Проведённый мониторинг помех на подстанциях 6-35 кВ показал, что помехи лежат ниже уровней, определённых нормативными документами к испытаниям на ЭМС. По данным нормативным документам проведена сертификация устройства релейной защиты.

Однако, помехи обнаруженного уровня могут приводить к сбоям в работе алгоритмов защиты.

Уровень помех на входах защиты на подстанциях разнится, это в основном зависит от числа присоединений секций и длин контрольных кабелей.

Экспериментально показано, что для надёжной работы централизованных защит с предложенными алгоритмами достаточно реализации следующих мероприятий:

- заземление контрольных кабелей в одной точке;
- применение в качестве контрольного кабеля витой пары, в особенности на больших подстанциях;
- вынос устройств сопряжения непосредственно к месту установки защиты.



## 5. ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ВНЕДРЕНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

### 5.1. Особенности подключения трансформаторов тока нулевой последовательности в сетях 6-10 кВ

Если способ организации связи между ТТНП, УСО и устройства защиты в значительной степени сказывается на микропроцессорных защитах, то несоблюдение правил монтажа ТТНП и вторичных цепей тока приводит к отказам и излишним срабатываниям релейной защиты любого типа, что часто ведет к устойчивому мнению о неработоспособности защит от замыканий на землю.

За время внедрения защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ накопилась статистика по наиболее частым ошибкам монтажа ТТНП, которые приводят к сбоям в работе защит.

Это связано со спецификой растекания токов по земле и оболочкам кабельных линий [79]. На рис. 5.1 изображена сеть с резистивно-заземленной нейтралью 6-10 кВ и представлено распределение составляющих тока однофазного замыкания по сети 6-10 кВ. Векторная диаграмма токов представлена на рис. 5.2.

Ток замыкания на землю обусловлен ёмкостями «фаза-земля» неповреждённых (здоровых) фаз всех элементов сети (в основном это кабельные и воздушные линии электропередачи) и резистором, включённом в нейтраль трансформатора (в схеме он обозначен как нейтралеобразующий). Эти токи по обмоткам трансформаторов сети перетекают на повреждённую фазу и в месте ОЗЗ стекают в землю (рис. 5.1). Из рассмотрения токораспределения, показанного на рис. 5.1, следует, что в защиту повреждённого присоединения попадает ёмкостной ток нулевой последовательности, обусловленный ёмкостью всей питающей сети (кроме повреждённого элемента), а также ток резистора. Ток, обусловленный ёмкостью повреждённого элемента, частично не

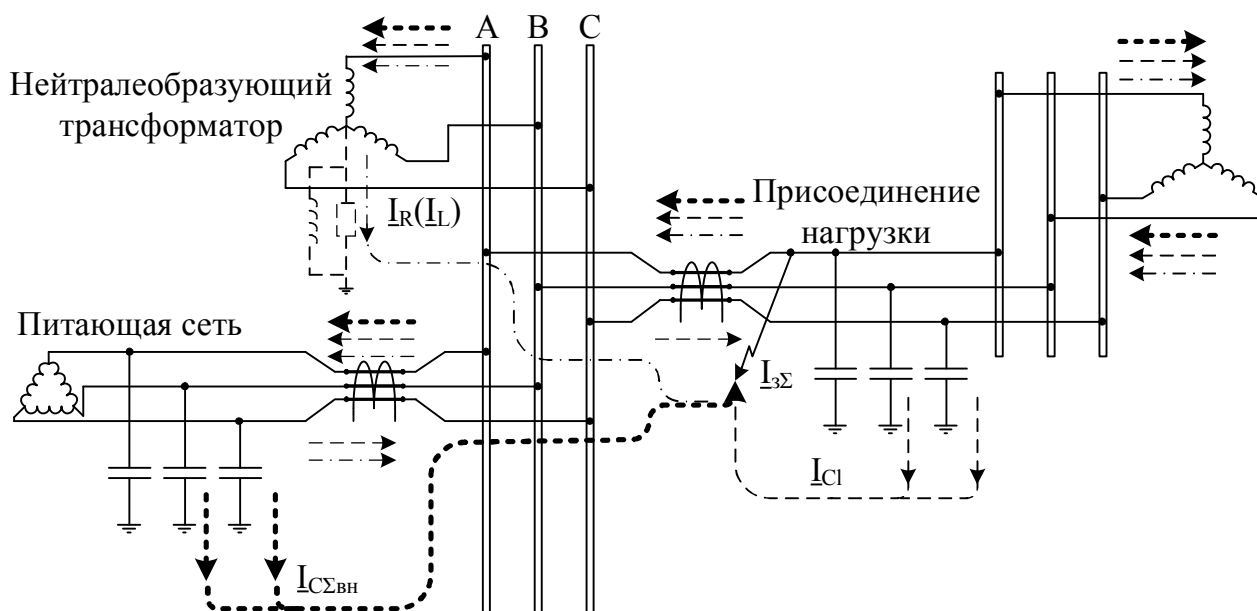


Рис. 5.2. Векторная диаграмма

В защиту неповреждённого присоединения, наоборот, попадает только ток нулевой последовательности, обусловленный собственной ёмкостью фаз

относительно земли. На рис. 5.1 это можно проследить по направлениям токов, обтекающих ТНПП присоединения, связывающего шины данной подстанции с питающей сетью.

На сравнении токов в защите при внутреннем и внешнем замыкании и основана селективность защит от ОЗЗ.

Металлическая броня силовых кабелей подлежит заземлению по обоим концам линии и, как следствие, является каналом протекания токов нулевой последовательности. При неправильном выполнении заземления брони нарушаются рассмотренные выше принципы действия защит. Это иллюстрируется рис. 5.3 и 5.4.

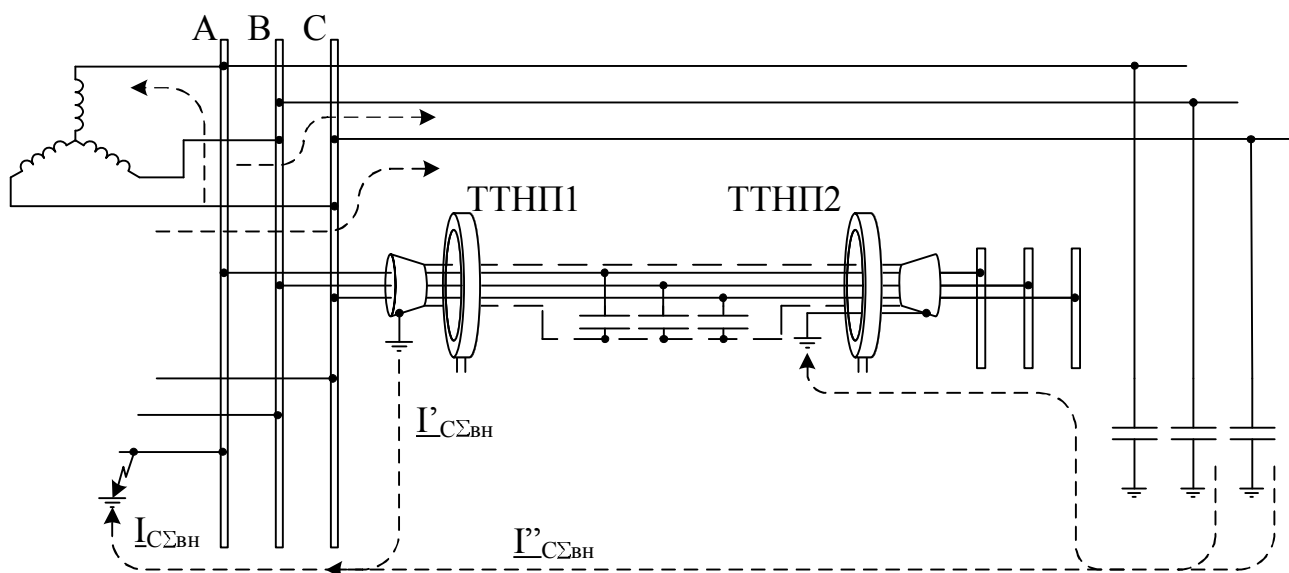


Рис. 5.3. Растекание тока по земле и по оболочке кабеля при внешнем замыкании и неверном заземлении оболочки одного из ТНПП

На рисунках показано неверное заземление брони кабеля при монтаже ТНП1. Кабель с металлической оболочкой проходит через окно ТНП1 и подключён к металлической воронке концевой муфты, которая заземлена.

Рис. 5.3 иллюстрирует возможность неселективного действия защит при внешнем замыкании (не на рассматриваемом кабеле). Ток  $3I_{0C}$  частично ( $I'_{C\Sigma BH}$ ) замыкается по броне кабеля и, проходя через окно ТНП1, трансформируется во вторичную обмотку. Это может вызвать неселективное действие защиты.

На рис. 5.4 показано распределение токов при внутреннем замыкании на

присоединении.

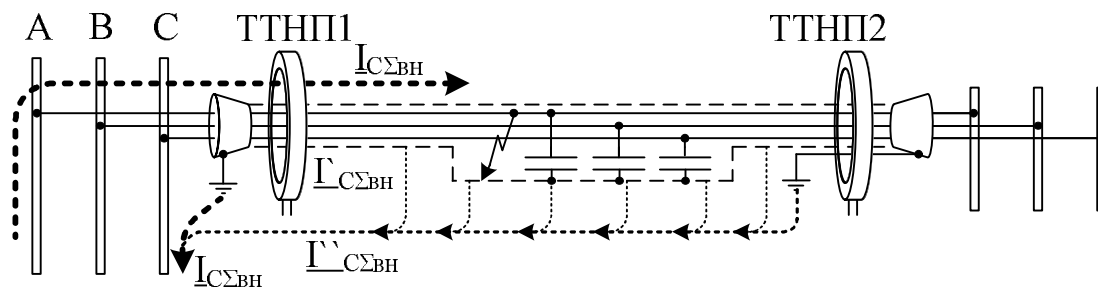


Рис. 5.4. Растекание тока по земле и по оболочке кабеля при внутреннем замыкании и неверном заземлении ТТНП1

Здесь ток, обусловленный ёмкостью внешней сети, проходя через окно ТТНП1, должен вызвать срабатывание защиты. Но часть этого тока ( $I'_{C\Sigma BH}$ ) проходит в место замыкания не через землю, а по броне кабеля, который проходит в окне ТТНП в обратном направлении, уменьшая тем самым рабочий сигнал. Это может привести к отказу в срабатывании защиты.

Для исключения подобных ситуаций при монтаже ТТНП необходимо придерживаться определённых правил заземления брони кабеля. При наличии у концевой муфты металлической воронки, соединённой с бронёй кабеля, необходимо воронку и броню изолировать от заземлённых частей на участке от ТТНП до воронки, а заземляющий проводник присоединить к воронке и пропустить через отверстие магнитопровода ТТНП в обратном направлении [80], как это показано на рис. 5.5, а.

Современные концевые муфты выполняются из изоляционного материала, и если кабель с металлической бронёй не проходит через ТТНП, то заземляющий проводник не следует пропускать через окно ТТНП. Этот случай показан на рис. 5.5, б.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок [81] присоединение металлических оболочек и брони кабеля к заземляющему устройству должно осуществляться медным проводником сечением не менее 6 мм<sup>2</sup>.

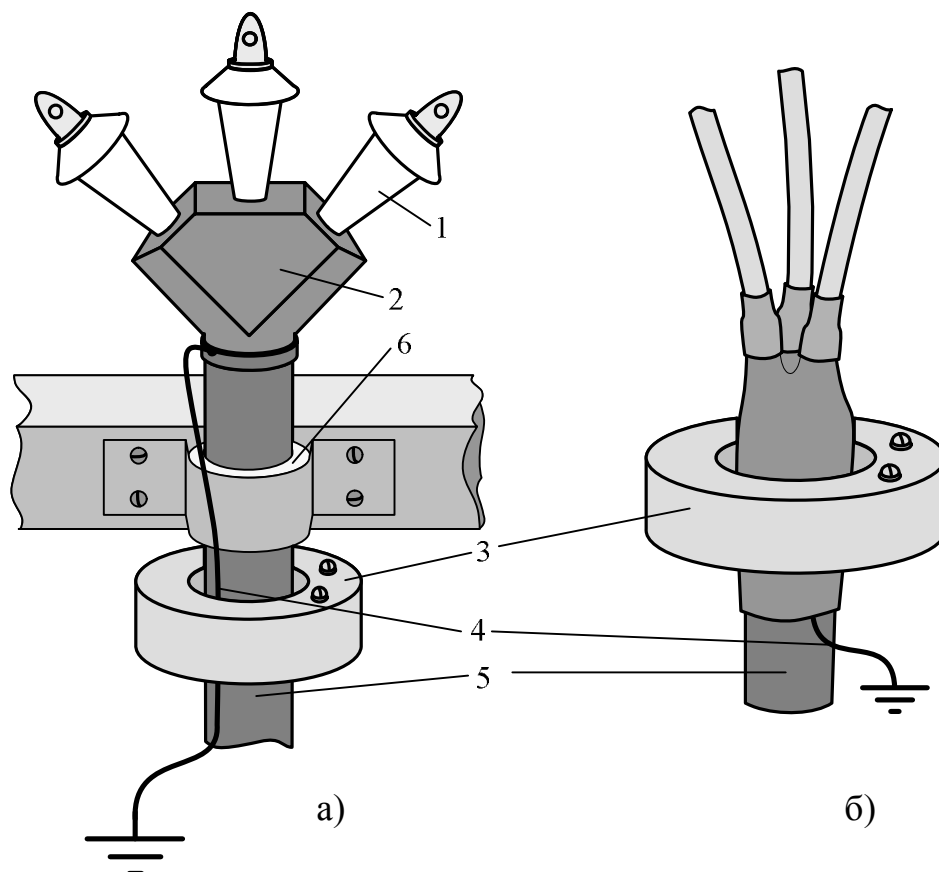


Рис. 5.5. Монтаж заземления оболочки кабеля: 1 – проходной изолятор; 2 – корпус муфты; 3 – ТТП; 4 – провод заземления; 5 – кабель; 6 – изоляция

В цепях вторичных обмоток трансформаторов тока (ТТ) предусматривается защитное заземление для обеспечения безопасности персонала в случае повреждения ТТ при перекрытии изоляции между первичной и вторичной обмотками. Согласно [81], вторичные цепи должны заземляться в одной точке на ближайшей от ТТ сборке зажимов либо на зажимах ТТ. Для защит, объединяющих несколько ТТ, заземление цепей производится также в одной точке [9] (рис. 5.6).

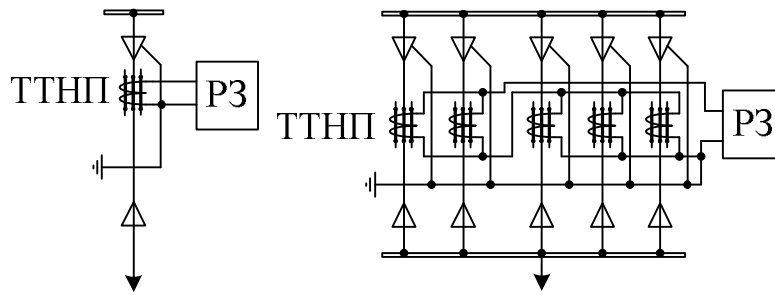


Рис. 5.6. Схемы соединения ТТНП и заземления их вторичных цепей при разном числе кабелей

## 5.2. Применение трёхтрансформаторных фильтров токов нулевой последовательности

Любая защита от замыкания на землю использует для своего функционирования информацию о токах нулевой последовательности в присоединениях. Эти токи, как было сказано выше, могут быть получены с помощью магнитного или электрического суммирования сигналов трёх фаз.

Основной проблемой для организации защит от замыканий на землю в сетях 35 кВ является сложность определения токов нулевой последовательности. Сети 35 кВ по большей части выполняются воздушными линиями электропередачи, следовательно, применение кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности для таких линий без применения кабельных вставок невозможно. Поэтому выделять ток НП необходимо электрическим сложением фазных токов. На каждой из фаз установлены трансформаторы тока, обычно такие трансформаторы бывают как встроенными в выключатели, например, С-35, так и отдельно стоящими. У каждого трансформатора тока имеется несколько обмоток, применяемых для различных целей. Для целей релейной защиты применяется обмотка 10Р, имеющая погрешность до 10%. Эта обмотка рассчитана для работы релейной защиты при токах превышающих номинальные токи. При погрешности трансформаторов тока 10%, ожидаемый небаланс может быть значительным. Например, при номинальном первичном токе 100 А, небаланс может достигать

10 А, что значительно больше ёмкостного тока сети ВЛ 35 кВ [82].

Стоит, однако, заметить, что замыкание на землю не вызывает сверхтоков, и трансформаторы тока продолжают работать в нормальном режиме, при токах не превышающих номинальные. А это значит, что вместо релейных вторичных обмоток трансформаторов тока, можно использовать вторичные обмотки для измерительных приборов и средств учёта с классом точности 0.5. Таким образом, при токе 100 А, небаланс может составить до 0.5 А, что может оказаться соизмеримым с ёмкостными токами воздушной линии электропередачи.

Значение погрешности трёхтрансформаторного фильтра нулевой последовательности равно погрешности составляющих его однофазных трансформаторов тока является максимальным. На практике такая погрешность оказывается значительно меньше [83]. Например, для трансформаторов ТФЗМ при номинальных токах 228 А, достигает 0,3 мА, что вполне приемлемо. Длина некоторых ВЛ составляет единицы километров, при зарядном токе 0,1 А/км, такая линия обычно даёт ток от 0,5 А, что с достаточным запасом превышает небаланс токов нулевой последовательности для трёхтрансформаторных фильтров токов.

Относительно меньшее значение небаланса вызвано тем, что погрешность отражает максимальное отклонение вторичного тока от первичного, приведённого через коэффициент трансформации ТТ ко вторичному. ТТ имеют одинаковую конструкцию, и электромагнитные процессы, обуславливающие погрешность в трансформаторах тока имеют одну и ту же природу, следовательно характеристики ТТ будут незначительно отличаться. И при суммировании окажется, что погрешность значительно меньше класса точности данного ТТ. Для подтверждения данных заключений был проведён эксперимент с тремя ТТ типа ТК-20 разного года выпуска. Получены вольтамперные характеристики (ВАХ) трёх ТТ (рис. 5.7), и по этим ВАХ определены вторичные токи и рассчитана сумма этих токов в нулевом поводе, при соединении ТТ в звезду (рис. 5.8).

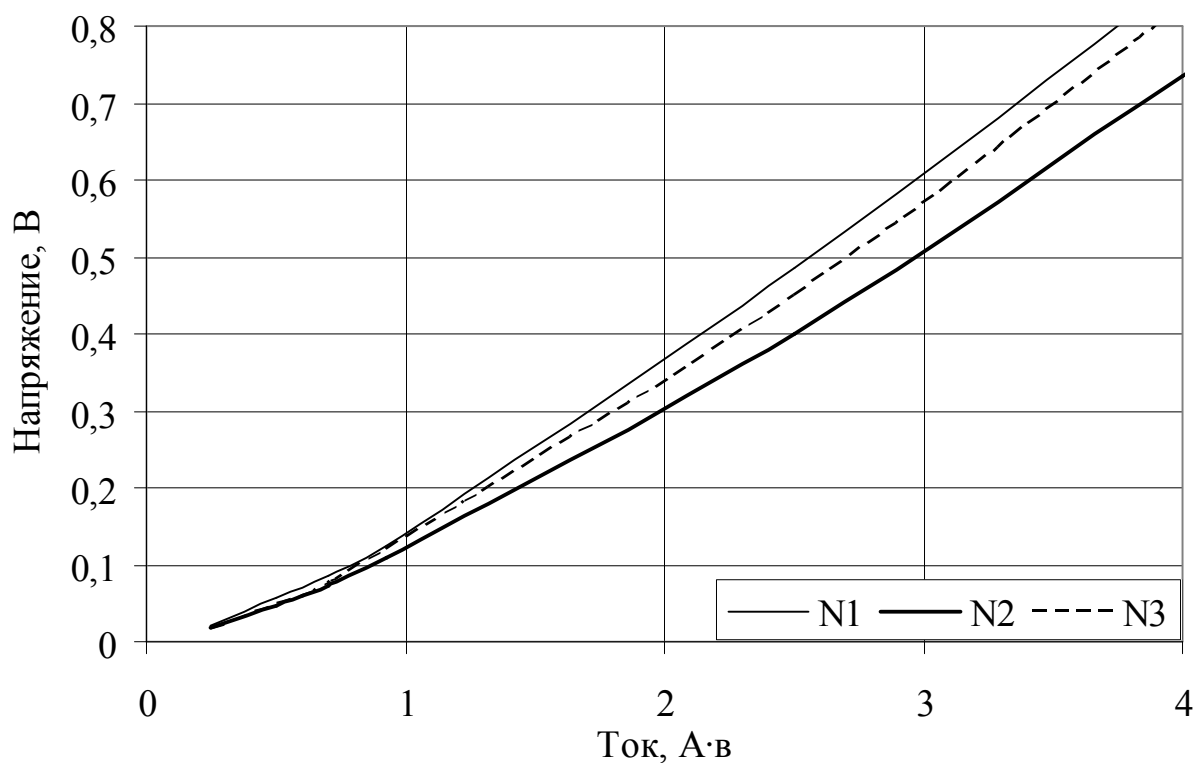


Рис. 5.7. Вольтамперные характеристики ТТ ТК20

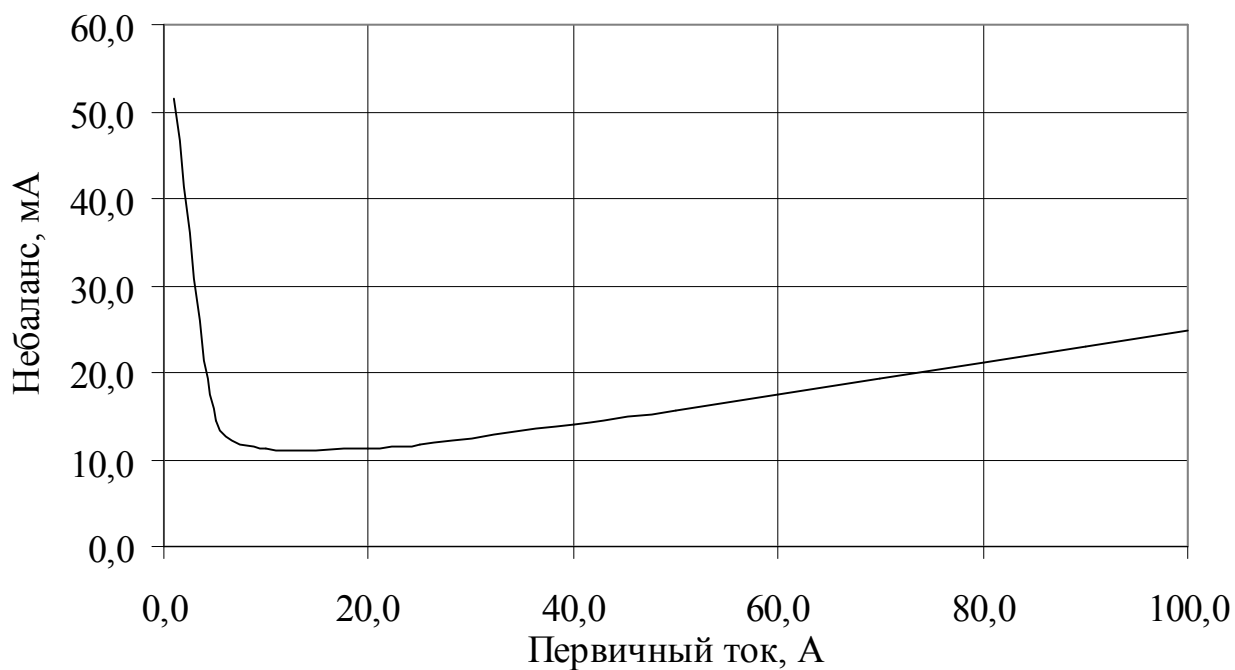


Рис. 5.8. Небаланс при суммировании трёхфазного тока

Для проверки правильности расчёта проведён эксперимент, в ходе которого был измерен небаланс при различных первичных токах и напряжениях. Нагрузка трансформатора тока составила 0,2 Ом, из которых 0,1



Ом составляло общее сопротивление в нулевом проводнике вторичных выводов трансформаторов тока, соединенных в звезду. На рис. 5.9 отражен полученный небаланс, приведённый к первичному току, в зависимости от первичного тока.

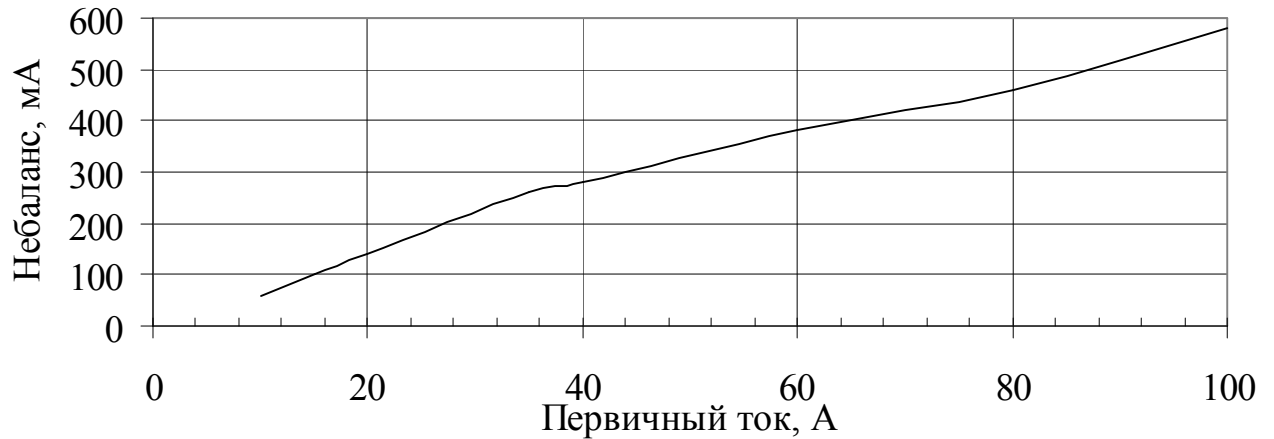


Рис. 5.9. Небаланс в нулевом проводнике ТТ ТК20

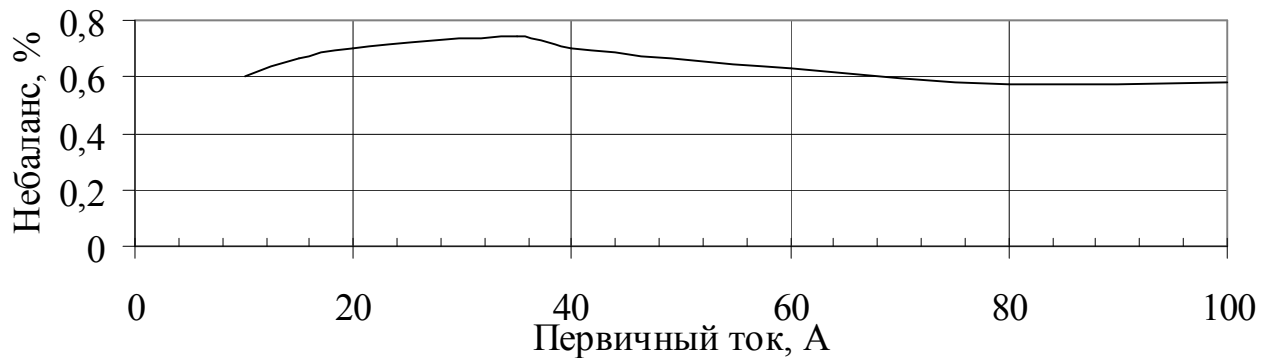


Рис. 5.10. Небаланс в нулевом проводнике, выраженный в процентах от первичного тока

В литературе [84] упоминается погрешность трёхтрансформаторных фильтров нулевой последовательности, как равная их классу точности. На рис. 5.10 отражён небаланс в трёхтрансформаторном фильтре, значение этого небаланса незначительно превосходит класс точности, что скорее связано с погрешностью измерений. Эта неточность обоснована сложностью измерения малых значений падения напряжения на нагрузке в 0.1 Ом.

Авторы [83] провели исследования на действующих подстанциях, и

определили значения небалансов для разных трансформаторов тока с классами точности 0.5 и Р. Для трансформаторов тока с классом точности 0.5 небаланс не превысил 0.1% от номинального тока. Однако для трансформаторов тока с классом точности Р, измеренный небаланс оказался выше, и составил 30% при токе равном 8% от номинального и снижается до 0.6% при токе равном 46% от номинального.

### **5.3. Опыт внедрения защиты от замыканий на землю в городских сетях 10 кВ г. Ханты-Мансийска**

Основные трудности, проявившиеся при внедрении защит от замыканий на землю в городских сетях, наверное, являются характерными для любых сетей напряжения 6-10 кВ. Они связаны, прежде всего, с традиционным отсутствием достаточного внимания к этим защитам. Так на многих присоединениях либо отсутствовали, либо не были подключены трансформаторы тока нулевой последовательности. На многих присоединениях было неправильно выполнено заземление экрана кабеля. Защита часто выполнялась на реле устаревшего типа - явно не способной удовлетворить ни селективности, ни чувствительности (например, на базе реле типа РТ-40/0,2). Там, где защита была выполнена, сигнал от нее не доводился до диспетчерской службы. В ряде случаев даже на РП, выполненных на современном импортном оборудовании, защита от ОЗЗ оказывалась недееспособной, так как предназначалась для работы в сетях с токами замыкания на землю в сотни ампер либо была неправильно настроена. Так, например, защита от ОЗЗ SPAC-800 выполнена ступенчатой с токами срабатывания на много превышающими токи ОЗЗ в отечественных сетях.

Работы по внедрению защиты от замыканий на землю в высоковольтных электрических сетях г. Ханты-Мансийска начались в 2000 году с установки заземляющих резисторов и направленных токовых защит нулевой последовательности на всех подстанциях, питающих городские электрические сети [85]. Токи замыкания на землю в то время составляли 30-40 А. В

соответствии с п.1.7.64 ПУЭ [81] в городских сетях с воздушными линиями релейная защита от ОЗЗ должна действовать на отключение. Это позволило использовать резисторы небольшой энергоёмкости, без затруднения размещаемые в типовых КРУ. В 2001 году в КРУ 10 кВ Ханты-Мансийской подстанции под руководством проф. Целебровского Ю.В. были проведены натурные испытания. Имитировалось дуговое перемежающееся замыкание при отсутствии резистора и при наличии резистора сопротивлением 500 Ом. Испытания показали, что при наличии резистора кратность перенапряжения не превысила 2, релейная защита действовала селективно [86].

С 2007 года на распределительных и трансформаторных подстанциях устанавливается современная и совершенная защита МКЗЗП. Первым комплектом такой защиты явилась МКЗЗП-32, охватывающая 32 присоединения. В последствии устанавливались новые модификации защиты, а именно МКЗЗП-М и МКЗЗП-ВЗ. Эти защиты имеют расширенные возможности, позволяют записывать осциллограммы. Защиты включают в себя все описанные в третьей главе алгоритмы, однако в условиях обширных кабельных сетей основным алгоритмом установлен логический алгоритм, хорошо работающий в сетях с большими токами замыкания на землю. В приложении 7 приведены протоколы производственных испытаний установленных защит.

В настоящее время защиты от замыканий на землю установлены на всех подстанциях. До оснащения защитами всех кабельных и воздушных ЛЭП защиты от ОЗЗ были выведены на сигнал. С 2008 года начался постепенный перевод защит с сигнализации о наличии замыкания на отключение присоединений. Токи замыкания на землю в сети за это время увеличились до 40-90 А. Селективность при ОЗЗ в сети обеспечивается по ступенчатому принципу, таким образом, защиты резервируют одна другую. Степень селективности между защитами разных уровней составляет 0.5 секунды.

За период 2005-2008 гг., когда практически все присоединения были оснащены селективными защитами, проводился регулярный анализ поведения

релейной защиты, действующей на сигнал. При этом оценивалась ее селективность и последующий способ устранения замыкания. Так выявленное ОЗЗ могло быть устранено дежурным персоналом - выездом его на соответствующую подстанцию (в среднем на это уходит около 1 ч). Замыкания переходили в двойные замыкания и устранялись защитой от КЗ до вмешательства дежурного персонала в 38% случаев. Диспетчерский персонал регистрировал только 3% самоликвидирующихся замыканий на землю, у которых время самоликвидации доходило до нескольких минут, а иногда и до десятков минут. Большой процент ОЗЗ переходящих в междуфазные КЗ объясняется действием защит на сигнал и лишь подтверждает необходимость селективного отключения ОЗЗ релейной защитой. Ведомость учета замыканий на землю приведена в приложении 6.

За три года наблюдений неселективного действия защиты, а также ее отказа, зафиксировано не было. Это укрепило уверенность руководства городских сетей в необходимости перевода защиты на отключение. Для реализации последнего потребовалось продолжить расширение высоковольтной сети городских сетей, обеспечивая надёжность резервирования, и повсеместное использование на РП и ТП устройств АВР. Начиная с весны 2008 года, начался постепенный перевод защит от ОЗЗ на РП и ТП городских сетей на отключение присоединений.

#### **5.4. Выводы по главе**

Анализ практики монтажа первичных цепей показал, что к неправильному функционированию защиты может привести неверный монтаж заземляющего проводника оболочки кабеля.

Для подстанций с воздушными линиями электропередачи организация защиты от замыканий на землю путем создания трёхтрансформаторных фильтров токов нулевой последовательности возможна на основе обмоток трансформаторов тока с классом точности 0.5 и выше.

Внедрение разработанных централизованных защит от замыканий на

землю в кабельных сетях 10 кВ г. Ханты-Мансийска и их надёжная работа в течение года позволили перейти к отключению ОЗЗ с минимальными выдержками времени, заданными по ступенчатому принципу резервирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана математическая модель сети 6-35 кВ, позволяющая получать динамические характеристики токов и напряжений нулевой последовательности при однофазных замыканиях в моделируемой сети. Достоверность получаемых результатов доказана сравнением расчётных характеристик с динамическими характеристиками процессов, полученных экспериментально. Результаты математического моделирования в виде полученных сигналов токов и напряжений нулевой последовательности использовались при создании алгоритмов централизованных микропроцессорных защит от ОДЗ. Модель может быть использована и для анализа работ других видов защит и режимов сети.

2. Показано, что разнообразие переходных процессов при дуговых замыканиях на землю и отличия в характеристиках токов и напряжений при различных местах замыкания в электрической сети не позволяют обеспечить надёжность работы защиты по одному алгоритму. В диссертации рассмотрены три алгоритма:

– Алгоритм относительного замера с геометрическим суммированием токов НП. Его суть состоит в одновременном сравнении значений всех токов НП присоединений; максимальный ток будет в повреждённом присоединении. Этот алгоритм применим на головных подстанциях 6-35 кВ, для которых отношение ёмкостного тока одного присоединения к току замыкания на землю превышает 0,1 и при этом действующее значение тока замыкания на землю должно превышать максимальный ток НП присоединений более чем на 44%.

– Предложенный логический алгоритм позволяет определить место повреждения по числу сработавших пусковых органов, установленных на каждом присоединении секции. Уставка пусковых органов отстраивается от максимального собственного тока НП присоединения и от минимального тока замыкания в сети при металлическом замыкании на землю. Автоматическое

изменение тока срабатывания ПО обеспечивает стабильную работу защиты при замыканиях через переходные сопротивления.

– Предложенный фазный алгоритм основан на вычислении условного угла между токами. Анализ погрешностей преобразования сигналов тока по предложенному алгоритму показал, что предельная ошибка определения условного угла при дуговом замыкании на землю не превышает диапазон определения углов, что позволяет оценить направление токов и выявить поврежденное присоединение.

3. Алгоритмы прошли апробацию на трех этапах:

- расчётная проверка с использованием математической модели сети;
- расчётно-экспериментальная проверка на основании реальных осциллограмм, снятых при ОЗЗ в действующих сетях 10 кВ;
- опытно-промышленная проверка образцов централизованных защит, использующих созданные алгоритмы.

4. Для обеспечения надёжной работы защиты при любых местах и видах однофазных замыканий на землю разработаны варианты комбинированного алгоритма, обеспечивающие выбор соответствующего алгоритма в зависимости от режима работы и топологии сети в момент замыкания.

5. Проведён мониторинг помех на подстанциях 10 кВ, который показал, что помехи в основном не превышают испытательных уровней, определяемых требованиями к помехоустойчивости технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях среднего напряжения. Применительно к РУ 10 кВ экспериментально определена степень снижения уровня помех при использовании витой пары в качестве контрольного кабеля, заземлении токоведущей жилы в одной точке и переносе устройств сопряжения непосредственно к месту установки защиты.

6. Для обеспечения надёжной работы защиты ВЛ с применением трёхтрансформаторных фильтров нулевой последовательности исследованы вольтамперные характеристики трансформаторов тока. Показано, что из-за разницы в характеристиках ТТ погрешность трёхтрансформаторного фильтра может быть сравнима со вторичными токами нулевой последовательности при ОДЗ в электрической сети. Надёжная работа защиты с предложенными алгоритмами обеспечивается применением в трёхтрансформаторных фильтрах трансформаторов тока с классом точности не ниже 0.5.

7. Результаты диссертационной работы были использованы при разработке в НГТУ микропроцессорной защиты от замыканий на землю типа МКЗЗП. Эта защита после разработки и создания внедрена в городской сети 10 кВ г. Ханты-Мансийска.

Годичный опыт эксплуатации показал надёжность функционирования защиты, что позволило перейти к селективному отключению однофазных замыканий, и в целом снизило число и последствия аварийных ситуаций в городской сети г. Ханты-Мансийска.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? / Боков Г. // Новости ЭлектроТехники. – 2002. – № 2 (14).
2. Целебровский Ю.В., Берёзов Ю.И., Снисаренко А.В., Филиппов А.В. Опыт эксплуатации электрических сетей напряжением 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали / Энергетика Тюменского региона. № 3, 2003. С.23-25.
3. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. (Библиотечка электротехника). - М: НТФ "Энергопрогресс", 2001,-Вып.11(35).-104с.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / М-во топлива и энергетики РФ, РАО «ЕЭС России»: РД 34.20.501-95. – 15-е изд. перераб. и доп. – М.; СПО ОРГРЭС, 1996. – 160 с.
5. Правила эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор Минтопэнерго РФ. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1992. – 288 с.
6. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик, - 2000.-№1.-С.20-22.
7. Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них / К.П. Кадомская, Ю.А. Лавров, А.А. Рейхердт // Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2004. - 368 с.
8. Качесов В. Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях / В. Е. Качесов, В.Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // Электрические станции, №8, 2002, с. 38-45.
9. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.: ил.

10. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учебник / В.А. Андреев - М.: Высшая школа, 1991. - 496 с.
11. Кискачи В.М. Селективная сигнализация замыканий на землю с использованием высших гармоник / В.М. Кискачи // Электричество. 1967, №9. С.24-29.
12. Бухтояров В.Ф., Маврицын А.М. Защита от замыканий на землю электроустановок карьеров. -М.: Недра, 1986,- 184 с.
13. Лихачёв Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов, М.: Энергия, 1971.-152 с.
14. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. -М.:Энергоатомиздат, 1992.-528 с.
15. Захаркин И.В. Об опыте наладки реле тока РТЗ-51 //Промышленная энергетика. -1989. - № 3. -С. 24-25.
16. Нудельман Т.С., Шевелев В.С. Избирательная защита от замыканий на землю для распределительных сетей 6-35 кВ // Энергетик. - 2001. - № 3. -С. 32-33.
17. Олейник С.И., Сафарбаков А.А. Защита от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ с компенсированной нейтралью, реагирующая на активную составляющую//Электрические станции. 2002. -№ 3, -С. 60-62.
18. Шалин А.И., Политов Е.Н. Защита от замыканий на землю, реагирующая на сопротивление и проводимость цепей нулевой последовательности // Электроэнергетика: Сб, науч. трудов. Часть 1 / Под ред. А.И. Шалина. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - С. 74-84.
19. Корниенко Е.Ф. Защита компенсированных сетей напряжением 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю // Электрические станции. - 1967. - № 7. -С. 67-70.
20. Централизованная сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях с использованием наложенного тока второй гармоники // И.М. Сирота, А.Е. Богаченко А.П. Шаповал и др. Автоматизация и релейная защита энергетических систем. Киев, 1981.

21. Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 151 с.
22. О параметрических методах локализации однофазных замыканий в распределительных сетях / Л. В. Богдасева, В. Е. Качесов // Научный Вестник НГТУ №3 (24), НГТУ, Новосибирск, 2006.
23. Лачугин В.Ф. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю воздушным и кабельных сетей с компенсированной нейтралью // Электрические станции, -2005.-№ 8. -С 58-63.
24. Вайнштейн Р.А. Головки С.И. О гармоническом составе токов нулевой последовательности в сетях с компенсацией ёмкостных токов при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу // Известия вузов. Энергетика. - 1978.-№ 12-С. 14-19.
25. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6 – 10 кВ / Р.А., Вайнштейн, С.И., Головки, В.С. Григорьев и др. // Электрические станции. 1998. № 7. С. 26 - 30.
26. Головки С.И., Вайнштейн Р.А., Юдин С.М., Селективная сигнализация однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 30, 35 кВ // Электрические станции. - 2000. - № 7. - С. 33-36.
27. Шалин А.И., Щеглов А.И. Концепция релейной защиты от замыканий на землю в сетях 35 кВ с резистивно-заземленной нейтралью // Режимы заземления нейтралей сетей 3-6-10-35 кВ: Доклады научно-технической конференции. - Новосибирск: ГЦРО, 2000. -С. 149-160.
28. Ветров В.И., Ерушин В.П., Тимофеев И.П. и др. Централизованная защита присоединений секций сборных шин от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью // Электроэнергетика: С5. науч. трудов. Часть I / Под ред. А. И. Шалина. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - С. 95-104.
29. Вайнштейн В.Л., Мохов В.Н. Комплект сигнализации замыканий на землю типа КСЗТ-1 // Энергетик. - 1980. - № 3. - С. 27-28.
30. Устройство микроконтроллерное для защиты присоединений секций

сборных шин от замыканий на землю в сетях с компенсированной нейтралью МКЗЗП - К / Руководство по эксплуатации 3.630.009РЭ.- Новосибирск, 2005 г.

31. Поляков В.Б., Бухтояров В.Ф. Централизованная защита от замыканий на землю с параллельной индикацией наибольшего вектора тока, - Мл ГОСИНТИ, 1968, - № 9-68-1106/120. - 11 с.

32. Микропроцессорный терминал определения поврежденного фидера при однофазном замыкании на землю в сетях 6-35 кВ «БРЕСЛЕР-0107.080» / Руководство по эксплуатации БРС-07.080.02К-Д002: Чебоксары, 2009.

33. Бухтояров В.Ф. Комплексное защитное устройство для сетей 6-35 кВ с самоконтролем исправности // Известия вузов. Электромеханика. - 1979. -№9.- С. 840-842.

34. Устройство микроконтроллерное для защиты присоединений секций сборных шин от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью МКЗЗП - М / Руководство по эксплуатации 3.630.009РЭ. – Новосибирск, 2007 г.

35. Невнимание к проблеме ЭМС может обернуться катастрофой / Борисов Р. // Новости ЭлектроТехники. – 2001. – № 6 (12).

36. ЭМС - вечный двигатель проблем / Друбич Д. // Энергетика и промышленность России. – 2002. – № 12 (28).

37. ГОСТ Р 51317.4.1–4.5-2007 Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость.

38. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.

39. РД 153-34.0-35.648-01 Рекомендации по модернизации, реконструкции и замене длительно эксплуатирующихся устройств релейной защиты и электроавтоматики энергосистем.

40. РД 153-34.1-35.137-00 Технические требования к подсистеме технологических защит, выполненных на базе микропроцессорной техники.

41. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 Совместимость технических средств

электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.

42. СТО 56947007-29.240.044-2010 Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства.

43. СТО 56947007-29.240.043-2010 Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов.

44. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. /Под редакцией А.Ф. Дьякова.– М.: Энергоатомиздат, 2003.–768 с.

45. Хромов Е.Г., Садовская Л.В., Палагушкин Б.В., Кислицын Е.Ю. Наводимые напряжения на кабельных линиях и электронном оборудовании АСУ ТП подстанций и рекомендуемые меры защиты // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Омского гос. ун\_та путей сообщения. – Омск, 2007. – С. 27–32.

46. Борисов Р. К., Смирнов М.Н., Арцишевский Я. Л., Жуков А.В. Характерные особенности ЭМО действующих энергообъектов при внедрении микропроцессорных устройств РЗА. «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2002», М., ЕЭС России, 2002, с. 157 – 162.

47. Шабад М.А. Обзор режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ России //Энергетик. -1999. -№ 3, - С 11-13.

48. Ульянов С.А., Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов, «Энергия», 1970.

49. Теоретические основы электротехники. [В 3 т.] . Т. 2 : учебник для вузов / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.; Питер, 2003. – 575 с.; ил.

50. Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для

вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.; Питер, 2007. – 349 с. ил.

51. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: Учебное пособие. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 254 с.

52. Типовая инструкция по компенсации ёмкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87).

53. Лурье А.И., Панибратец А.Н., Зенова В.П. и др. Серия нейтралеров типа ФМЗО для работы с управляемыми подмагничиванием дугогасящими реакторами серии РУОМ в распределительных сетях с изолированной нейтралью // Электротехника. – 2003. – №1.

54. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. / Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

55. J.R. Carson. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. Bell System Technical Journal, vol. 5:pp. 539-554, 1926.

56. C. Dubanton, "Calcul approche des parametres primaires et secondaires d'une ligne de transport – Valeurs homopolaires", E. D. F., Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches No. 1, sere B, 1969.

57. L.M. Wedepohl and D.J. Wilcox. Transient analysis of underground power-transmission systems; System-model and wave-propagation characteristics. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 120 No. 2:pp. 253–260, February 1973.

58. F. Pollaczek. Uber das Feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen Einfach-leitung. Elektrische Nachrichtentechnik (E.N.T.), Heft 9 Band 3:pp. 339-360, 1926.

59. Кандаков С.А. Определение погонных продольных параметров воздушных и подземных линий электропередач на основе расчета электромагнитного поля. // Сборник научных трудов НГТУ. - Новосибирск, 2005. - 2(40). - С.73-78.

60. Теоретические основы электротехники. [В 3 т.] . Т. 3 : учебник для вузов / К. С. Демирчян и др. – СПб.; Питер, 2004. – 376 с.; ил.

61. Однофазные кабели 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена / Г. Евдокунин, М. Дмитриев // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 5 (47).
62. Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей высокого напряжения. – 2009. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ruscable.net/doc/analytic/statya-191.html> (дата обращения 18.06.2010).
63. Евдокунин Г. А., Титенков С. С. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35кВ. - СПб: Издательство Терция, 2004.- 188стр., ил.
64. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ. Расчет заземления экранов / Г.А. Евдокунин, М.Д. Холодный // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 2 (44)
65. Режимы нейтрали электрических сетей / Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. – Киев: Наук. думка, 1985.–264с.
66. Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в электрических сетях высокого и среднего напряжений : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.12 / О. И. Лаптев ; науч. рук. К. П. Кадомская ; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск , 2007, 246 с.
67. Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ: Монография / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1993. – 158 с.
68. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / Сирота И.М. – Киев: Наук. думка, 1983. – 268 с.
69. ГОСТ 7746-01. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Введён в действие 01.01.2003.
70. Афанасьев В.В., Адоньев Н.М., Кибель В.М., Сирота И.М., Стогний Б.С. Трансформаторы тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
71. Кабельные трансформаторы тока. Способы улучшения характеристик / Шалин А., Дехтерев А. // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 6 (48).
72. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Особенности применения / Шалин А.И. // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 6 (36).
73. R. Folkers, “Determine Current Transformer Suitability Using EMTP

Models”, Schweitzer Engineering Laboratories, 26th Western Protective Relay Conference, Oct. 26–28, 1999, Pullman, WA.

74. Распознавание однофазного дугового замыкания на землю и поврежденной фазы в сетях с изолированной нейтралью / Л. В. Квривишвили, В. Е. Качесов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока, №1, 2008, с. 94-98.

75. Горюнов В. А. Алгоритмы функционирования централизованной защиты от замыканий на землю в сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью / В. А. Горюнов, В. П. Ерушин, И. П. Тимофеев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2009. – Специальный выпуск №1. – С.151-155.

76. Горюнов В. А. Учет фазы токов при построении алгоритмов централизованной защиты от замыканий на землю / В. А. Горюнов // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 34-36.

77. ГОСТ Р 50397-92 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Введён в действие 01.07.1993.

78. Г. Отт, Методы подавления шумов и помех в электронных системах, пер. с англ. Б.Н. Бронина, изд.: Мир, М. 1979 г., 313 с.

79. Горюнов В. А. Защиты от замыканий на землю в сетях 6(10) кВ. Особенности монтажа трансформаторов тока нулевой последовательности / В. А. Горюнов, А. И. Щеглов // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 5 (53) - С.68-70 .

80. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов/ В.А. Андреев. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 639 с.: ил.

81. Правила устройства электроустановок. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2006. – 854 с., ил.



82. Ширковец А., Сарин Л., Ильиных М., Подъячев В., Шалин А. Резистивное заземление нейтрали в сетях 6-35 кВ с СПЭ-кабелями // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 2(50) – С. 34–40.

83. Виштибеев В.И., Виштибеев А.В., Дубровский В.В., К вопросу об учете токов небаланса при выборе уставок токовых защит от ОЗЗ // Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6 –35 кВ. Труды Второй Всероссийской научно-технической конференции. - Новосибирск, 2002.- С. 81 – 83.

84. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / Сирота И.М. – Киев: Наук. думка, 1983. – 268 с.

85. Горюнов В. А. Опыт внедрения защиты от замыканий на землю в городских сетях 10 кВ г.Ханты-Мансийска / В. А. Горюнов, С.П. Кузнецов, А. И. Щеглов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГ АВТ, 2008.– Специальный выпуск №1.–С.111-113.

86. Анализ осциллограмм токов и напряжений при однофазных дуговых замыканиях в сети 10 кВ с резистивным заземлением нейтрали /С.В. Нестеров, А.И. Щеглов, Ю.В. Целебровский // Сб. тр. второй всероссийской научн.-техн. конф. «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ. - Новосибирск, 2002. -С. 127-131.

**ТИПЫ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

## Классификация устройств по типам индивидуальных защит

Тип защиты	Устройства
<b>• Защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на составляющие электрических величин промышленной частоты</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Общая неселективная защита по напряжению нулевой последовательности</li> </ul>	Реле напряжения РН-53 и подобные.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Токовая защита нулевой последовательности</li> </ul>	Устройства: электромеханические реле (например, РТ 40/0,2); устройства защиты, выполненные на микросхемах среднего уровня интеграции (например, реле РТЗ-50, РТЗ-51); микропроцессорные терминалы защиты (БМРЗ НТЦ «Механотроника», SEPAM типа S20, S40, S80 фирмы Schneider Electric, защиты серии REF фирмы ABB, устройства типа «Сириус» ЗАО «РАДИУС Автоматика», устройства типа ТЭПМ 2501 ОАО «ВНИИР», устройства типа MiCOM серии P120 фирмы AREVA, защита типа SIPROTEC 4 7SJ61 фирмы SIEMENS и другие).
<ul style="list-style-type: none"> <li>Токовая защита нулевой последовательности с обратозависимой времятоковой характеристикой [16]</li> </ul>	Защиты серии SPACOM фирмы ABB.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Направленные токовые защиты нулевой последовательности</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Защиты, реагирующие на направление мощности нулевой последовательности в установившемся режиме</li> </ul>	Реле типа ЗЗП-1М (заменило устаревшее ЗЗП-1, выпускается Чебоксарским электроаппаратным заводом (ЧЭАЗ) по разработке ВНИИЭ), реле типа РЗН и его усовершенствованные варианты РЗН-2 и РЗН-3, ЗЗКС, УЗЗН, СРЗ-2, РИС-Э2М, НЗЗИ, НЗЗИ-6, ПНДФ, МТР-77, УЗИ и другие [6]. Современные аналоги: реле защиты типа «ЗЕРО», производимое компанией «Объединённая энергия» (г. Москва), устройства типа «Сириус» (например, Сириус-МЛ, Сириус-2-МЛ) ЗАО «РАДИУС Автоматика», терминалы защиты SEPAM включающие блоки 67N/67NC фирмы Schneider Electric, микропроцессорная защита БМРЗ НТЦ «Механотроника», защиты серии MiCOM фирмы AREVA, защиты серии SPACOM фирмы ABB, микропроцессорная защита МКЗЗП производства НГТУ (г. Новосибирск), реле типа ЗЗН (ЧЭАЗ) и другие.

2) Защиты, реагирующие на активную мощность нулевой последовательности в установившемся режиме [17, 19]	терминалы защиты SEPAM серии S40 и S80 (код 67N/67NC), устройства типа MiCOM P125, P126, P127 (код 32N) фирмы AREVA.
3) Защиты, выполненные на принципе компенсации собственных ёмкостных токов [19]	
● <b>Защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на высшие гармоники электрических величин</b>	УСЗ-2/2 (ЧЭАЗ) [3], SPACOM фирмы ABB и «Сириус» (например, модели Сириус-Л, Сириус-2-Л, Сириус-МЛ, Сириус-2-МЛ), выпускаемые ЗАО «РАДИУС Автоматика».
● <b>Защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на электрические величины переходного процесса</b>	Автономные устройства направленной волновой защиты типа ИЗС (ИЗС-М) и УЗС-01, разработанные ЭНИН [3], автономное устройство направленной защиты типа КЗЗП, разработанное в Донецком политехническом институте, и его микроэлектронный аналог - устройство типа ПЗЗМ, разработанное предприятием НТБЭ (г. Екатеринбург), автономное устройство направленной защиты типа «Спектр», выполненное на микроэлектронной элементной базе [6].
● <b>Защиты от однофазных замыканий на землю, реагирующие на наложенный ток [3]</b>	
Защиты, реагирующие на наложенный ток частотой выше промышленной	
Защиты, реагирующие на наложенный ток частотой ниже промышленной	Устройство типа УСЗК-6,25, реагирующее на ток частотой 6,25 Гц (Донецкий политехнический институт), устройства типа ЗЗС (разработаны в Томском политехническом университете под руководством Р.А. Вайнштейна и основаны на использовании наложенного (контрольного) тока с частотой 25 Гц): ЗЗСГ-4, ЗЗС-5.

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ  
РАСШИФРОВКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ  
ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ТИПА МКЗЗП**

Все разработанные алгоритмы применены в микропроцессорной защите централизованного типа МКЗЗП, разработанной на кафедре ЭлСт НГТУ. Одним из преимуществ использования современных сигнальных процессоров является возможность записи осциллограмм токов и напряжений в момент замыкания с предысторией. После внедрения комплектов этой защиты на действующие объекты электроэнергетики появилась возможность собирать данные о различных режимах ОЗЗ в кабельных сетях. Для анализа большого числа осциллограмм потребовалась разработка специального программного обеспечения.

При работе защита создает отдельные информационные файлы, содержащие протоколы событий, протоколы срабатывания защиты и сами осциллограммы. По протоколам событий можно проанализировать продолжительность ОЗЗ в том случае, если защита действовала на сигнал, так как защита фиксирует срабатывание и возврат пускового органа по напряжению нулевой последовательности. В протоколах защиты содержится результирующая информация по срабатыванию защиты: значения токов и напряжений, время срабатывания, выявленное поврежденное присоединение (рис. П2.1).

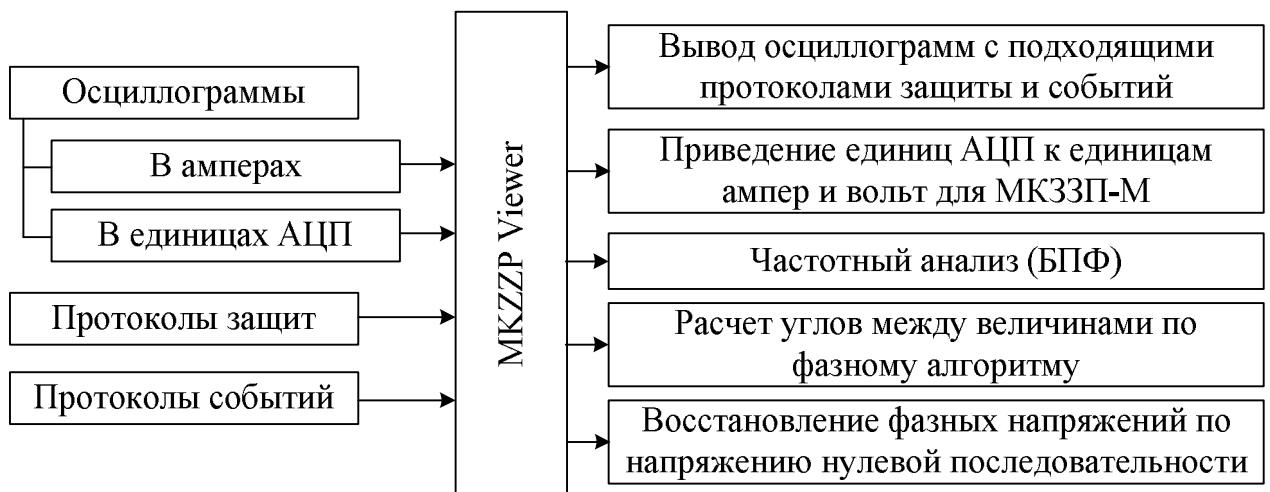


Рис. П2.1. Блок-схема программы

Для просмотра осциллограмм без дополнительного преобразования автором была создана программа «MKZZP Viewer». Данная программа позволяет строить осциллограммы сигналов как в амперах и вольтах, так и в

единицах АЦП с преобразованием последних к амперам и вольтам при необходимости. Одновременно с загрузкой осциллограммы программа загружает протоколы событий и защиты при их наличии и в информационную панель добавляет соответствующую информацию из этих протоколов. Для частотного анализа осциллограмм имеется специальный раздел, где можно провести быстрое преобразование Фурье, изменяя ширину, положение и тип окна преобразования (рис. П2.2).

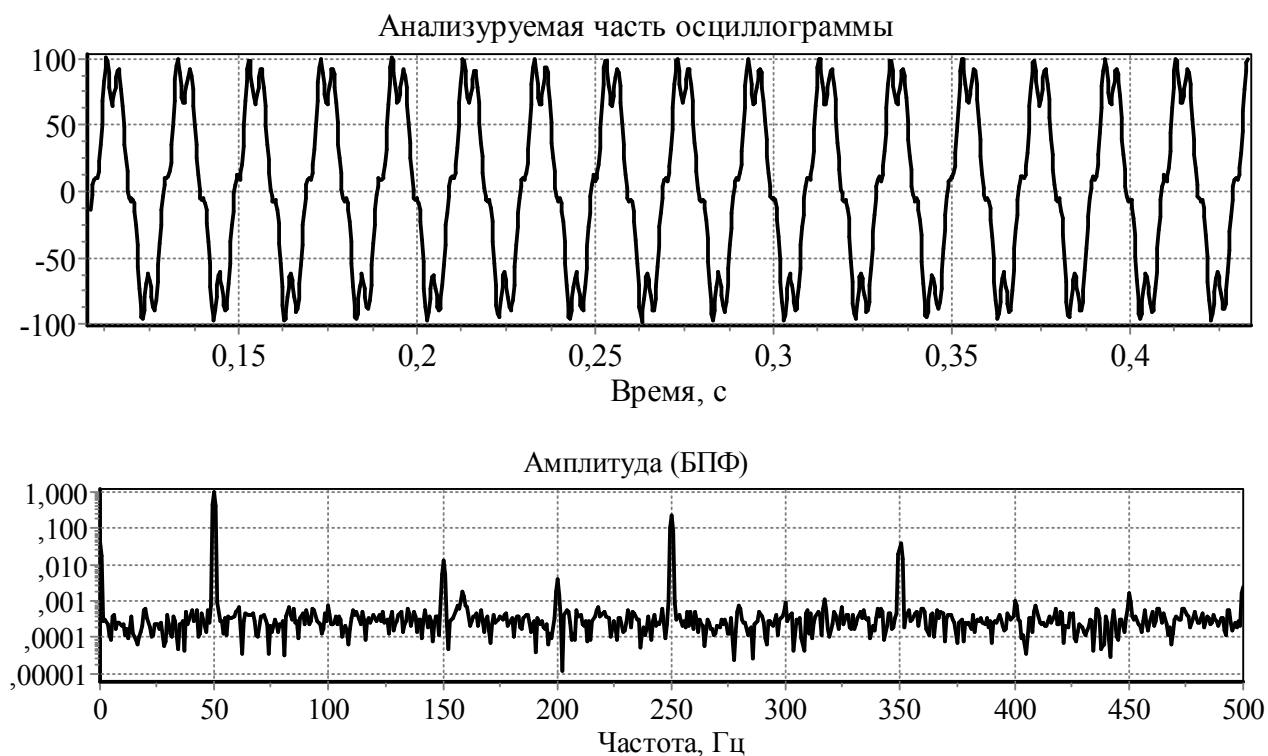


Рис. П2.2. Частотный анализ осциллограммы тока

Основной проблемой направленных алгоритмов являются их неправильные действия при перемежающихся замыканиях. Поэтому в программу был введён раздел для анализа направления между токами и напряжениями по принципу, описанному в третьей главе и реализованному в МКЗЗП.

**АНАЛИЗ ОСЦИЛЛОГРАММ ПО ВИДУ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ И  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА ЗАМЫКАНИЙ**



В ходе внедрения защиты были получены осциллограммы замыканий на землю в кабельной сети 10 кВ. Для проведения статистики, все осциллограммы были разделены на 5 типов:

- металлическое замыкание;
- дуговые замыкания трех типов;
- самоустранившееся замыкание.

Для металлического замыкания характерно напряжение нулевой последовательности, имеющее практически идеальную синусоидальную форму (рис. ПЗ.1).

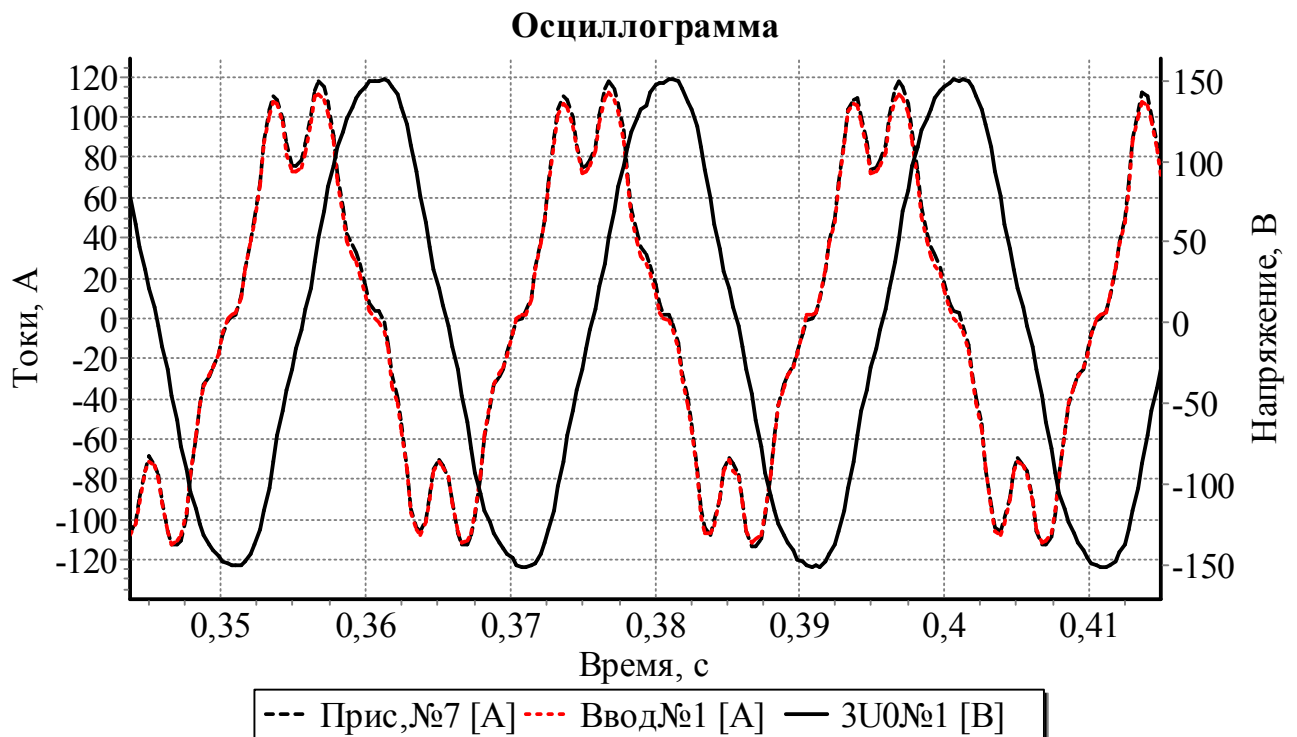


Рис. ПЗ.1. Осциллограмма характерного металлического замыкания на землю

Анализ осциллограмм позволяет разделить дуговые замыкания на 3 типа, отличающиеся между собой по числу зажигания дуги за период промышленной частоты:

1 тип – преимущественно 2 зажигания дуги за период (по теории Петерсена [13]);

2 тип – преимущественно 4 зажигания дуги за период;

3 тип – многократные зажигания дуги за период.

Характерный вид этих замыканий приведен на соответствующих

рисунках ПЗ.2, ПЗ.3 и ПЗ.4.

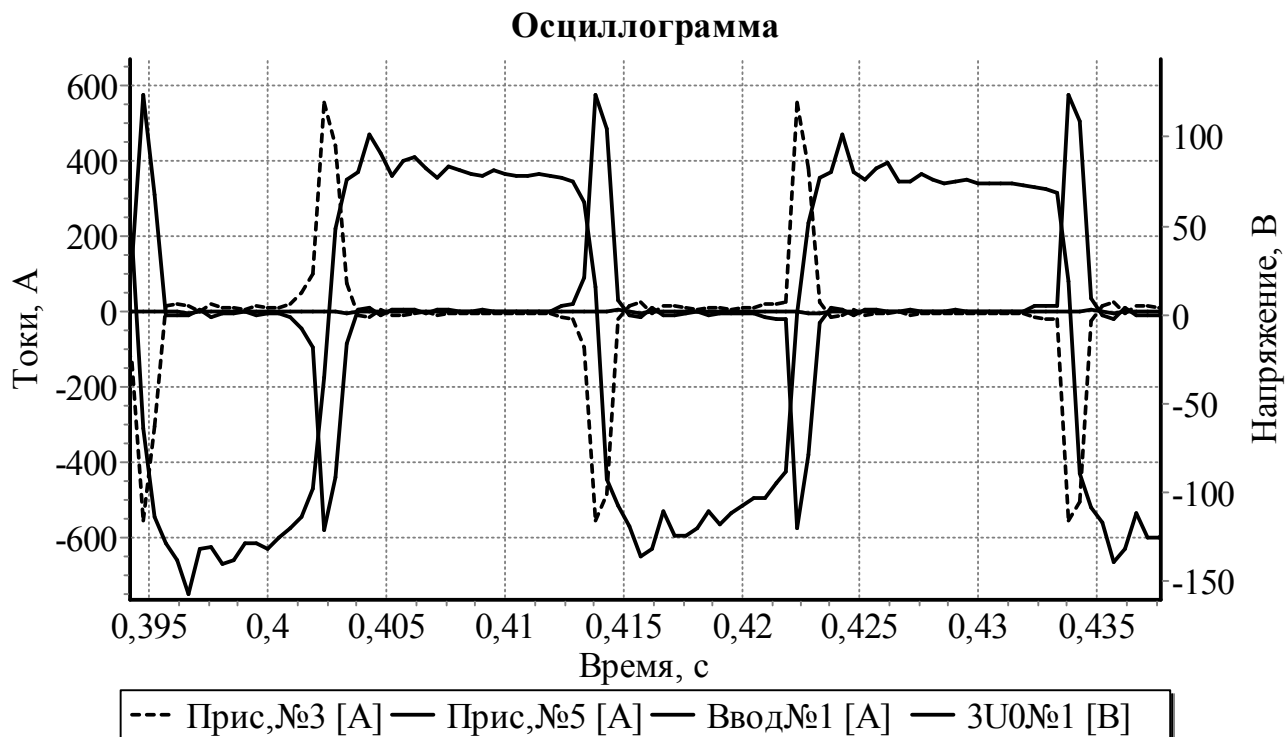


Рис. ПЗ.2. Осциллограмма характерного дугового замыкания на землю 1 типа

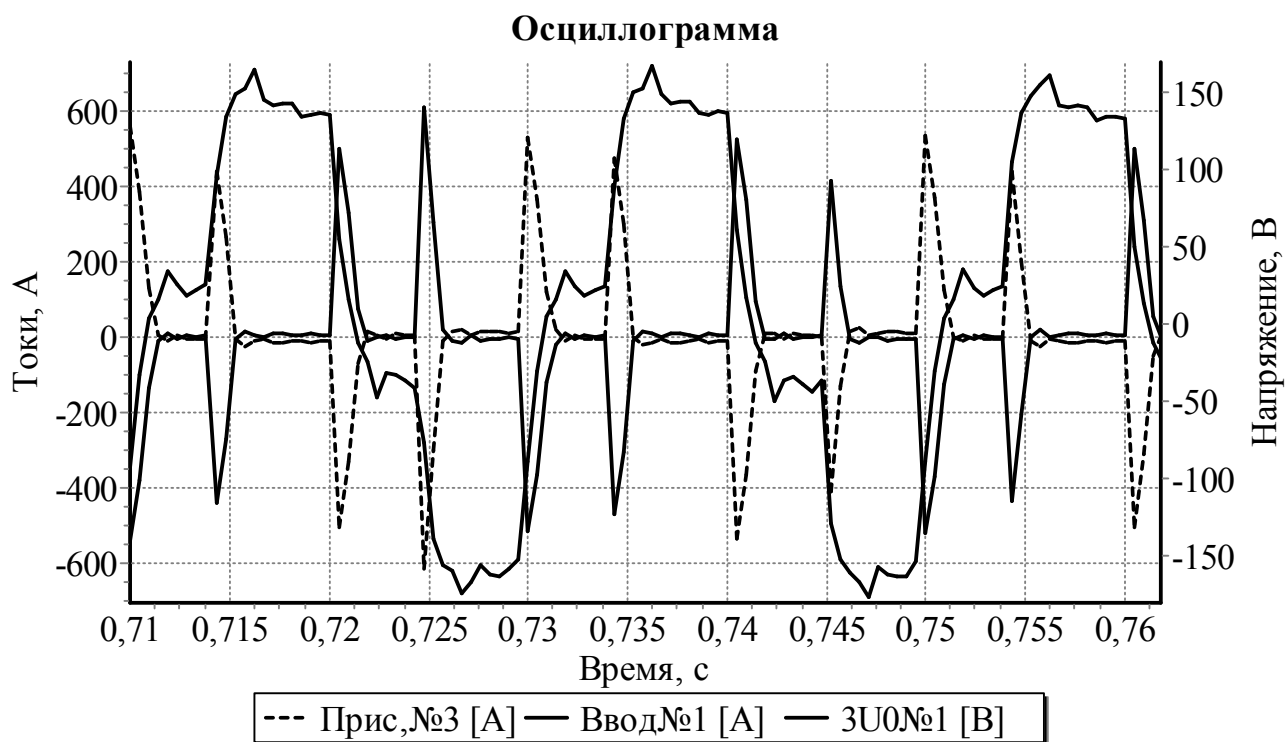


Рис. ПЗ.3. Осциллограмма характерного дугового замыкания на землю 2 типа

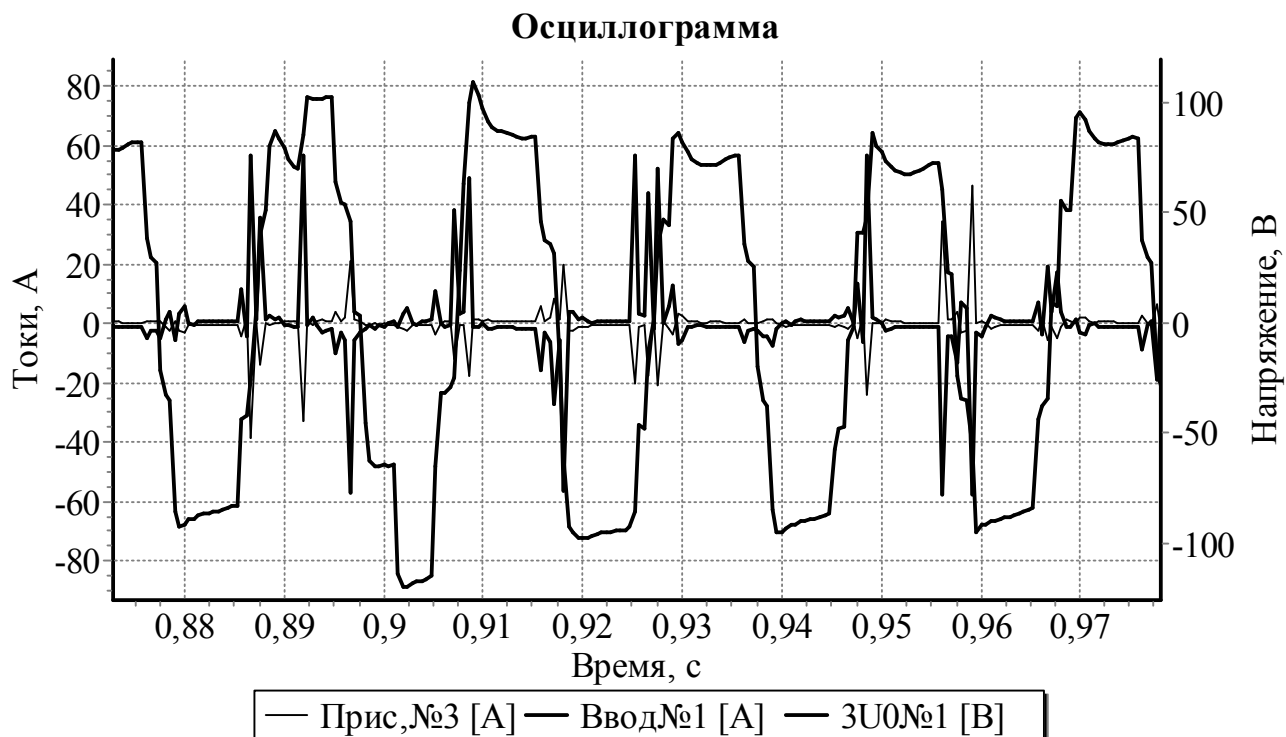


Рис. ПЗ.4. Осциллограмма характерного дугового замыкания на землю 3 типа

Зачастую возникают замыкания, устраняющиеся через время менее 0.5 секунды. Характерная осциллограмма такого процесса представлена на рис. ПЗ.5.

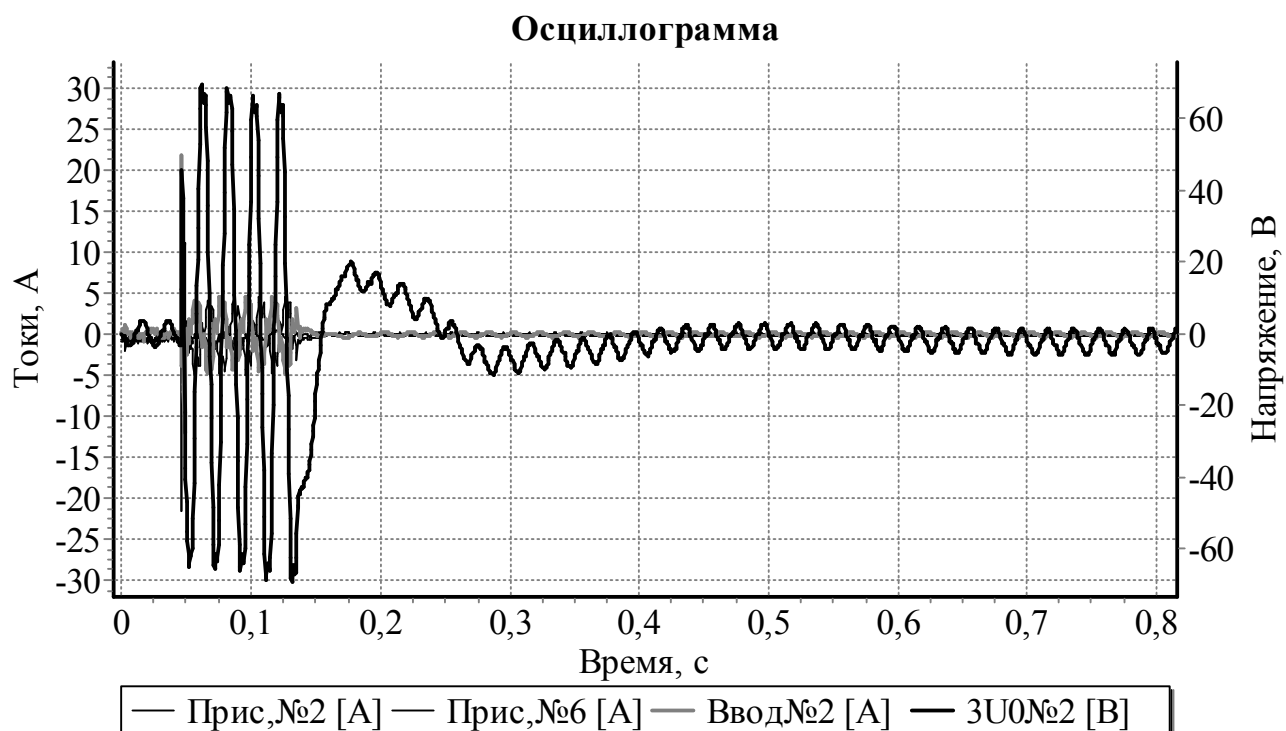


Рис. ПЗ.5. Осциллограмма напряжения при самоустранении замыкания на землю

Как показывают данные таблицы ПЗ.1 замыкания распределились между собой в процентном отношении следующим образом:

- металлические замыкания – 44%;
- дуговые замыкания всего 26,5% и по типам:
  - 1 тип – 20,5%
  - 2 тип – 4%
  - 3 тип – 2%
- самоустранившееся замыкания – 29,5%.

Таблица ПЗ.1

Время и вид замыканий на землю кабельной сети 10 кВ

№ ТП	Дата и время	Виды замыкания
ТП 2301	20/03/2008 10:30:25	металлическое
	20/03/2008 14:25:30	металлическое
	20/03/2008 14:39:14	металлическое
	27/03/2008 09:38:14	металлическое
	16/04/2008 16:21:38	дуговое 1 типа
	27/04/2008 14:36:06	металлическое
	05/05/2008 05:57:32	металлическое
	05/05/2008 05:58:02	дуговое 1 типа
	07/05/2008 22:00:17	металлическое
	08/05/2008 16:23:05	металлическое
	21/05/2008 09:47:55	самоустранившееся
	21/05/2008 09:48:02	самоустранившееся
	21/05/2008 09:48:14	самоустранившееся
	21/05/2008 09:53:36	самоустранившееся
	21/05/2008 10:10:13	самоустранившееся
	01/06/2008 03:47:30	металлическое
	05/06/2008 09:20:42	металлическое
	05/06/2008 09:40:31	металлическое

№ ТП	Дата и время	Виды замыкания
ТП 2301	06/07/2008 08:23:41	дуговое 1 типа в металлическое
	08/09/2008 20:28:42	дуговое 1 типа
	15/09/2008 03:41:07	металлическое
	05/12/2008 16:54:42	дуговое 1 типа
	03/02/2009 10:34:25	металлическое
	08/06/2009 14:11:17	металлическое
	19/06/2009 05:53:38	дуговое 1 типа в металлическое
	05/07/2009 07:26:26	самоустранившееся
	08/07/2009 19:40:06	самоустранившееся
	09/07/2009 13:58:14	самоустранившееся
ТП 2304	27/03/2008 09:36:05	металлическое
	16/04/2008 16:15:27	дуговое 1 типа
	05/06/2008 09:21:40	металлическое
	20/06/2008 08:29:29	дуговое 3 типа
	10/07/2008 16:14:12	дуговое 2 типа
	17/07/2008 14:09:21	металлическое
	18/07/2008 14:22:10	металлическое
	18/07/2008 18:30:11	металлическое
	22/07/2008 15:47:19	металлическое
	22/07/2008 16:15:18	металлическое
	26/07/2008 13:24:52	самоустранившееся
	08/09/2008 20:28:24	дуговое 1 типа
	15/09/2008 02:13:37	металлическое
	03/02/2009 10:33:45	металлическое
	03/02/2009 11:21:05	дуговое 3 типа
	09/07/2009 14:21:29	металлическое
	19/03/2008 10:51:31	самоустранившееся
ТП 2501	06/07/2008 07:20:38	дуговое 1 типа
	10/07/2008 16:13:46	дуговое 2 типа
	26/07/2008 13:24:42	самоустранившееся
	08/09/2008 20:28:57	дуговое 1 типа в дуговое 2 типа
	15/09/2008 02:14:16	металлическое
	15/09/2008 04:15:44	металлическое

№ ТП	Дата и время	Виды замыкания
ТП 2501	22/10/2008 10:51:08	дуговое 1 типа
	29/11/2008 23:35:39	дуговое 1 типа в металлическое
	14/12/2008 17:19:29	самоустранившееся
	15/12/2008 11:40:45	металлическое
	23/01/2009 15:27:12	самоустранившееся
	23/01/2009 21:33:04	дуговое 2 типа
	28/01/2009 11:29:53	дуговое 1 типа в металлическое
	15/02/2009 13:07:09	самоустранившееся
	19/02/2009 18:34:13	самоустранившееся
	11/03/2009 08:27:18	металлическое
	24/03/2009 18:26:53	дуговое 1 типа
	25/03/2009 11:30:58	дуговое 1 типа
	09/05/2009 13:44:22	металлическое
	15/05/2009 20:29:15	металлическое
	17/05/2009 16:03:10	дуговое 1 типа в металлическое
	08/06/2009 14:12:43	металлическое
	18/06/2009 18:21:42	самоустранившееся
	19/06/2009 05:55:12	металлическое
	22/06/2009 19:18:09	металлическое
	27/06/2009 02:34:37	самоустранившееся
	27/06/2009 08:49:42	металлическое
	23/01/2009 15:27:12	самоустранившееся
ТП 3020	09/06/2008 04:53:23	дуговое 1 типа в дуговое 2 типа
	20/06/2008 08:29:50	дуговое 2 типа в дуговое 3 типа
	10/07/2008 16:23:18	самоустранившееся
	21/07/2008 16:22:13	металлическое
	15/08/2008 09:20:26	металлическое
	02/09/2008 14:44:31	дуговое 1 типа
	08/10/2008 09:42:00	металлическое
	25/10/2008 02:56:54	металлическое
	04/12/2008 15:32:55	металлическое
	15/01/2009 14:24:19	самоустранившееся
	11/03/2009 11:45:54	металлическое

№ ТП	Дата и время	Виды замыкания
ТП 3020	12/03/2009 11:38:45	металлическое
	19/03/2009 10:41:37	дуговое 1 типа
	22/03/2009 18:43:42	дуговое 1 типа
	22/03/2009 18:44:04	дуговое 1 типа
	22/03/2009 18:44:10	дуговое 1 типа
	01/04/2009 06:32:23	дуговое 1 типа
	01/04/2009 06:32:28	дуговое 1 типа
	02/04/2009 10:36:47	дуговое 1 типа
	14/04/2009 16:05:46	дуговое 1 типа в металлическое
	30/04/2009 20:03:23	дуговое 1 типа
	04/05/2009 14:45:28	металлическое
	11/05/2009 18:03:57	металлическое
	03/06/2009 09:58:23	металлическое
	03/06/2009 09:58:26	металлическое
	25/06/2009 00:07:23	дуговое 1 типа в металлическое
	03/07/2009 17:07:40	самоустранившееся
ТП 3240	10/03/2009 14:58:45	самоустранившееся
	09/07/2009 10:40:39	самоустранившееся

**ДУГОВОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ**



Для получения параметров дугового замыкания на землю необходимо иметь информацию о напряжении на поврежденной фазе, времени погасания дуги и величине тока, в момент погасания дуги.

Для восстановления информации о напряжении на поврежденной фазе можно использовать напряжение нулевой последовательности. Суммируя это напряжение с тремя синусоидальными кривыми, сдвинутыми относительно друг друга на 120 градусов, получаем напряжение на фазах в процессе замыкания на землю.

По рис. П4.1 можно определить напряжение пробоя промежутка – 60 В. Амплитудное значение напряжения приведённое к первичной стороне соответственно равно 6000 В.

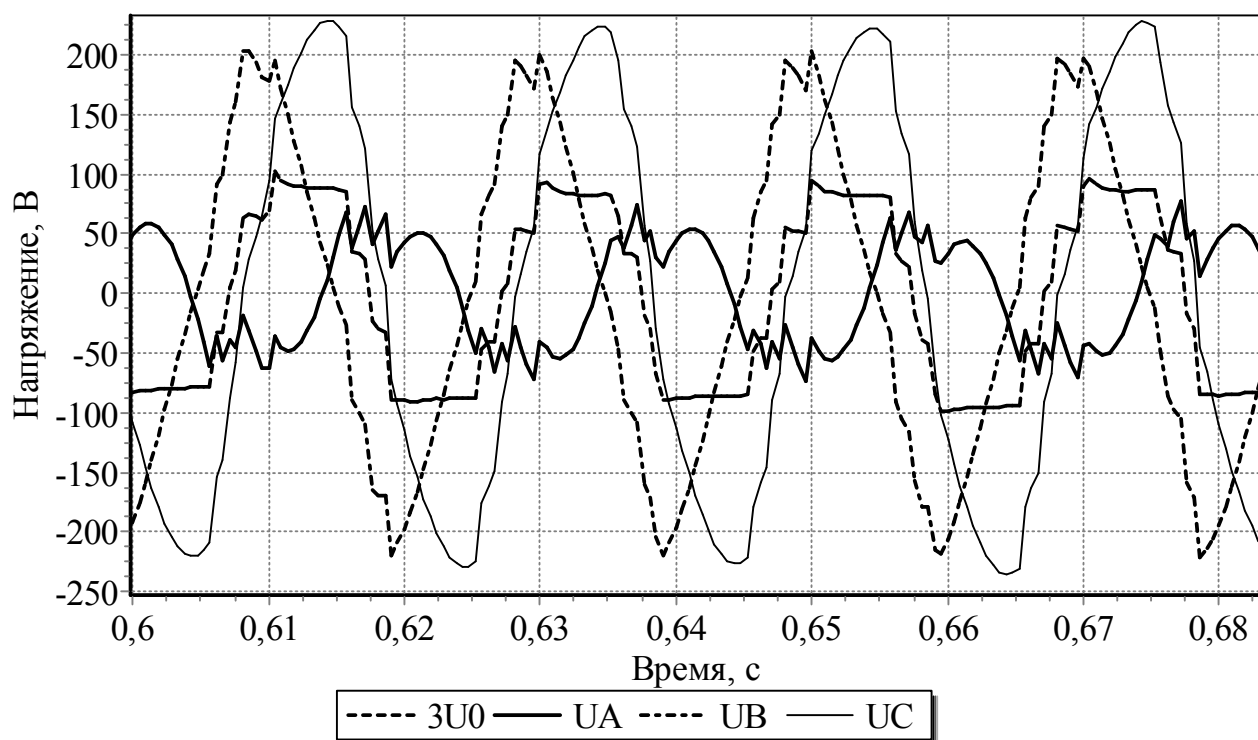


Рис. П4.1. Восстановленные осциллограммы напряжений на фазах

## Осциллограмма

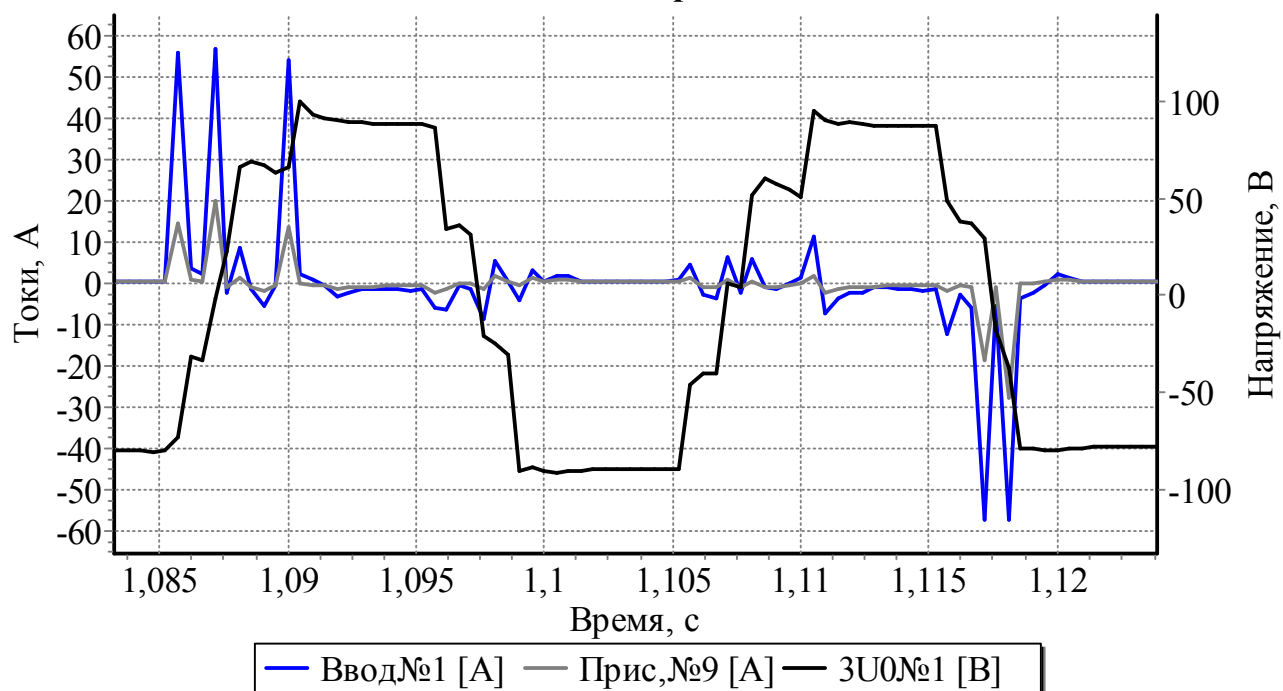


Рис. П4.2. Токи и напряжение нулевой последовательности

По рис. П4.2 можно оценить время горения дуги:

- бестоковая пауза не более 1 мс;
- минимальное время горения дуги не более 1 мс.

Результат восстановления фазных напряжений по напряжению нулевой последовательности и моделирования перемежающегося дугового замыкания в сети с изолированной нейтралью отображен на рис. П4.3 и 2.19 соответственно.

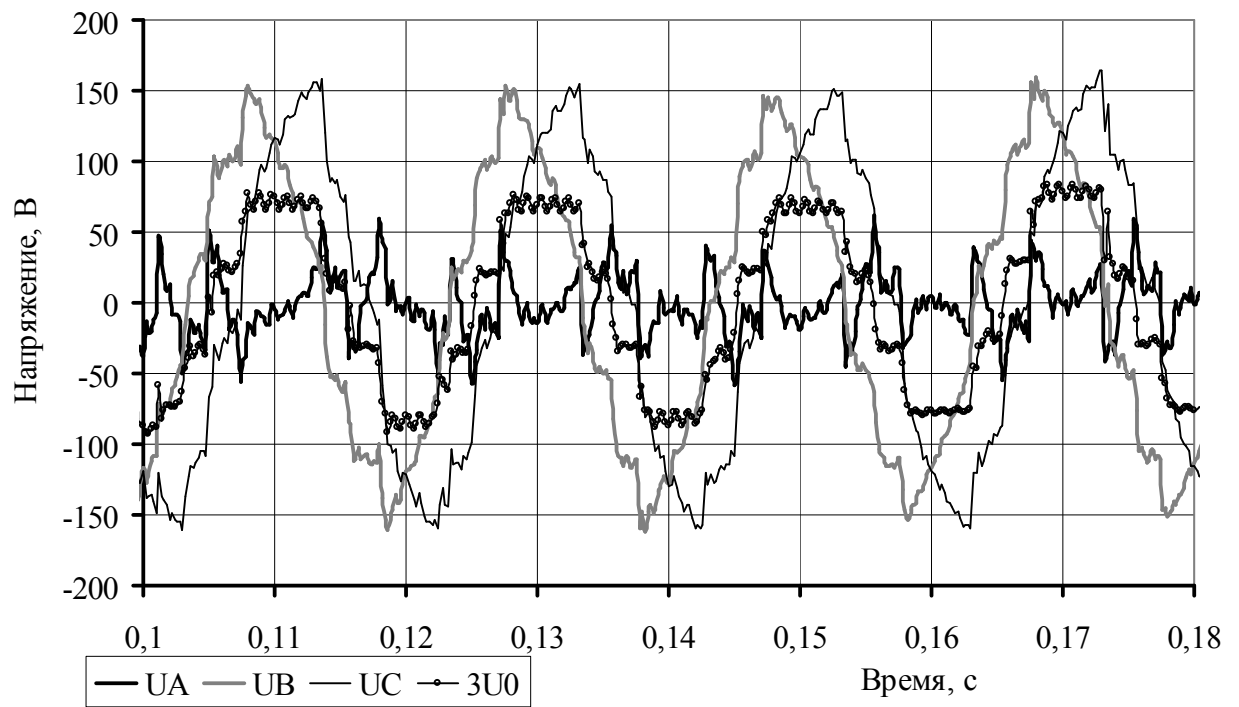


Рис. П4.3. Фазные напряжения при дуговом замыкании

**СЕРТИФИКАТ ПО ЭМС ЗАЩИТЫ МКЗЗП**



**СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р  
ГОССТАНДАРТ РОССИИ**



**СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ**

№ **РОСС RU.АЯ79.В11591**

Срок действия с **28.07.2009г.**

по **27.07.2012г.**

**8534681**

**ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ РОСС RU.0001.10АЯ79**

**ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ПРОДУКЦИИ И УСЛУГ ООО "НОВОСИБИРСКИЙ ЦЕНТР  
СЕРТИФИКАЦИИ И МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ"**  
630112, г. Новосибирск, пр-т Дзержинского 2/1, факт. адрес: 630004, а/я 91, г.Новосибирск, ул.  
Революции 36, тел.8(383) 2100847, факс 2100900

**ПРОДУКЦИЯ УСТРОЙСТВО МИКРОКОНТРОЛЕРНОЕ ДЛЯ  
ЗАЩИТЫ ПРИСОЕДИНЕНИЙ СЕКЦИЙ СБОРНЫХ ШИН ОТ  
ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 - 35 кВ МКЗЗП-6-35-Х**  
(где Х - буквенное обозначение модели)  
выпускаемая по ТУ 3435-001-11861308-2009  
серийный выпуск

**СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ**  
**ГОСТ Р 51321.1-2007(МЭК 60439-1:2004)**

код ОК 005 (ОКП):

**34 3500**

код ТН ВЭД России:

**ИЗГОТОВИТЕЛЬ ЗАО Научно - образовательный центра "Эстра"**  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кор. 2, к. 212

**СЕРТИФИКАТ ВЫДАН ЗАО Научно - образовательный центра "Эстра".**  
Код-ОКПО:11861308  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, кор. 2, к. 212

**НА ОСНОВАНИИ протокола испытаний № ИЛ16-07, № Э09-07 от 24.07.2009 ИЛ**  
**электронной аппаратуры и продукции электроприборостроения ФГУ "Новосибирский ЦСМ"**  
**№ РОСС RU.0001.21МЮ02, акта анализа состояния производства № 01796 от 25.06.2009**

**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ Схема № 3а .Маркирование продукции знаком  
соответствия по ГОСТ Р 50460-92 на изделия рядом с товарным знаком изготовителя и в  
товарно-сопроводительной документации.**



Руководитель органа

Эксперт

подпись

подпись

**Е.И. Филатов**

инициалы, фамилия

**Н.И. Семенников**

инициалы, фамилия

Сертификат имеет юридическую силу на всей территории Российской Федерации

**ВЕДОМОСТЬ УЧЕТА РАБОТЫ ЗАЩИТ ПРИ ЗАМЫКАНИИ НА  
ЗЕМЛЮ**



## Ведомость учета работы защит при замыкании на землю

№	Дата	Время	РП, ТП	Присоединение	Вариант действия защиты
1	2	3	4	5	6
1	14.11.2005	18:09	РП12	яч.13	1
2	18.11.2005	22:58	РП23	яч.27	1
3	24.11.2005	15:01	РП12	яч.22	1
4	28.11.2005	10:58	РП23	яч.15	1
5	06.12.2005	11:09	РП30	яч.3	1
6	14.12.2005	19:07	РП20	яч.5	1
7	16.01.2006	12:10	РП20	яч.8	3
8	17.01.2006	20:11	РП30	яч.6	3
9	03.02.2006	1:19	РП30	яч.3	1
10	11.03.2006	3:11	РП11	яч.10	1
11	12.04.2006	5:50	ПС А	-	2
12	07.05.2006	11:31	РП15	яч.6	3
13	07.05.2006	15:16	РП15	яч.7	1
14	12.01.2007		РП23	яч.23	3
15	12.01.2007		РП12	яч.1	3
16	15.01.2007		РП30	яч.3	3
17	20.01.2007		РП20	яч.8	3
18	08.02.2007		РП32	яч.2	1
19	10.02.2007		РП21	яч.8	3
20	13.02.2007		РП12	яч.21	1
21	07.03.2007		РП11	яч.12	1
22	21.03.2007		РП20	яч.5	1
23	28.03.2007		РП23	яч.5	3
24	28.03.2007		РП11	яч.9	1
25	02.04.2007		РП20	яч.10	4
26	09.04.2007		РП23	яч.17	3
27	14.04.2007		РП23	яч.22	3
28	22.04.2007		РП11	яч.11	3
29	05.05.2007		РП23	яч.21	1
30	06.05.2007		РП20	яч.5	3
31	08.05.2007		РП21	яч.5	1
32	26.05.2007		РП41	яч.15	1
33	28.05.2007		РП11	яч.10	1
34	11.06.2007		РП23	яч.23	1
35	11.06.2007		РП30	яч.4	1
36	03.07.2007		РП20	яч.3	1
37	18.08.2007		РП12	яч.12	1

1	2	3	4	5	6
38	20.09.2007		РП30	яч.3	3
39	29.09.2007		РП23	яч.21	3
40	30.09.2007		РП32	яч.17	3
41	24.10.2007	17:40	РП23	яч.20	3
42	24.10.2007		РП23	яч.20	3
43	11.12.2007		РП32	яч.14	4
44	21.02.2008		РП12	яч.22	3
45	22.02.2008		РП11	яч.12	3
46	15.03.2008		РП31	яч.13	3
47	05.04.2008		ТП404	яч.7	4
48	21.04.2008	10:53	РП12	яч.18	1
49	23.04.2008	10:22	РП11	яч.12	1
50	31.05.2008	5:29	РП11	яч.11	3
51	09.06.2008		ТП3020*	яч.3	1
52	04.03.2009	9:58	РП30	яч.3	1
53	11.03.2009	7:33	РП20	яч.8	1
54	11.03.2009	7:33	РП20	яч.6	4
55	12.03.2009	17:09	РП32	яч.7	1
56	12.03.2009	17:44	РП32	яч.16	1
57	24.03.2009	17:33	РП20	яч.6	4
58	24.03.2009	17:33	ТП2301*	яч.8	7
59	25.03.2009	10:40	РП22	яч.18	3
60	25.03.2009	17:33	ТП2301*	яч.8	7
61	25.03.2009	20:22	РП11	яч.11	2
62	01.04.2009	6:40	РП32	яч.10	3
63	08.04.2009	5:27	РП15	яч.10	3
64	22.07.2010	17:40	РП15	яч.19	5
65	22.07.2010	17:45	РП11	яч.11	6
66	31.07.2010	1:42	ТП2501*	яч.6	6

\*—на ТП или РП установлена защита МКЗЗП

Возможные варианты действия защиты:

Вариант 1 - Защита выявила поврежденное присоединение. После отключения присоединенное место повреждения было обнаружено.

Вариант 2 - Замыкание самоустранилось до действия персонала и больше не появлялось.

Вариант 3 - До принятия мер персоналом замыкание на землю перешло в двойное замыкание (желательно указать через какое время). Выключатель отключился релейной защитой от междуфазных КЗ.

Вариант 4 - Срабатывание защиты оказалось ложным (при этом уточнить - в нормальном режиме работы сети или при замыкании на землю на другом присоединении).

Вариант 5 - Замыкание зафиксировано по факту появления 3U0 на шинах, а защита поврежденного присоединения не сработала

Вариант 6 - Защита выявила поврежденное присоединение и отключила данное присоединение.

Вариант 7- Земля на питающем кабеле.



**ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ**

## Протокол

производственных испытаний микроконтроллерной защиты от замыканий на землю МКЗЗП-М на  
ТП 2304 МП ГЭС г. Ханты-Мансийск

Микроконтроллерная защита присоединений сборных шин 6-10 кВ от замыканий на землю МКЗЗП-М является централизованной защитой, предназначенной для выявления присоединения, на котором произошло замыкание на землю. Сигнал от защиты может быть использован как с действием на сигнал, так и с действием на отключение поврежденного присоединения. Запуск защиты осуществляется от контактов реле напряжения, реагирующего на напряжение  $3U_0$  на секции сборных шин.

Защита МКЗЗП-М состоит из электронного блока – одного на распределительное устройство и устройств сопряжения УСО, установленных в ячейках всех защищаемых присоединений. УСО получает информацию о токе нулевой последовательности от трансформаторов тока нулевой последовательности присоединения и о напряжении нулевой последовательности от трансформаторов напряжения секций сборных шин, передает эту информацию электронному блоку. Кроме того, УСО содержит выходное промежуточное реле, которое своими контактами выдает сигнал о срабатывании защиты в схему управления выключателя.

Целью испытаний является проверка поведения защиты при замыканиях на землю одной фазы в цепи питающего присоединения (яч.3, яч.8) и цепи отходящего присоединения (яч.9, яч.14).

Проведение опыта:

На ранее отключенном присоединении устанавливалась закоротка между фазой и контуром заземления РП через измерительный трансформатор тока с амперметром. Замыкание осуществлялось путем включения выключателя.

Замыкание производилось четыре раза:

- в ячейке №3 на первой секции;
- в ячейке №9 на первой секции;
- в ячейке №8 на первой секции;
- в ячейке №14 на первой секции;

Уставка реле напряжения составила 30 В.

Время срабатывания защиты – 0.5 с.

Уставка логического алгоритма – 30 А.

Защита в процессе опыта действовала на отключение выключателей.

Результаты испытаний:

- Суммарный ток замыкания на землю составил:
  - на I секции                      – по показанию амперметра 85 А.  
    – по протоколу МКЗЗП-М 85 А.
  - на II секции                      – по показанию амперметра 87 А.  
    – по протоколу МКЗЗП-М 85 А.
- Суммарный ёмкостной ток присоединений секции по протоколу МКЗЗП-М составил:
  - для включенных присоединений первой секции      2.5 А
  - для включенных присоединений второй секции      1.2 А
- Защита сработала селективно во всех случаях и подействовала на отключение выключателей поврежденных присоединений.

Выводы:

Испытания показали работоспособность защиты.



от МП ГЭС

Кузнецов С.П.

Кузьмин А.В.

от НГТУ

Горюнов В.А.

## Протокол

производственных испытаний микроконтроллерной защиты от замыканий на землю МКЗЗП-М на  
ТП 2301 МП ГЭС г. Ханты-Мансийск

Микроконтроллерная защита присоединений сборных шин 6-10 кВ от замыканий на землю МКЗЗП является централизованной защитой, предназначенной для выявления присоединения, на котором произошло замыкание на землю. Сигнал от защиты может быть использован как с действием на сигнал, так и с действием на отключение поврежденного присоединения. Запуск защиты осуществляется от контактов реле напряжения, реагирующего на напряжение  $3U_0$  на секции сборных шин.

Защита МКЗЗП-М состоит из электронного блока – одного на распределительное устройство и устройств сопряжения УСО, установленных в ячейках всех защищаемых присоединений. УСО получает информацию о токе нулевой последовательности от трансформаторов тока нулевой последовательности присоединения и о напряжении нулевой последовательности от трансформаторов напряжения секций сборных шин, передает эту информацию электронному блоку. Кроме того, УСО содержит выходное промежуточное реле, которое своими контактами выдает сигнал о срабатывании защиты в схему управления выключателя.

Целью испытаний является проверка поведения защиты при замыканиях на землю одной фазы в цепи питающего присоединения (Ввод1, яч. 5) и цепи отходящего присоединения (яч.7).

Проведение опыта:

На ранее отключенном присоединении устанавливалась закоротка между фазой и контуром заземления РП через измерительный трансформатор тока с амперметром. Замыкание осуществлялось путем включения выключателя.

Замыкание производилось два раза:

- на питающем РП-23 в ячейке №21 на первой секции;
- на ТП 2301 в ячейке №7 на первой секции;

Уставка реле напряжения составила 30 В.

Время срабатывания защиты – 1.5 с.

Уставка логического алгоритма – 30 А.

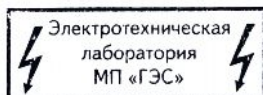
Защита в процессе опыта действовала на отключение выключателей.

Результаты испытаний:

- Ток замыкания на землю составил:
  - на I секции – по показанию амперметра 85 А.
  - по протоколу МКЗЗП-М 88 А.
- Суммарный ёмкостной ток присоединений секции по протоколу МКЗЗП-М составил:
  - при включенной отходящей линии яч.7 первой секции 0.19 А
- Защита сработала селективно во всех случаях и подействовала на отключение выключателей поврежденных присоединений.

Выводы:

Испытания показали работоспособность защиты.



от МП ГЭС

Кузнецов С.П.

Кузьмин А.В.

от НГТУ

Горюнов В.А.

## Протокол

производственных испытаний микроконтроллерной защиты от замыканий на землю  
МКЗЗП-М на ТП 3020 МП ГЭС г. Ханты-Мансийск

Микроконтроллерная защита присоединений сборных шин 6-10 кВ от замыканий на землю МКЗЗП является централизованной защитой, предназначенной для выявления присоединения, на котором произошло замыкание на землю. Сигнал от защиты может быть использован как с действием на сигнал, так и с действием на отключение поврежденного присоединения. Запуск защиты осуществляется от контактов реле напряжения, реагирующего на напряжение  $3U_0$  на секции сборных шин.

Защита МКЗЗП-М состоит из электронного блока – одного на распределительное устройство и устройств сопряжения УСО, установленных в ячейках всех защищаемых присоединений. УСО получает информацию о токе нулевой последовательности от трансформаторов тока нулевой последовательности присоединения и о напряжении нулевой последовательности от трансформаторов напряжения секций сборных шин, передает эту информацию электронному блоку. Кроме того, УСО содержит выходное промежуточное реле, которое своими контактами выдает сигнал о срабатывании защиты в схему управления выключателя.

Целью испытаний является проверка поведения защиты при замыканиях на землю одной фазы в цепях питающих присоединений (ввод №1, яч. 5; ввод №2, яч. 4) и цепях отходящих присоединений (яч. 3, яч. 9, яч. 11, яч. 6, яч. 10, яч. 12).

### Проведение опыта:

На ранее отключенном присоединении устанавливалась закоротка между фазой и контуром заземления РП через измерительный трансформатор тока с амперметром. Замыкание осуществлялось путем включения выключателя.

Замыкание на ТП 3020 производилось восемь раз:

- во вводной ячейке №5 на первой секции;
- в ячейке №3 на первой секции;
- в ячейке №9 на первой секции;
- в ячейке №11 на первой секции;
- во вводной ячейке №4 на второй секции;

- в ячейке №12 на второй секции;
- в ячейке №10 на второй секции;
- в ячейке №6 на второй секции;

Уставка реле напряжения составила 30 В.

Время срабатывания защиты – 1.5 с.

Уставка логического алгоритма – 30 А.

Защита в процессе опыта действовала на отключение выключателей.

#### Результаты испытаний:

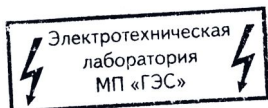
Ток замыкания на землю составил:

- |                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| - на I секции  | – по показанию амперметра 60 А |
|                | – по протоколу МКЗЗП-М 62 А    |
| - на II секции | – по показанию амперметра 65 А |
|                | – по протоколу МКЗЗП-М 63,6 А  |

Защита сработала селективно во всех случаях и подействовала на отключение выключателей поврежденных присоединений.

#### Выводы:

Испытания показали работоспособность защиты.



от МП ГЭС



Кузнецов С.П.

Кузьмин А.В.

от НГТУ

Горюнов В.А.

### Протокол

производственных испытаний микроконтроллерной защиты от замыканий на землю  
МКЗЗП-ВЗ на ТП 3050 (323) МП ГЭС г. Ханты-Мансийск

Микроконтроллерная защита присоединений сборных шин 6-10 кВ от замыканий на землю МКЗЗП является централизованной защитой, предназначенной для выявления присоединения или секции сборных шин, на которых произошло замыкание на землю. Сигнал от защиты может быть использован как с действием на сигнал, так и с действием на отключение поврежденного присоединения. Запуск защиты осуществляется от контактов реле напряжения, реагирующего на напряжение  $3U_0$  на секции сборных шин.

Защита МКЗЗП-ВЗ состоит из электронного блока – одного на распределительное устройство, блока индикации и устройств сопряжения УСО, установленных в ячейках всех защищаемых присоединений. УСО получает информацию о токе нулевой последовательности от трансформаторов тока нулевой последовательности присоединения и о напряжении нулевой последовательности от трансформаторов напряжения секций сборных шин, передает эту информацию электронному блоку. Кроме того, УСО содержит выходное промежуточное реле, которое своими контактами выдает сигнал о срабатывании защиты в схему управления выключателя.

Целью испытаний является проверка поведения защиты при замыканиях на землю одной фазы в цепях питающих присоединений (ввод №1, яч. 3; ввод №2, яч. 4), цепи отходящих присоединений (яч. 5) и на шинах секций №1 и №2.

#### Проведение опыта:

На ранее отключенном присоединении устанавливалась закоротка между фазой и контуром заземления ТП. Замыкание осуществлялось путем включения выключателя.

Замыкание на ТП 3050 производилось пять раз:

- во вводной ячейке №3 на первой секции;
- в ячейке №5 на первой секции;
- на шинах секции №1;
- во вводной ячейке №4 на второй секции;
- на шинах секции №2;

Уставка реле напряжения составила 30 В.

Время срабатывания защиты – 1.2 с.

Время срабатывания защиты при замыкании на шинах – 0.4 с.

Уставка логического алгоритма – 30 А.

Защита в процессе опыта действовала на отключение выключателей.

#### Результаты испытаний:

Ток замыкания на землю составил:

- на I секции – по протоколу МКЗЗП-ВЗ 69.6 А
- на II секции – по протоколу МКЗЗП-ВЗ 73.6 А

Защита сработала селективно во всех случаях и подействовала на отключение выключателей поврежденных присоединений.

#### Выводы:

Испытания показали работоспособность защиты.



от МП ГЭС

от НГТУ



Кузнецов С.П.

Кузьмин А.В.

Горюнов В.А.



**АКТ ВНЕДРЕНИЯ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  
ХАНТЫ-МАНСКИЙ АУТОНОМНЫЙ ОКРУГ-ЮГРА  
ГОРОД ХАНТЫ-МАНСКИЙ  
МУНИЦИПАЛЬНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ГОРОДСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ»  
МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ГОРОД ХАНТЫ-МАНСКИЙ

628011, г. Ханты-Мансийск, ул. Дзержинского, 21

ОАО Ханты-Мансийский банк г. Ханты-Мансийск р/с 40702810800000000140 кор/счет 30101810100000000740 БИК 047162740

ИНН 8601005865, КПП 860101001, ОКПО 03220050, ОКВЭД 40.10.3., 40.10.5.

Тел/факс: (3467) 33-31-89, 33-34-25, 32-12-16

Сайт: [www.hm-ges.ru](http://www.hm-ges.ru) E-mail: [hm-ges@ugramail.ru](mailto:hm-ges@ugramail.ru)Исх. 809302.11.

2010г.

## АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы Горюнова Вячеслава  
Александровича

Результаты диссертационной работы Горюнова В.А. «Исследования и разработка алгоритмов микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю с учетом электромагнитной совместимости» представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в эксплуатационной деятельности МП «Городские электрические сети» г. Ханты-Мансийска в виде устройств микропроцессорной защиты МКЗ3П для защиты присоединений 10 кВ от замыканий на землю. Устройства защиты установлены на трансформаторных подстанциях ТП2301, ТП2304, ТП3020, ТП3051, ТП2501, ТП3240, ТП3050 и на распределительном пункте РП21. Опыт эксплуатации показал, что установленные защиты действуют селективно при всех повреждениях. Неселективных действий защит не зафиксировано.

Директор МП «ГЭС»



С.Н.Дмитриев