

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

На правах рукописи

Дементий Юрий Анатольевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОМПЕНСАЦИИ ПОЛНОГО ТОКА ОДНОФАЗНОГО
ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Булычев Александр Витальевич

Чебоксары – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Анализ методов компенсации тока однофазного замыкания на землю в сетях 6-10 кВ	10
1.1 Задача компенсации тока однофазного замыкания на землю.....	10
1.2 Сравнительный анализ методов и технических средств компенсации тока однофазного замыкания на землю	16
1.3 Концепция управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока.....	20
Выводы.....	21
Глава 2 Разработка и исследование компенсации полного тока однофазного замыкания на землю.....	23
2.1 Метод компенсации полного тока.....	23
2.2 Математическая модель сети с управляемым заземлением нейтрали сети.....	33
2.3 Алгоритмы действия управляемого заземления нейтрали сети	42
2.4 Исследование процессов компенсации полного тока ОЗЗ с помощью математической модели.....	48
2.5 Измерение тока нулевой последовательности.....	52
Выводы.....	81
Глава 3 Разработка и исследование опытного образца управляемого заземления нейтрали сети.....	83
3.1 Разработка опытного образца управляемого заземления нейтрали сети 10 кВ	83
3.2 Лабораторные испытания с использованием физической модели сети	87

3.3 Исследования опытного образца в реальных условиях эксплуатации на действующей подстанции.....	96
Выводы.....	99
Заключение	100
Список литературы	102
Приложение 1 – Осциллограммы в дополнение к результатам физического моделирования.....	111
Приложение 2 – Акты о внедрении результатов работы.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы. Решение выполнять электрические сети классов напряжения 6-35 кВ с изолированной нейтралью, принятое в начале двадцатого века, позволило существенно повысить надежность электроснабжения по этим сетям и продлить срок эксплуатации коммутационных аппаратов. Это достигнуто благодаря уникальному свойству сетей с изолированной нейтралью - сохранять возможность передавать электрическую энергию при наличии в ней однофазного замыкания на землю (ОЗЗ).

Развитие сетей неизбежно приводит к увеличению их емкости и, как следствие, к увеличению токов при ОЗЗ (токи ОЗЗ более 5-10 А считаются опасными). Это вынуждает применять специальные методы и технические средства компенсации токов ОЗЗ.

Задача снижения тока и гашения электрической дуги в месте ОЗЗ в сетях 6-35 кВ на практике традиционно решается с помощью дугогасящих реакторов (катушек индуктивности), включаемых между нейтралью сети и землей [41]. Однако это решение, основанное на компенсации только реактивной емкостной составляющей тока ОЗЗ, противоположно направленной индуктивной составляющей тока, создаваемой дугогасящим реактором (ДГР), дает хорошие практические результаты только на одной основной частоте сети и при отсутствии существенных потерь [43].

В реальных протяженных сетях, где токи ОЗЗ большие и превышают, например, 100 А, остаточный, не скомпенсированный ДГР ток в месте ОЗЗ, обусловленный потерями, гармониками и неидеальной настройкой ДГР, может превышать 5 А и поддерживать горение электрической дуги в месте ОЗЗ. Даже один фактор из перечисленных – неидеальная настройка ДГР (допускается расстройка до 5% от номинального тока ДГР) – может вызвать появление остаточного тока, способного поддерживать дугу в месте ОЗЗ. Предельное значение тока, при котором возможно устойчивое горение дуги в месте

замыкания в сетях 6-10 кВ (5А) определено в результате всесторонних исследований и зафиксировано в нормативных документах [42, 44, 45, 60, 61, 70].

Таким образом, в сетях с большими токами ОЗЗ (100 А и более) ДГР не является гарантирующим средством гашения дуги, так как остаточный ток может превышать значение 5А. Это означает, что ДГР большой мощности оказываются неэффективными, т.к. не выполняют в полной мере свою основную функцию гашения дуги в месте ОЗЗ.

В этих условиях для эффективного гашения электрической дуги в месте ОЗЗ необходимо компенсировать не только емкостную составляющую тока ОЗЗ на частоте сети, а полный ток ОЗЗ, включая активную составляющую на частоте сети и составляющие других частот [33, 35]. Все это можно реализовать с помощью комплекса оборудования для управляемого заземления нейтрали [34, 36]. Таким образом, сохраняются преимущества изолированной нейтрали – возможность передавать электрическую энергию при наличии ОЗЗ в течение продолжительного периода времени, – и приобретаются преимущества эффективно заземленной (или заземленной через резистор) нейтрали – возможность ограничивать перенапряжения при ОЗЗ.

Применение управляемого заземления позволит снизить вероятность возникновения пожаров, улучшит электробезопасность сети, снизит перенапряжения и предотвратит развитие многих аварийных ситуаций [73].

В связи с этим, создание новой управляемой системы заземления нейтрали для распределительных электрических сетей, обладающей новыми свойствами, позволяющими повысить надежность и безопасность электрических сетей 6-10 кВ, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Системы такого рода практически не исследованы. Для того чтобы создать эффективную управляемую систему заземления нейтрали, надо построить ее математические модели, соответствующие возможным состояниям сети. На основе моделей необходимо провести исследование режимов и разработать алгоритмы и конкретные программы компенсации тока ОЗЗ. Решение этой нетривиальной научно-технической задачи обладает научной новизной.

Целью работы является разработка методов и технических средств компенсации полного тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ.

Объектом исследования являются распределительные электрические сети переменного тока класса напряжения 6-10 кВ с компенсацией полного тока однофазного замыкания на землю.

Предметом исследования являются методы и технические средства компенсации полного тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ.

Основные задачи:

1. Разработка метода компенсации остаточного тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в распределительных сетях.
2. Разработка моделей и исследование управляемого заземления нейтрали, обеспечивающего компенсацию полного тока ОЗЗ в сетях 6-10 кВ.
3. Создание и исследование опытного образца управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока ОЗЗ для сетей 6-10 кВ, обеспечивающего гашение дуги и создание условий для предотвращения повторного зажигания дуги в реальных условиях эксплуатации.

Методы и методология исследования базируются на принципах теоретических основ электротехники, методах анализа и синтеза систем автоматического управления, теории релейной защиты и методах математического и физического моделирования.

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением методов теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, релейной защиты, подтверждается результатами физического моделирования, натурных экспериментов и успешной работой образца системы компенсации в опытной эксплуатации на действующей подстанции.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод компенсации полного тока и гашения электрической дуги в месте повреждения при однофазном замыкании на землю в сети 6-10 кВ.

2. Результаты исследования компенсации полного тока ОЗЗ, полученные путем математического и физического моделирования.

3. Результаты исследования преобразователей тока нулевой последовательности для цифровой системы управления компенсацией тока однофазного замыкания на землю.

Научная новизна работы:

1. Предложен и обоснован метод компенсации полного тока ОЗЗ единым комплексом управляемого заземления нейтрали сети, обеспечивающим отдельную компенсацию емкостной составляющей на частоте сети с помощью пассивного ДГР и компенсацию других составляющих с помощью управляемого источника, что позволяет полностью скомпенсировать ток в месте ОЗЗ, принудительно погасить дугу и предотвратить повторное ее зажигание.

2. Разработаны математическая и физическая модели управляемого заземления нейтрали, доказано их соответствие реальному объекту, на их основе проведены всесторонние теоретические и экспериментальные исследования в стационарных и переходных режимах, которые подтвердили правомерность принятых в процессе разработки ограничений и допущений, доказали преимущества разработанного управляемого заземления и позволили определить его основные эксплуатационные параметры.

3. В результате исследования электромагнитных трансформаторов тока нулевой последовательности разработаны рекомендации, позволяющие повысить точность передачи токов нулевой последовательности в стационарных и динамических режимах путем расширения полосы пропускания в области нижних частот за счет увеличения коэффициента трансформации.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

1. Реализация предложенного метода компенсации полного тока ОЗЗ для сетей 6-10 кВ обеспечивает существенное снижение тока, гашение электрической дуги и создание условий для предотвращения повторного зажигания дуги в месте ОЗЗ, что повышает надежность и безопасность этих сетей.

2. Разработан и изготовлен опытный образец управляемого заземления мощностью 800 кВА, который всесторонне исследован в условиях заводской лаборатории на напряжении 10 кВ с током однофазного замыкания на землю 30 А, что позволило получить близкие по сущности к реальным процессы компенсации дуговых замыканий на землю; положительные результаты заводских испытаний позволили сделать вывод о возможности включения опытного образца в реальную сеть 10 кВ на действующей подстанции.

3. Опытный образец управляемого заземления нейтрали сети введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги»; получен опыт эксплуатации в реальных условиях; проведен анализ работы опытного образца в нормальных режимах и при реальных повреждениях в сети; результаты анализа показали, что ввод в работу управляемого заземления нейтрали не вносит неблагоприятных изменений в условия работы сети, и подтвердили все основные параметры этого управляемого заземления нейтрали, заданные при разработке.

4. Результаты работы теоретического и практического характера использованы ООО «НПП Бреслер» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также – в учебном процессе в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики и могут быть использованы проектными и научно-исследовательскими организациями при разработке компенсации тока ОЗЗ для электрических сетей с большими токами ОЗЗ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на 4-й международной научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (Чебоксары, 18-21 апреля 2017 г.), на XI международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (Санкт-Петербург, 17-18 июля 2015 г.), на XI Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, 5 июня 2015 г.), на двадцатой Всероссийской

научно-технической конференции «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства» (г. Дивноморск, 5-9 июня 2017 г.), на научно-практической конференции «Релейная защита и автоматизация. Совершенствование эксплуатации и перспективы развития» в рамках выставки «Электрические сети России-2017» (Москва, 6 декабря 2017 г.).

Личный вклад автора. Разработка метода компенсации полного тока однофазного замыкания на землю, математическое и физическое моделирование, разработка опытного образца, постановка экспериментов и последующий анализ результатов выполнены автором лично. В совместных работах автору принадлежат постановка целей и задач, постановка и проведение теоретических и экспериментальных исследований, обработка результатов.

Публикации. Основные результаты отражены в 9 печатных работах, в том числе 4 работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6-10 КВ

1.1 Задача компенсации тока однофазного замыкания на землю

Однофазные замыкания на землю являются преобладающим видом повреждения в сетях всех классов напряжений. В распределительных сетях напряжением 6-35 кВ ОЗЗ составляют более 75% от общего числа повреждений [75]. Сети 6-35 кВ работают преимущественно с изолированной нейтралью, и ОЗЗ не сопровождаются большими токами.

При возникновении ОЗЗ в месте повреждения возникает ток, который ограничивается емкостными и активными проводимостями в сети (рисунок 1.1, 1.2). Активные проводимости обусловлены неидеальностью диэлектрических материалов, используемых в линиях электропередачи и потерями в силовом электрооборудовании.

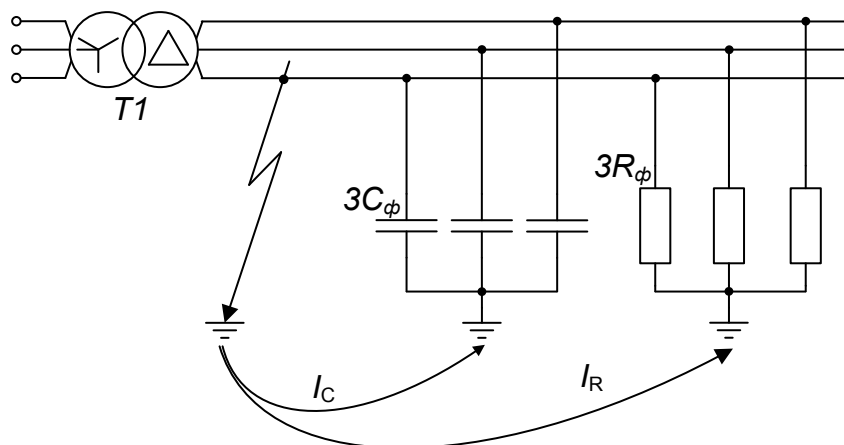


Рисунок 1.1 – Схема замещения распределительной сети при ОЗЗ

В результате теплового воздействия тока ОЗЗ в месте повреждения разрушается изоляция. Это приводит к развитию однофазного замыкания и, как правило, ОЗЗ вызывает возникновение более тяжелых видов повреждений – междуфазных коротких замыканий.

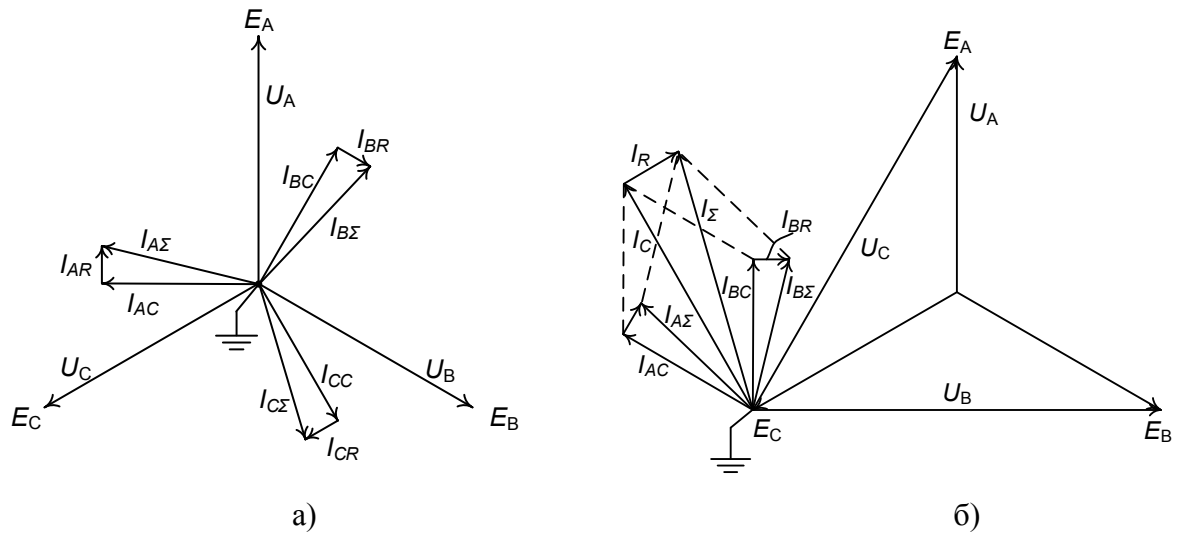


Рисунок 1.2 – Векторные диаграммы токов и напряжений в нормальном режиме и при ОЗЗ

Здесь: E_A, E_B, E_C – фазные ЭДС сети, I_{AC}, I_{BC}, I_{CC} – емкостные токи фаз, I_{AR}, I_{BR}, I_{CR} – активные токи фаз на землю, I_C – емкостная составляющая тока ОЗЗ, I_R – активная составляющая тока ОЗЗ, I_Σ – результирующий ток ОЗЗ.

Как правило, ток в месте повреждения поддерживает процесс горения электрической дуги. Термическое воздействие электрической дуги приводит к разрушению изоляции неповрежденных фаз с последующим переходом однофазного замыкания в двух- и трехфазные [72, 78].

Возникновение междуфазного короткого замыкания вызывает необходимость экстренного отключения поврежденного элемента сети, это, в свою очередь, приводит к нарушению электроснабжения потребителей [1].

Компенсация тока в месте повреждения при ОЗЗ дает возможность исключить разрушение изоляции вследствие нагрева и погасить электрическую дугу [13].

Существуют различные способы снижения токов ОЗЗ. Традиционно для этих целей используются дугогасящие реакторы (катушки индуктивности), включаемые между нейтралью сети и землей (рисунок 1.3).

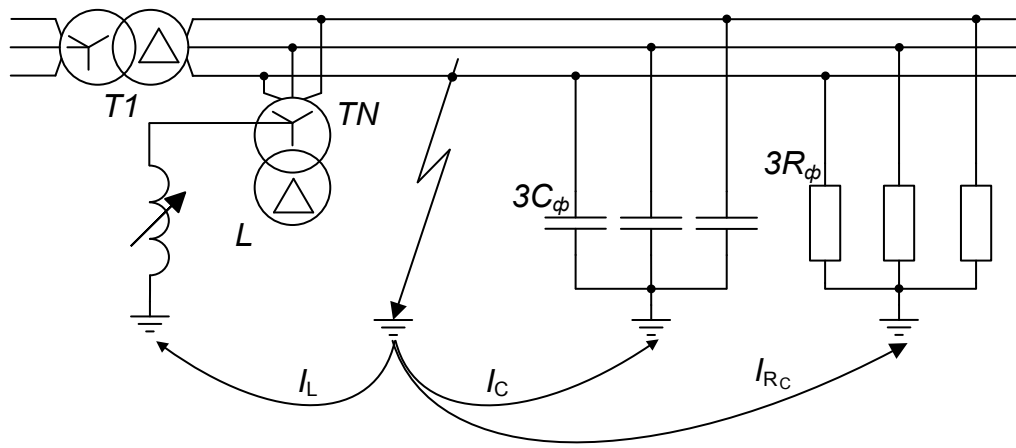


Рисунок 1.3 – Схема замещения сети с компенсацией емкостного тока при ОЗЗ

Это решение основано на компенсации только реактивной емкостной составляющей тока ОЗЗ, противоположно направленной индуктивной составляющей тока, создаваемой дугогасящим реактором (рисунок 1.4). Очевидно, компенсация тока ОЗЗ с помощью пассивного элемента сети ДГР дает хорошие практические результаты только на одной основной частоте сети и при отсутствии существенных потерь [54, 66, 68]. Вследствие того, что индуктивный ток реактора направлен противоположно емкостному току (явление резонанса токов), в месте повреждения происходит компенсация (нейтрализация) емкостной составляющей тока ОЗЗ [63, 65, 68].

Компенсация емкостной составляющей требует регулярной настройки индуктивности дугогасящего реактора в резонанс с емкостью сети [15, 16]. Причиной этого является непостоянство емкостей фаз, которые зависят от количества подключённых присоединений, погодных условий и диэлектрических свойств изоляционных материалов [48, 49, 50].

Невозможность практического достижения абсолютной точности настройки ДГР приводит к недокомпенсации или перекомпенсации тока ОЗЗ [53, 55, 64]. При этом в условиях ОЗЗ ток в месте повреждения будет содержать реактивную составляющую промышленной частоты. При большой суммарной протяженности линий, сумма активных утечек неповрежденных фаз и некомпенсированного реактивного тока (остаточный ток ОЗЗ) достигает значения, при котором применение реактора не гарантирует гашения дуги в месте повреждения при ОЗЗ.

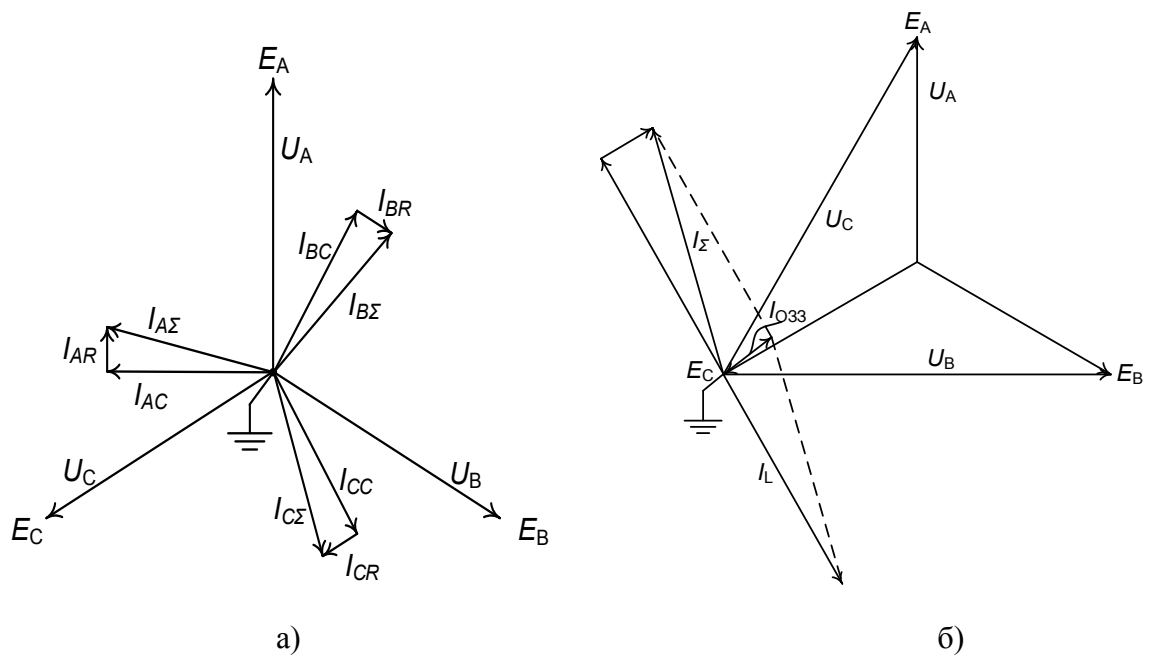


Рисунок 1.4 – Векторные диаграммы токов и напряжений в сети с компенсацией емкостного тока в нормальном режиме и при ОЗЗ

В настоящее время совершенствование принципов компенсации тока ОЗЗ идет, в основном, в двух направлениях. Первое из них имеет целью повышение точности компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ на частоте сети с помощью ДГР, а второе – развитие методов и технических средств уменьшения остаточных токов в месте ОЗЗ, возникающих при компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ за счет активных элементов.

Первое из направлений интенсивно развивалось почти сто лет и достигло сегодня ограничений, связанных с наличием в реальном токе ОЗЗ существенных составляющих, которые принципиально (методически) не могут быть скомпенсированы с помощью ДГР.

Второе направление открывает хорошие перспективы дополнения первого и создания высокоэффективных систем управляемого заземления нейтрали сети с улучшенными основными функциями компенсации полного тока ОЗЗ (со всеми составляющими), гашения электрической дуги в месте повреждения и предотвращения повторных процессов зажигания дуги.

Одной из составляющих, которую принципиально невозможно скомпенсировать дугогасящим реактором, является активная составляющая тока

ОЗЗ. В распределительных сетях она обусловлена поперечными активными проводимостями линии и может достигать 10% от полного тока ОЗЗ [77]. Кроме этого, причиной увеличения активной составляющей тока замыкания может стать использование комбинированного заземления нейтрали распределительной сети.

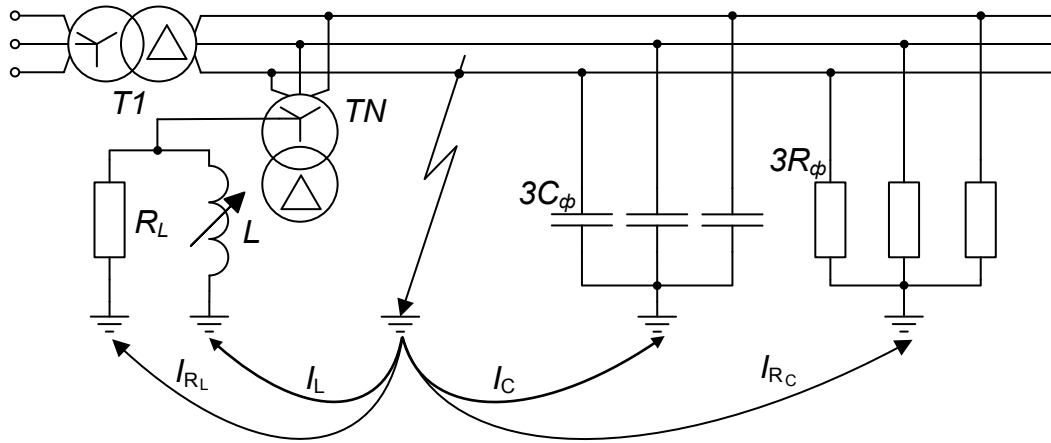


Рисунок 1.5 – Схема замещения распределительной сети с комбинированным заземлением нейтрали при ОЗЗ

При комбинированном заземлении нейтрали параллельно ДГР устанавливается высоковольтный резистор, который снижает добротность сети и уменьшает кратность внутренних перенапряжений. При возникновении замыкания ток этого резистора увеличивает активную составляющую тока ОЗЗ. Большая активная составляющая тока в месте повреждения, наравне с реактивной составляющей, обусловленной неточной настройкой реактора, снижает полезный эффект от компенсации емкостной составляющей.

Кроме активной и реактивной составляющих промышленной частоты, ток ОЗЗ содержит составляющие других частот (высшие гармонические составляющие). Причинами их возникновения являются несинусоидальность фазных ЭДС сети и нелинейность кривых намагничивания магнитопроводов силового оборудования. На рисунках 1.6 и 1.7 показаны осциллограммы и спектральный состав некомпенсированного реактором тока в месте повреждения, полученные в ходе проведения опыта ОЗЗ на ПС «Южная» (г. Оренбург).

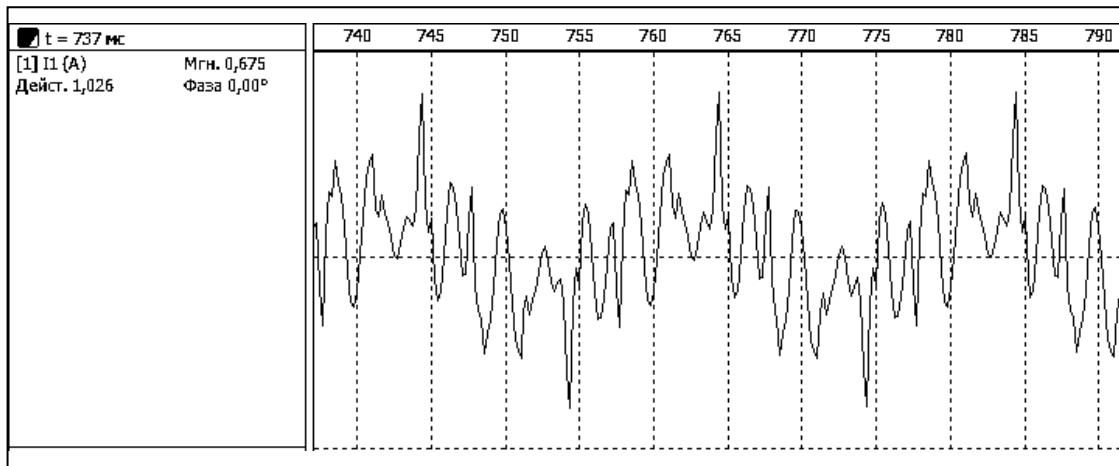


Рисунок 1.6 – Остаточный ток в месте повреждения

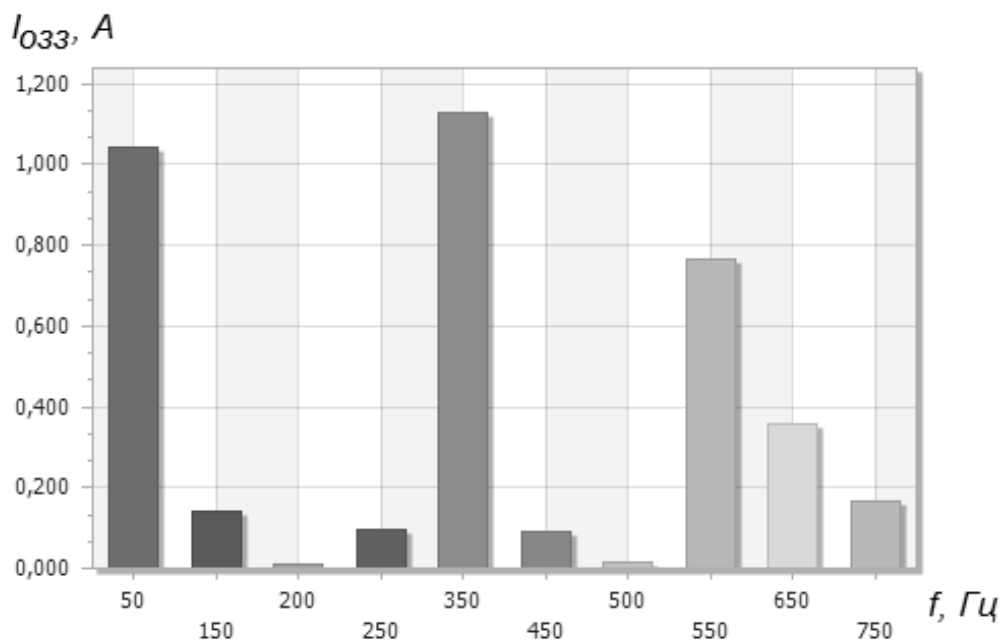


Рисунок 1.7 – Спектральный состав остаточного тока

Анализ оциллограммы и спектрального состава тока показывает, что остаточный ток ОЗЗ содержит существенные высокочастотные составляющие, действующие значения которых сопоставимы с действующим значением составляющей промышленной частоты.

Как видно, в токе ОЗЗ содержатся значительные остаточные составляющие. Необходимо компенсировать полный ток ОЗЗ, включая активную составляющую на частоте сети и составляющие других частот.

1.2 Сравнительный анализ методов и технических средств компенсации тока однофазного замыкания на землю

Защитное шунтирование однофазного замыкания

В условиях, где приходится по условиям пожарной безопасности и взрывобезопасности экстренно устранять электрическую дугу в месте ОЗЗ применяют защитное шунтирование места ОЗЗ (рисунок 1.8) [45].

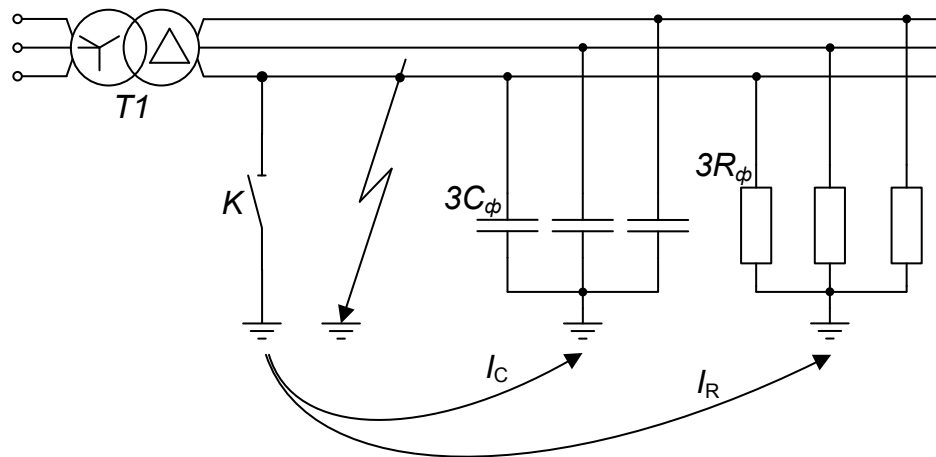


Рисунок 1.8 – Схема замещения сети с защитным шунтированием места ОЗЗ

После возникновения ОЗЗ система управления определяет поврежденную фазу и замыкает соответствующий коммутационный аппарат. Шунтирование места повреждения позволяет снизить ток в месте повреждения за счет того, что часть тока замыкания начинает циркулировать через шунт. В случае дугового перемежающегося ОЗЗ защитное шунтирование позволяет поддержать пониженный уровень напряжения поврежденной фазы, что уменьшает вероятность возникновения повторных электрических пробоев.

Преимуществом защитного шунтирования является то, что его применение позволяет уменьшить полный ток ОЗЗ, включая активную и высшие гармонические составляющие. При этом, в нормальном режиме (отсутствие ОЗЗ) устройство защитного шунтирования не влияет на работу сети.

В качестве недостатков следует отметить зависимость эффективности шунтирования от параметров сети и расстояния от шунта до места повреждения. Применение шунтирования не позволяет уменьшить ток ОЗЗ до нуля вследствие

ненулевых сопротивлений заземлителей и продольных сопротивлений линии [25, 26]. При дуговых перемежающихся замыканиях высокое остаточное напряжение поврежденной фазы может стать причиной повторных пробоев. Кроме того, недостатком является необходимость использования высоковольтных коммутирующих устройств для заземления фазных проводников.

Резонансное заземление нейтрали

Заземление нейтрали через ДГР, предварительно настраиваемый в токовый резонанс с емкостью сети, уменьшает емкостную составляющую тока ОЗЗ в месте повреждения (рисунок 1.9).

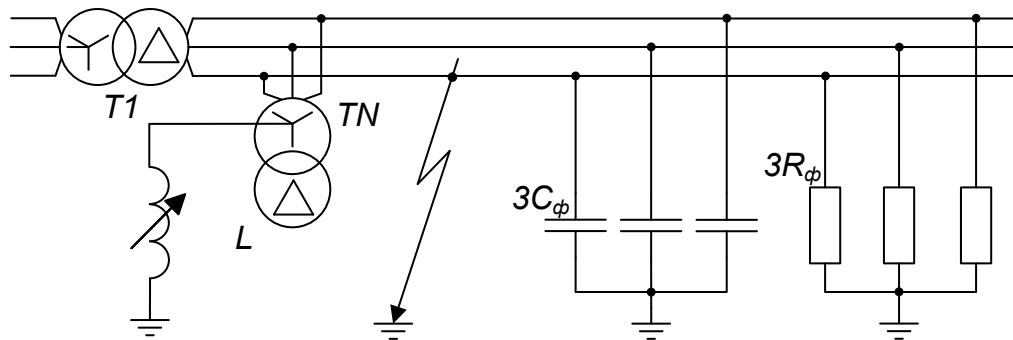


Рисунок 1.9 – Схема замещения сети с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор

Индуктивный ток ДГР циркулирует через место повреждения, нейтрализуя емкостный ток поперечных проводимостей неповрежденных фаз сети [19, 27, 58, 62].

Преимуществом этого метода является его простота [21, 51, 52]. Пассивный ДГР обладает высокой надежностью и не требует сложной автоматики для своей работы [20, 22, 24]. При этом эффективность снижения емкостной составляющей не зависит от расстояния до места повреждения и общей длины присоединений. Кроме того, дугогасящий реактор, настроенный в резонанс с емкостью сети уменьшает кратность кратковременных перенапряжений при ОЗЗ [39, 40, 57].

Среди недостатков следует отметить влияние ДГР на работу сети в нормальном режиме. В случае наличия несимметрии поперечных проводимостей фазных проводников, вследствие резонансных процессов на нейтрали, устанавливается большое напряжение [47, 71].

Компенсация полного тока на основе трансформаторного источника

Существуют решения [2, 6-12, 56], предназначенные для компенсации полного тока ОЗЗ. Принцип их работы основан на дополнении дугогасящего реактора регулируемым трансформаторным источником, генерирующим в нейтраль ток, направленный противоположно активному току ОЗЗ. На рисунке 1.10 показана общая схема решений на основе трансформаторного источника. Трансформатор TL1 с коммутируемой вторичной обмоткой предназначен для выбора фазы генерируемого тока. Подключение источника к нейтрали осуществляется через согласующий трансформатор TL2.

Достоинством решений задачи компенсации полного тока на основе трансформаторных источников является простота и надежность конструкции.

Среди недостатков этих решений наиболее существенным является невозможность точного регулирования компенсирующего тока в широком диапазоне. Также можно отметить, что трансформаторный источник не может осуществлять генерацию токов с частотами, отличными от частоты сети. Это делает невозможным применения данных методов для компенсации высших гармонических составляющих тока ОЗЗ. Дополнительным негативным фактором является использование только одной фазы трехфазного трансформатора TL1, что приводит к неполному использованию установленной мощности оборудования.

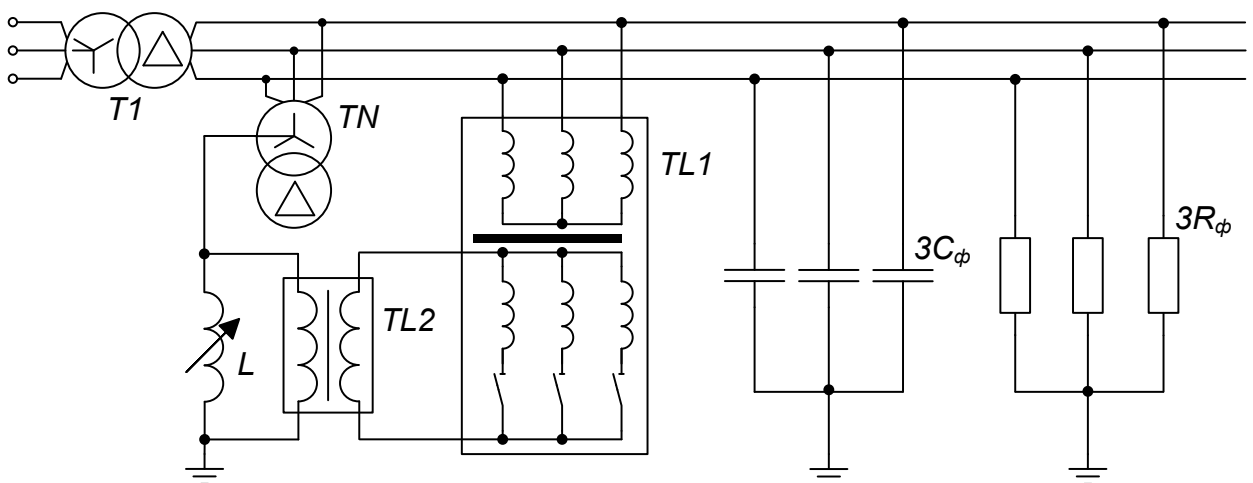


Рисунок 1.10 – Схема замещения сети с компенсацией полного тока на основе трансформаторного источника

Компенсация полного тока на основе тиристорного источника

Недостатки систем компенсации на основе трансформаторных источников стали причиной разработки тиристорных источников для компенсации полного тока ОЗЗ [3-5, 76]. На рисунке 1.11 представлена схема замещения сети с компенсацией полного тока на основе тиристорного источника.

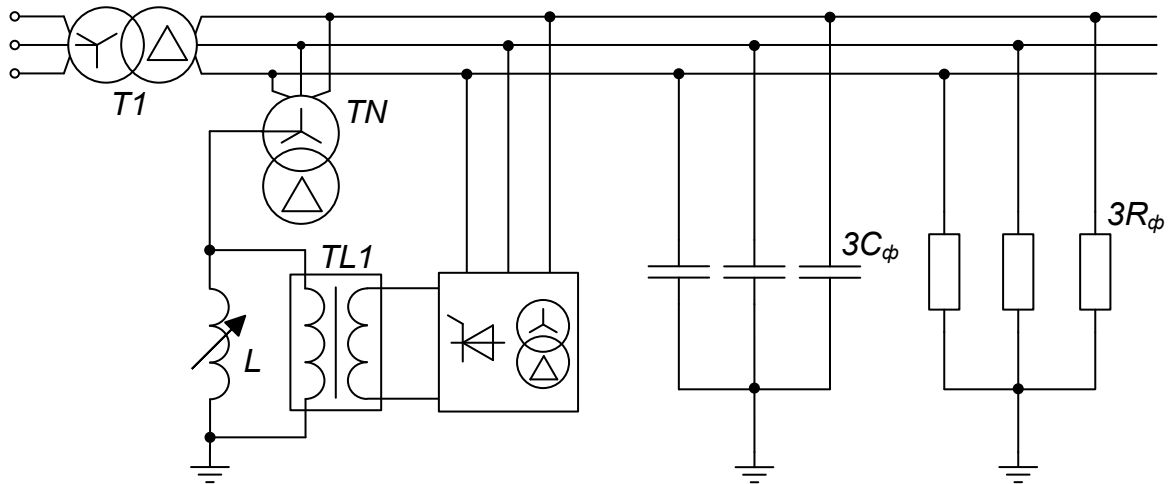


Рисунок 1.11 – Схема замещения сети с компенсацией полного тока на основе тиристорного источника

Принцип их работы аналогичен принципу работы систем с трансформаторными источниками: тиристорный источник генерирует в нейтраль компенсирующий ток, равный по амплитуде и отличающийся знаком от активного тока ОЗЗ. Источник подключается параллельно ДГР при помощи согласующего трансформатора $TL1$.

Достоинством применения тиристорных источников является возможность управления током компенсации в широком диапазоне путем изменения угла коммутации тиристоров.

Главным недостатком таких систем является отсутствие возможности компенсации составляющих тока ОЗЗ, частота которых отлична от частоты сети. Необходимо отметить, что в распределительных сетях класса 6-10 кВ наблюдается рост высших гармонических составляющих при применении тиристорных источников для компенсации. Причиной этого является наличие в

компенсирующем токе, генерируемом источником, дополнительных высших гармонических составляющих, обусловленных коммутацией.

Применение методов компенсации тока ОЗЗ

Наиболее широкое распространение получил метод компенсации тока ОЗЗ путем заземления нейтрали через настроенную в резонанс индуктивность (ДГР). Применение данного метода эффективно снижает емкостную составляющую в месте повреждения. При этом в настоящее время нет сведений о широком практическом применении систем компенсации полного тока ОЗЗ на основе трансформаторных или тиристорных источников.

Активная и высшая гармонические составляющие представляют опасность при ОЗЗ в сетях с большой суммарной протяженностью линий. В сетях с небольшой протяженностью, с током ОЗЗ до 80А, достаточно выполнять компенсацию только емкостной составляющей. В таком случае активная и высшие гармонические составляющие (остаточный ток ОЗЗ), как правило, не превышают в сумме 5А. В случае больших токов ОЗЗ (более 80А) недостаточно компенсировать только емкостную составляющую, требуется компенсировать полный ток ОЗЗ, включая активную составляющую на частоте сети и составляющие, частоты которых отличаются от промышленной.

В настоящее время увеличивается количество сетей с токами ОЗЗ более 80А, в которых применение ДГР оказывается неэффективным для гашения дуги. В связи с этим появляется необходимость разработки новых методов и средств компенсации полного тока замыкания на землю.

1.3 Концепция управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока

Компенсация полного тока в месте повреждения при ОЗЗ должна выполняться при помощи управляемого заземления. Управляемое заземление представляет собой активный управляемый источник, заземляющий нейтраль распределительной сети и способный устанавливать в ней заданный ток.

Генерируемый управляемым заземлением в нейтраль ток направлен противоположно току ОЗЗ. Это позволяет оперативно погасить электрическую дугу и остановить развитие аварии.

Достаточным условием гашения электрической дуги является действующее значение её тока, не превышающее 5А. Выполнение данного условия влечет за собой самопогасание дуги в конце полупериода (при нулевом мгновенном значении тока). После этого начинается процесс увеличения (восстановления) напряжения поврежденной фазы. В случае, когда пробивное напряжение в месте повреждения восстанавливается медленнее напряжения фазы, происходит повторный электрической пробой и возникновение дуги. Для предотвращения этого требуется поддерживать пониженный уровень напряжения (ниже пробивного) в месте повреждения.

Компенсацию полного тока ОЗЗ целесообразно выполнять единой системой управляемого заземления нейтрали, построенной по комбинированной схеме. Наиболее существенную составляющую тока ОЗЗ – емкостную составляющую тока на частоте сети – следует компенсировать с помощью дугогасящего реактора, настраиваемого в резонанс токов с поперечными емкостями сети. Компенсацию остаточного тока следует осуществлять с помощью быстродействующего управляемого источника тока. Такое разделение позволяет уменьшить установленную мощность управляемого источника, который должен подключаться к сети через согласующее устройство (согласующий трансформатор), чтобы обеспечить надежную работу электронной части устройства.

Выводы

1. В распределительных сетях активный ток, обусловленный поперечными активными проводимостями линии, может достигать 10% от полного тока ОЗЗ. Также ток ОЗЗ содержит составляющие, частоты которых отличаются от частоты сети (высшие гармонические составляющие). Эти составляющие тока ОЗЗ могут поддерживать горение дуги, поэтому их необходимо компенсировать.

2. Широко распространённый метод компенсации емкостной составляющей тока ОЗЗ путем заземления нейтрали через дугогасящий реактор принципиально не может обеспечивать компенсацию полного тока.

3. В сетях с небольшой протяженностью, с током ОЗЗ до 80А, допускается выполнять компенсацию только емкостной составляющей. В таких сетях активная и высшие гармонические составляющие (остаточный ток ОЗЗ), как правило, не превышают в сумме 5А. При этом требуется обеспечить высокую точность резонансной настройки реактора.

4. В сетях с токами ОЗЗ более 80А, в которых вероятность устойчивого горения дуги в месте повреждения высока, необходимо обеспечивать компенсацию полного тока ОЗЗ.

5. Компенсация полного тока в месте повреждения при ОЗЗ должна выполняться при помощи управляемого заземления, построенного по комбинированной схеме. Наиболее существенную составляющую тока ОЗЗ – емкостную составляющую тока на частоте сети – следует компенсировать с помощью дугогасящего реактора, настраиваемого в резонанс токов с емкостью сети. Компенсацию остаточного тока следует осуществлять с помощью быстродействующего управляемого источника тока.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИИ ПОЛНОГО ТОКА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

2.1 Метод компенсации полного тока

В соответствии с целевой установкой базовый метод компенсации полного тока ОЗЗ предполагает реализацию его по комбинированной схеме (рисунок 2.1). В основе метода раздельная компенсация емкостной составляющей тока ОЗЗ на частоте сети и остаточного тока, содержащего другие составляющие.

При этом емкостная составляющая тока ОЗЗ на частоте сети, которая, как правило, является основной, компенсируется пассивным элементом – ДГР. А компенсация остаточного тока должна осуществляться управляемым источником, к которому предъявляются особые требования, определяемые параметрами составляющих остаточного тока ОЗЗ. Важным преимуществом раздельной компенсации тока ОЗЗ является возможность использовать управляемый источник сравнительно небольшой мощности и подключать его к сети через трансформаторную развязку [38].

К электрической сети, содержащей несколько присоединений, через нейтралеобразующую обмотку трансформатора собственных нужд (ТСН), подключены управляемый ДГР и управляемый источник тока (УИТ), который получает питание от вторичной обмотки ТСН. В общем случае питание управляемого источника можно осуществлять от отдельного трансформатора.

Выходные сигналы измерительного трансформатора напряжения (ТВ) и трансформаторов тока ТА-1 и ТА-2 поступают на вход системы управления ДГР (СУ ДГР) и на вход системы управления источником тока (СУ УИТ). Логика взаимодействия указанных контуров управления задается программным путем в блоке согласования (БС) систем управления.

Сеть 6-35 кВ

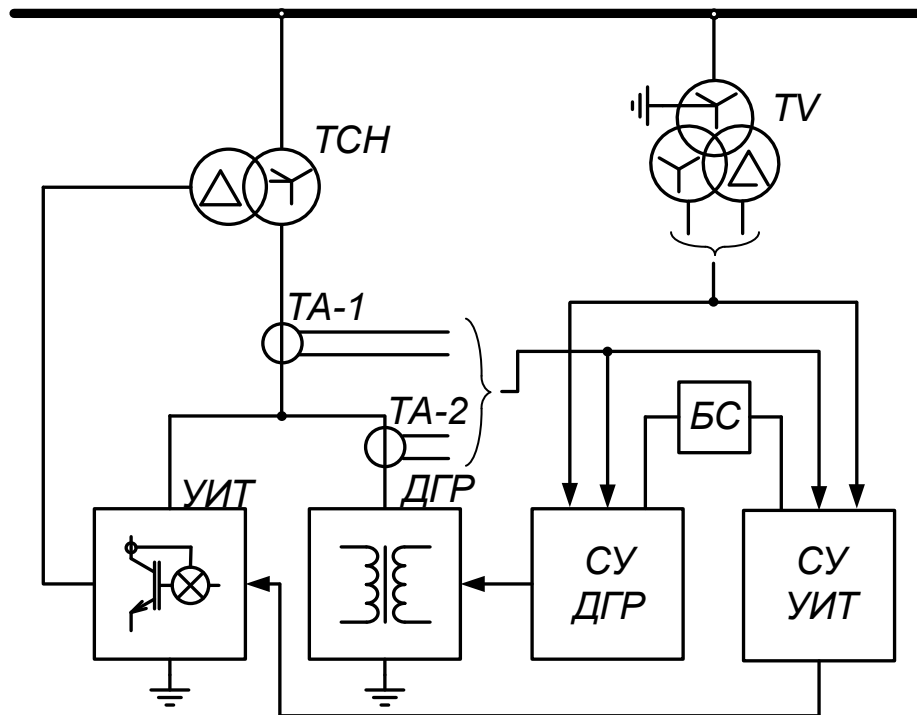


Рисунок 2.1 – Структурная схема управляемого заземления нейтрали сети

В системе управления ДГР обрабатываются входные данные и вычисляются активная, индуктивная, емкостная и полная проводимости контура нулевой последовательности сети. Определяется характеристическая величина, соответствующая рассогласованию между индуктивной и емкостной проводимостями. Сформированный таким образом сигнал рассогласования сравнивается по абсолютной величине с предельным значением, определяющим зону нечувствительности измерительного органа СУ ДГР. Если сигнал рассогласования по уровню выходит за пределы зоны нечувствительности, то он поступает на вход управления индуктивностью ДГР.

В системе управления источником УИТ по факту возникновения ОЗЗ регистрируются осциллограммы входных сигналов. Путем обработки данных во временной и частотной областях вычисляется характеристическая функция, ориентированная относительно опорного сигнала, поступающего с одной из фазных обмоток трансформатора напряжения TV. Сформированный таким образом сигнал, сравнивается по абсолютной величине с граничным значением, определяющим зону нечувствительности системы управления УИТ. Если уровень

сигнала превышает граничное значение, то сформированный им сигнал поступает на управление выходным током УИТ. Управляемый источник тока может быть реализован на основе ШИМ-конвертора с повышенной частотой преобразования электроэнергии и может подключаться к нейтрали непосредственно или через дополнительную обмотку ДГР.

В нормальном установившемся режиме работы сети СУ ДГР производится измерение текущих параметров контура сети с использованием опорного тока, задаваемого блоком согласования БС. Он устанавливает циклический режим работы УИТ, подающего в нейтраль сети опорный ток, частота которого может задаваться кратной частоте сети в соотношении $1/2$ или $1/3$. Это дает возможность отстроиться от негативного влияния шумов промышленной частоты на точность измерений. Отсутствие сигнала на выходе СУ ДГР свидетельствует о том, что значение индуктивности ДГР находится вблизи точки резонансного равновесия и реальная расстройка контура нулевой последовательности (КНП) сети, основными реактивными параметрами которого являются эквивалентная емкость сети и индуктивность ДГР, незначительна и не выходит за пределы заданной зоны нечувствительности.

Если емкость сети изменяется в процессе работы, например, из-за отключения или подключения присоединений (изменения конфигурации), то СУ ДГР формирует сигнал управления реактором, по которому, путем ступенчатого или плавного регулирования индуктивности, ДГР возвращается в точку резонансного равновесия. Таким образом, СУ ДГР постоянно обеспечивает резонансную настройку ДГР.

Факт возникновения ОЗЗ фиксируется СУ УИТ по сигналам, поступающим на ее вход от измерительного трансформатора напряжения TV. С этого момента прерываются действия СУ ДГР, блокируется управление ДГР и источником УИТ, и запускается процесс обработки данных, зафиксированных СУ ДГР на момент возникновения ОЗЗ. Производится вычисление мгновенных значений остаточного тока ОЗЗ, определяемого суммированием двух характерных составляющих.

Первая составляющая включает в себя активный ток КНП сети и его реактивный ток (на основной частоте сети), обусловленный реальной расстройкой КНП на момент возникновения ОЗЗ. Вторая составляющая представляет собой ток, обусловленный неравенством проводимостей фаз относительно земли. Для вычисления первой составляющей тока используются выборки напряжения поврежденной фазы, измеренного относительно нейтрали сети на соответствующей фазной обмотке измерительного трансформатора TV, и полная проводимость КНП сети, измеренная до момента замыкания на землю.

Для вычисления второй составляющей тока используются та же полная проводимость КНП сети и зарегистрированные выборки напряжения на нейтрали, измеренные с помощью обмотки трансформатора напряжения TV, соединенной по схеме «разомкнутый треугольник» до момента замыкания на землю. Затем сформированный пропорционально вычисленному результирующему току сигнал сравнивается по абсолютной величине с порогом чувствительности. Следует отметить, что он задается исходя из условия минимального ущерба от термического действия тока в месте повреждения и невозможности поддерживать опасные перемежающиеся дуговые процессы.

Если при наличии ОЗЗ сигнал на выходе СУ ДГР отсутствует, то это означает, что измеренный косвенным образом результирующий остаточный ток мал и не превышает порога чувствительности. В этом случае ток в цепи ДГР, настроенного предварительно на резонанс, оказывается достаточным для нейтрализации тока в месте повреждения до безопасного уровня. При отсутствии сигнала в цепи управления УИТ его выходная цепь остается обесточенной и сохраняет высокий импеданс, что исключает влияние его на электромагнитные процессы в КНП сети.

Если при наличии ОЗЗ СУ ДГР фиксирует выход сигнала из зоны нечувствительности, то формируется сигнал управления УИТ, и он переводится в режим генерации тока в нейтраль сети. Причем ток УИТ пропорционален измеренному результирующему остаточному току и направлен встречно ему.

В результате в цепи нейтрали устанавливается ток, образуемый наложением тока ДГР, направленного на компенсацию емкостной составляющей тока КНП сети, и тока УИТ, направленного на компенсацию остаточного тока. Остаточный ток включает в себя активную составляющую тока КНП сети и его реактивную составляющую, обусловленную реальной расстройкой КНП сети на момент возникновения ОЗЗ, а также составляющую, обусловленную неравенством проводимостей фаз относительно земли. При этом ток в месте замыкания на землю полностью нейтрализуется, и потенциал поврежденной фазы выравнивается с потенциалом земли. Эти факторы обуславливают возможность снижения до минимума рисков возникновения повторных дуговых замыканий и ущерба от термического воздействия в месте повреждения.

Через интервал времени, программно заданный в БС, режим компенсации прерывается и проверяется возможность самоустранения ОЗЗ. Если устранения ОЗЗ не произошло, то восстанавливается режим компенсации тока ОЗЗ без ограничения длительности времени. Если ОЗЗ самоустранилось, то БС восстанавливает циклический режим генерации УИТ опорного тока и активизирует работу СУ ДГР.

Таким образом, СУ ДГР и СУ УИТ постоянно обеспечивают настройку ДГР и УИТ на компенсацию полного тока ОЗЗ.

Определение параметров сети для целей компенсации полного тока

Ток в месте повреждения, в общем, обусловлен суммарной проводимостью фазных сопротивлений и емкостей относительно земли и проводимостью реактора (рисунок 2.2):

$$i_{033} = i_L + i_{CB} + i_{CA} + i_{RB} + i_{RA} + i_{R_n} \quad (2.1)$$

где i_L – ток дугогасящего реактора; i_{CA} и i_{CB} – емкостные токи неповрежденных фаз на землю; i_{RB} и i_{RA} – токи активных утечек неповрежденных фаз на землю; i_{R_n} – эквивалентное активное сопротивление цепей заземления.

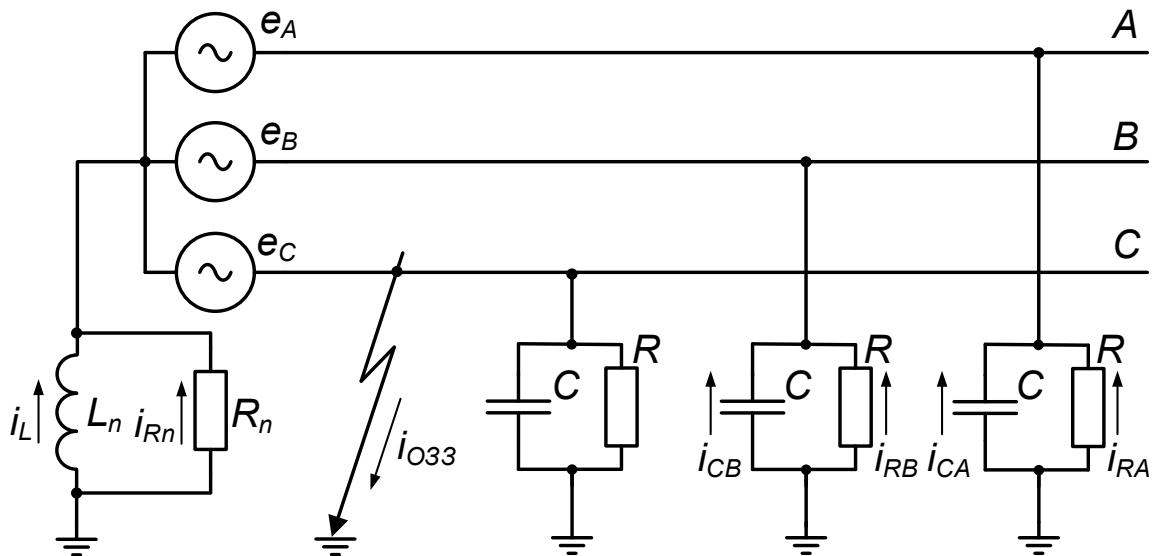


Рисунок 2.2 – Схема замещения компенсированной сети при ОЗЗ

При возникновении ОЗЗ измеряется (косвенным методом) остаточный ток в месте замыкания на землю. Измеренный ток ОЗЗ сравнивается с пороговым уровнем, и, в случае превышения порогового уровня, система управляет дополнительным источником и регулирует его ток до полной компенсации тока ОЗЗ.

Остаточный ток определяется путем суммирования отдельных составляющих тока, циркулирующих через место замыкания на землю. На рисунке 2.3 представлена схема замещения сети с управляемым заземлением нейтрали, отличающимся от компенсированной нейтрали наличием управляемого источника тока и RC-цепи, которые подключены параллельно дугогасящему реактору.

Для определения параметров сети используется импульсный метод анализа, заключающийся в том, что система управления генерирует возмущающие импульсы в нейтраль и анализирует переходный процесс в контуре нулевой последовательности, вызванный данным возмущением [59].

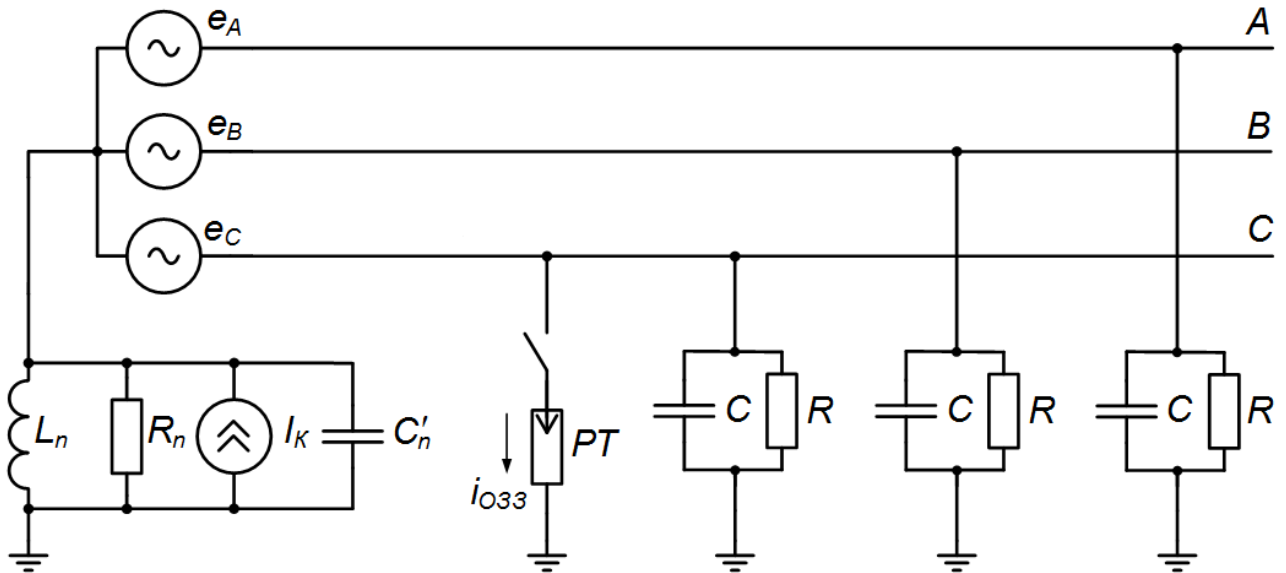


Рисунок 2.3 – Схема замещения сети с управляемым заземлением нейтрали

Схема КНП сети с управляемым заземлением приведена на рисунке 2.4.

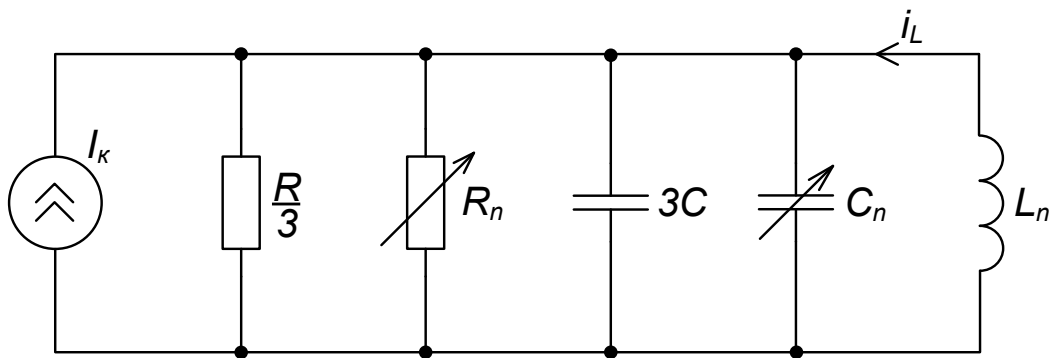


Рисунок 2.4 – Схема контура нулевой последовательности сети с управляемым заземлением нейтрали

Ток дугогасящего реактора, в случае нулевого значения тока источника I_k описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$L(3C + C'_n) \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{L}{\left(\frac{3}{R} + \frac{1}{R_n}\right)} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{L(3C + C'_n)} i_L = 0; \quad (2.2)$$

где C – поперечная емкость фазы; R – поперечное активное сопротивление фазы; L – индуктивность дугогасящего реактора; C'_n – дополнительная емкость, подключаемая в нейтраль; R_n – дополнительное сопротивление, включаемое в нейтраль; i_L – ток дугогасящего реактора.

Частное решение уравнения (2.2) является импульсной переходной функцией контура нулевой последовательности и имеет вид:

$$i_L(t) = I e^{-\frac{t}{T}} \sin(\omega_{CB} t + \varphi) \quad (2.3)$$

где $\omega_{CB} = \sqrt{\frac{1}{3CL} - \frac{1}{(6RC)^2}}$ – угловая частота свободных колебаний;

$T = 6RC$ – постоянная времени затухания свободных колебаний.

Падение напряжения на дугогасящем реакторе (напряжение нейтрали) описывается в функции времени как производная выражения (2.3) по времени, умноженная на индуктивность. При этом значения угловой частоты свободных колебаний и постоянной времени затухания свободных колебаний останутся неизменными. Анализ переходного процесса по падению напряжения на дугогасящем реакторе позволяет опытным путем получить значения данных параметров.

Изменение емкости и сопротивления, включенных параллельно реактору, изменяет параметры контура нулевой последовательности. Изменение параметров КНП с последующим анализом импульсной переходной функцией контура нулевой последовательности позволяет записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{3CL} - \frac{1}{(6RC)^2}} \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{(3C + C'_n)L} - \frac{1}{(2R(3C + C'_n))^2}} \\ T = 6RC \end{cases} \quad (2.3)$$

где ω_1 – угловая частота КНП без дополнительной емкости; ω_2 – угловая частота КНП с дополнительной емкостью.

Решение системы уравнений (2.3) относительно R, L и C дает полную информацию о контуре нулевой последовательности.

В режиме однофазного замыкания на землю емкостная составляющая тока в месте повреждения во времени описывается выражением:

$$i_C(t) = 3C \frac{du_N(t)}{dt} \quad (2.4)$$

где $u_N(t)$ – измеряемое во время ОЗЗ мгновенное значение напряжения нейтрали.

Выражение для активного тока в месте повреждения:

$$i_R(t) = \frac{3u_N(t)}{R} \quad (2.5)$$

Индуктивность дугогасящего реактора, в отличие от других параметров схемы замещения, является нелинейным элементом. Вследствие этого, вычисление индуктивной составляющей тока $i_L(t)$ и индуктивности КНП, по аналогии с другими параметрами, в реальных условиях, практически, невозможно. Поэтому ток индуктивности целесообразно (и практически возможно) измерять непосредственно с помощью трансформатора тока, установленного в цепи ДГР.

Ток в месте повреждения, представляющий собой сумму активной, емкостной и индуктивной составляющей на основной частоте сети, используется в качестве сигнала задания управляемого источника тока. При превышении результирующим током ОЗЗ заданного порогового уровня ток источника устанавливается пропорциональным ему, а в случае, когда результирующий остаточный ток не превышает заданный пороговый уровень, ток источника устанавливается равным нулю.

Гашение дуги в месте повреждения при дуговом ОЗЗ

Дуговые ОЗЗ отличаются от устойчивых непрекращающимся изменением проводимости места повреждения во времени. Эти изменения влекут за собой соответствующие изменения напряжения поврежденной фазы относительно земли, которое является одним из наиболее важных факторов, вызывающих возникновение электрических пробоев места ОЗЗ.

Система управления, в случае возникновения замыкания, определяет поврежденную фазу и регулирует ток источника, используя напряжение поврежденной фазы как ошибку регулирования (рисунок 2.5).

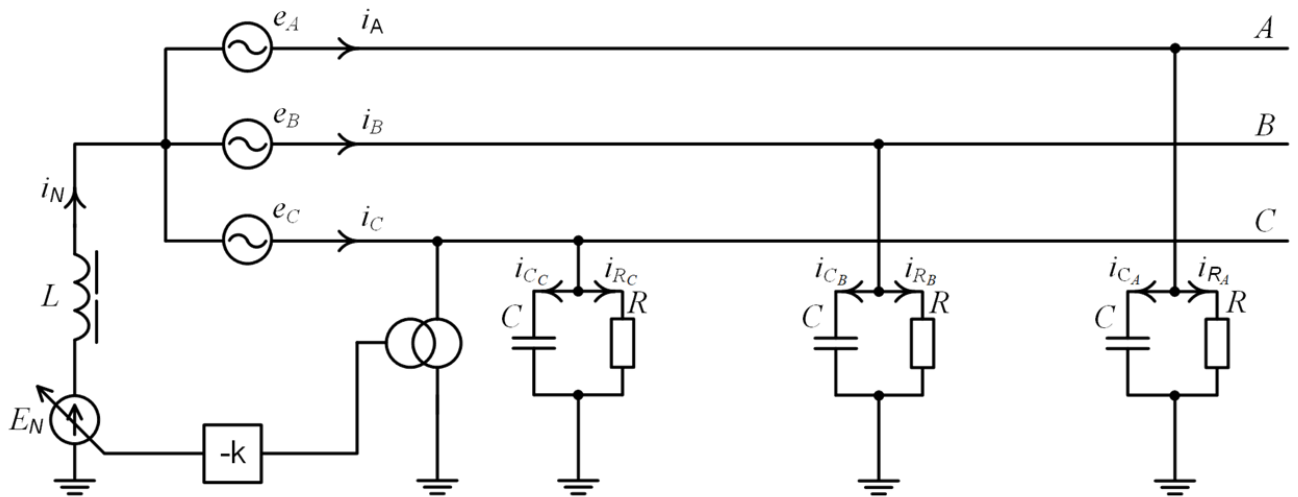


Рисунок 2.5 – Схема замещения сети с системой компенсации полного тока в режиме гашения дуги

Регулирование осуществляется на интервалах времени, когда дуга отсутствует (погасла) в месте повреждения. Если дуга погасла, то увеличивается ток компенсации, что приводит к уменьшению напряжения поврежденной фазы относительно земли. Снижение напряжения поврежденной фазы, а, следовательно, и напряжения в месте замыкания является достаточным условием предотвращения повторных электрических пробоев и прекращения дальнейшего развития аварии.

Кроме этого достигается эффект симметрирования сети.

Традиционно задача симметрирования решается путем транспозиции фазных проводов, при этом выравнивание проводимостей должно осуществляться для каждой отходящей линии отдельно. Вследствие высокой стоимости работ по транспозиции, а также того, что степень несимметрии начинает создавать проблемы в работе сети только после установки в нейтраль дугогасящего реактора и его настройки в резонанс с поперечными емкостями сети, мероприятия по симметрированию фазных проводимостей проводятся не всегда.

Симметрирование возможно реализовать по-другому. Например, путем уменьшения добротности КНП за счет установки высоковольтного резистора в цепь заземления нейтрали. При этом установка резистора влечет за собой

увеличение активной составляющей тока в месте повреждения, что уменьшает полезный эффект от применения резонансного заземления нейтрали.

Возможно переключение режима регулирования источника тока с регулирования по напряжению поврежденной фазы на напряжение реактора. Это снижает напряжение смещения нейтрали, практически, до нуля относительно земли независимо от степени несимметрии сети. Это решение позволяет сохранить добротность КНП сети неизменной, в отличие от установки резистора заземления нейтрали.

После перехода системы в режим симметрирования, напряжение на нейтрали становится близким к нулю. Работа системы в данном режиме в течение продолжительного времени нежелательна, так как при этом будет подавляться любая генерация тока в нейтраль, что влияет на работу других элементов системы компенсации, например, на работу алгоритма импульсного анализа параметров контура нулевой последовательности. Для минимизации времени нахождения в режиме с обратной связью по напряжению нейтрали и возможности сохранения способности симметрирования сети спектральный состав тока симметрирования сохраняется в системе управления. После сохранения система продолжает генерацию тока, используя в качестве задания для источника тока восстановленный из сохраненного спектрального состава сигнал.

В случае изменения конфигурации сети (включение/отключение отходящих присоединений) соотношение емкостей фаз относительно земли изменится, что приведет к изменению напряжения на нейтрали. Если уровень несимметрии выйдет за пределы, ограниченные величиной зоны нечувствительности, то процесс коррекции и сохранения тока симметрирования повторяется.

2.2 Математическая модель сети с управляемым заземлением нейтрали сети

Схема замещения и параметры сети

Для исследования процессов компенсации полного тока ОЗЗ использована схема замещения сети (рисунок 2.6), все параметры которой приведены к ступени напряжения сети. В схеме учтены все основные параметры, которые оказывают

существенное влияние на процессы ОЗЗ и компенсации полного тока в месте ОЗЗ. При этом принято, что исходно, до момента возникновения ОЗЗ, сеть симметрична по продольным и поперечным параметрам, а фазные э.д.с. представляют собой гармонические функции одной частоты:

$$\begin{aligned}
 C_a &= C_b = C_c = C; \\
 R_a &= R_b = R_c = R; \\
 r_{fA} &= r_{fB} = r_{fC} = r_f; \\
 L_{fA} &= L_{fB} = L_{fC} = L_f; \\
 e_A(t) &= e_{fm} \cdot \sin \omega t; \\
 e_B(t) &= e_{fm} \cdot \sin(\omega t + 120^\circ); \\
 e_C(t) &= e_{fm} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ).
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Здесь: $e_A(t), e_B(t), e_C(t)$ – фазные э.д.с.; e_{fm} – амплитудное значение напряжения; $L_{fA}, L_{fB}, L_{fC}, L_f$ – продольные индуктивности фаз; $r_{fA}, r_{fB}, r_{fC}, r_f$ – продольные активные сопротивления фаз; C_a, C_b, C_c, C – распределенные емкости фаз относительно земли; R_a, R_b, R_c, R – распределенные сопротивления утечек фаз на землю; ω – угловая частота э.д.с. сети.

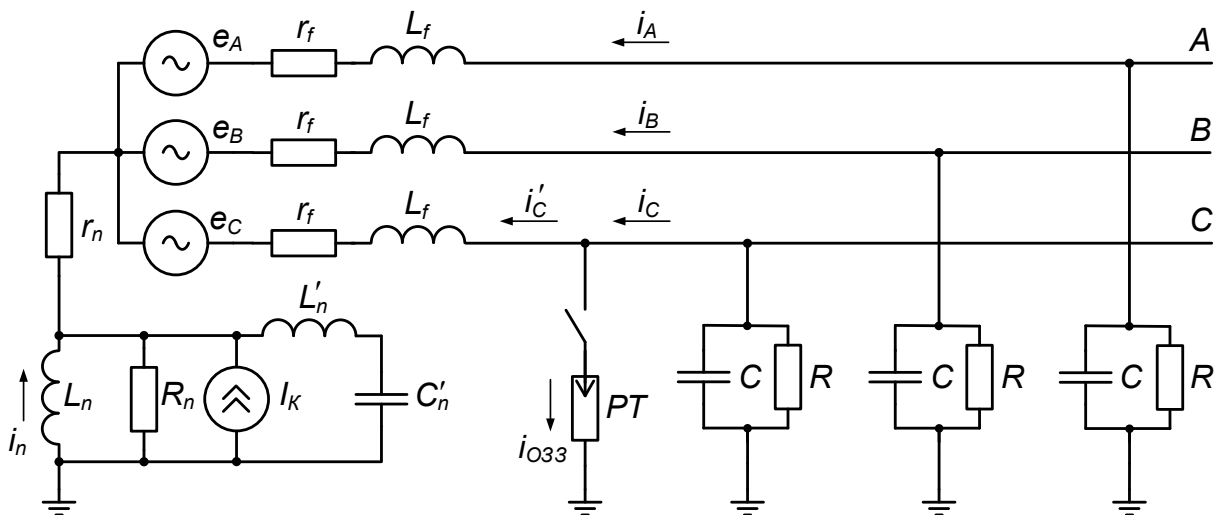


Рисунок 2.6 – Схема замещения распределительной сети с управляемым заземлением нейтрали сети при ОЗЗ

На основании схемы замещения сети (рисунок 2.6), содержащей наиболее значимые для процессов ОЗЗ параметры, сформирована система дифференциальных уравнений сети при ОЗЗ:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{033} = i_A + i_B + i_C + i_n; \\ e_C - e_B = -i'_C r_f - L_f \frac{di'_C}{dt} - U_{C0} + U_{B0} + L_f \frac{di_B}{dt} + i_B r_f; \\ e_B - e_A = -i_B r_f - L_f \frac{di_B}{dt} - U_{B0} + U_{A0} + L_f \frac{di_A}{dt} + i_A r_f; \\ e_A = -i_A r_f - L_f \frac{di_A}{dt} - U_{A0} + U_n; \\ i_C = i'_C + i_{033}; \\ 0 = U_{C0} + i_{033} R_{033}. \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Здесь: e_A, e_B, e_C – фазные ЭДС; i_A, i_B, i_C – фазные токи; i_n – ток нейтрали; i_{033} – ток в месте повреждения; i'_C – ток активно-емкостной проводимости поврежденной фазы на землю; U_{A0}, U_{B0}, U_{C0} – падения напряжений на распределенных емкостях и активных проводимостях фаз относительно земли; U_n – падение напряжения на нейтрали сети; r_f, L_f – продольное эквивалентное, соответственно, активное сопротивление и индуктивность фазы.

Первое уравнение системы (2.7) составлено по 1-му закону Кирхгофа для узла, связанного с землей. Второе и третье уравнения записаны для контуров, содержащих линейные э.д.с. $A-B$ и $B-C$. Четвертое уравнение относится к фазе A и цепям заземления. Место повреждения, как правило, имеет ненулевое сопротивление, и ток в поврежденной фазе делится между местом повреждения и активно-емкостной проводимостью фазы относительно земли. Это учтено в пятом и шестом уравнениях системы.

Модель места повреждения при ОЗЗ

Процессы возникновения ОЗЗ разнообразны и могут иметь, как устойчивый (например, металлическое ОЗЗ), так и неустойчивый (например, дуговое или перемежающееся ОЗЗ) характер.

В распределительных сетях зажигание дуги может происходить вследствие электрического, теплового пробоя и пробоя, вызванного частичными разрядами в изоляционном материале кабеля [14].

Электрический пробой может происходить в результате импульсного воздействия высокого напряжения на изоляцию. При этом носителями заряда,

приводящими к повреждению изоляции, являются электроны. Небольшое количество свободных электронов движется в электрическом поле, создаваемом высоким напряжением, вследствие чего приобретает энергию, достаточную для ионизации нейтральной частицы [22]. В результате ионизации образуется два электрона и один положительный ион. При ионизации каждой следующей частицы количество отрицательно заряженных электронов вдвое больше положительных ионов. Электроны движутся в направлении анода, при этом движение сопровождается увеличением их количества вследствие серии процессов ионизации. Положительные ионы, возникающие в результате ионизации, движутся по направлению к катоду и также выбивают из него новые электроны. Условием пробоя является равенство количества выбитых из катода электронов начальному количеству электронов [69].

В основе механизма теплового пробоя лежит неконтролируемый рост температуры некоторой области диэлектрика. Напряжение, прикладываемое к диэлектрику, обуславливает потери, прямо пропорциональные тангенсу угла диэлектрических потерь ($tg \delta$). Так как при высоких температурах возможен рост $tg \delta$, в свою очередь приводящий к еще большим потерям в диэлектрике и росту температуры. Данное неустойчивое температурное состояние диэлектрика становится причиной его теплового разрушения.

Под воздействием электрического поля высокой напряженности в толще неоднородного диэлектрического материала могут возникать частичные разряды. Они представляют собой пробой отдельных участков (слоев) изоляции вследствие ионизации газовых включений в изоляции или в пропитывающей жидкости. Единичный частичный разряд не представляет опасности, так как не вызывает разрушения по всей толщине изоляции. Однако длительное воздействие частичных разрядов приводит к структурным изменениям диэлектрика, нагреву и ухудшению электрических характеристик и, как следствие, к пробоям изоляции.

В первом приближении электрическую дугу можно представить активным сопротивлением. При этом ВАХ дуги будет представлять собой прямую линию, описываемую выражением:

$$i_D(u_D) = \frac{u_D}{r_D}; \quad (2.8)$$

где u_D – напряжение дуги; r_D – сопротивление дуги.

Недостаток такого описания дуги состоит в том, что невозможно воспроизвести её гашение, так же, как и повторное зажигание после гашения.

Возможно описание дуги линейной функцией двух переменных с конечными разрывами первого рода:

$$i_D(u_D, u_{пр}) = \begin{cases} 0 & (\text{при } u_D < u_{пр} \wedge i_D = 0) \\ \frac{u_D}{r_D} & (\text{при } I_D > I_{гД} \vee u_D \geq u_{пр}); \end{cases} \quad (2.9)$$

где I_D – действующее значение тока дуги; $I_{гД}$ – действующее значение тока, при котором происходит гашение дуги; $u_{пр}$ – пробивное напряжение дуги.

Это выражение дает возможность воспроизвести процесс гашения и зажигания электрической дуги. Если ток в дуге больше тока удержания или текущее напряжение выше пробивного (выполняется условие $I_D > I_{гД} \vee u_D \geq u_{пр}$), то дуга представляется активным сопротивлением r_D . В противном случае дуга погаснет при нулевом мгновенном значении тока i_D .

Описание электрической дуги выражением (2.9) не позволяет учесть влияние температуры канала разряда на сопротивление дуги. При увеличении температуры возрастает степень ионизации плазмы дуги, вследствие чего увеличивается электрическая проводимость. Семейство типичных ВАХ дуги для различных температур ($t_1 < t_2 < t_3$) показано на рисунке 2.7.

Статическую ВАХ дуги можно представить аналитически. Процесс горения открытой дуги (например, дуга на воздушной ЛЭП) описывается выражением для напряженности её электрического поля (2.10) [69].

$$E(i_D) \approx \frac{92}{\sqrt{i_D}} \quad (2.10)$$

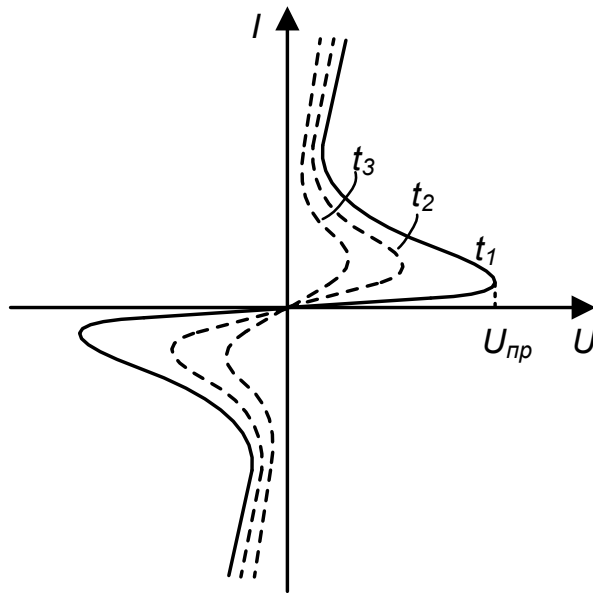


Рисунок 2.7 – Семейство типичных вольт-амперных характеристик электрической дуги

При горении дуги в узком канале (например, при пробое изоляции кабеля) отвод тепла от дугового разряда происходит менее эффективно, чем в случае горения открытой дуги. Вследствие этого сопротивление дуги в канале всегда меньше, чем у открытой дуги. Напряженность электрического поля дуги в узком канале описывается выражением [69]:

$$E(i_D) \approx \frac{92}{\sqrt{i_D}} + 0.312\sqrt{i_D} \cdot \delta^{\frac{2}{3}}; \quad (2.11)$$

Напряжение электрической дуги рассчитывается как произведение длины дуги на ее напряженность [69]:

$$u_D = E(i_D) \cdot l_D; \quad (2.12)$$

где l_D – длина столба дуги.

Приведенные модели дают возможность приближенного описания электрической дуги. В реальных условиях процессы, протекающие при горении дугового разряда, затруднительно описать аналитически вследствие влияния на них множества факторов.

Классификация реальных пробоев на тепловой, электрический и вызванный частичными разрядами является условной. В реальности пробой изоляции

являются смешанными [14]. Причиной этого является тот факт, что любой пробой твердого диэлектрика приводит к возникновению канала разряда. Это означает, что в некоторой области изоляционный материал переходит из твердого вещества в состояние высокотемпературного ионизированного газа. Такой переход возможен только при значительном перегреве диэлектрика за счет рассеивания им мощности. Из этого следует, что в любом пробое протекают процессы, соответствующие как электрическому, так и тепловому пробую.

Также затруднительным является описание процесса изменения сопротивления дуги с учетом влияния скорости изменения её тока. Статическая характеристика дуги показывает связь напряженности электрического поля с током в случае бесконечно медленного изменения тока. При этом считается, что температура дуги принимает равновесное значение, соответствующее току дуги [69]. При бесконечно быстром изменении тока температура дуги (следовательно, и сопротивление) остается неизменной вследствие инерционности тепловых процессов. ВАХ дуги принимает вид ВАХ омического сопротивления. В случае конечной скорости изменения тока характеристика дуги имеет некоторую промежуточную между статической и резистивной форму.

Особенностью электрических дуг, возникающих в месте повреждения при ОЗЗ в сетях 6-35 кВ, является сравнительно малый ток, циркулирующий через них. В отличие от замыканий в сетях других классов напряжения, ток ОЗЗ в сетях 6-35 кВ ограничен высоким сопротивлением контура нулевой последовательности сети.

В соответствии со статической характеристикой дуги, уменьшение её тока влечет за собой увеличение сопротивления и, как следствие, полное гашение. При токах больше 5 А, в конце каждого полупериода скорость изменения тока максимальна. В этом случае сопротивление дуги не успевает увеличиваться до значений, при которых возможно погасание дуги. Вследствие этого при токах больше 5А дуга считается устойчивой (стационарный режим дуги) и не гаснет при нулевом мгновенном значении тока. Осциллограмма тока дуги, полученная с помощью физического моделирования, показана на рисунке 2.8.

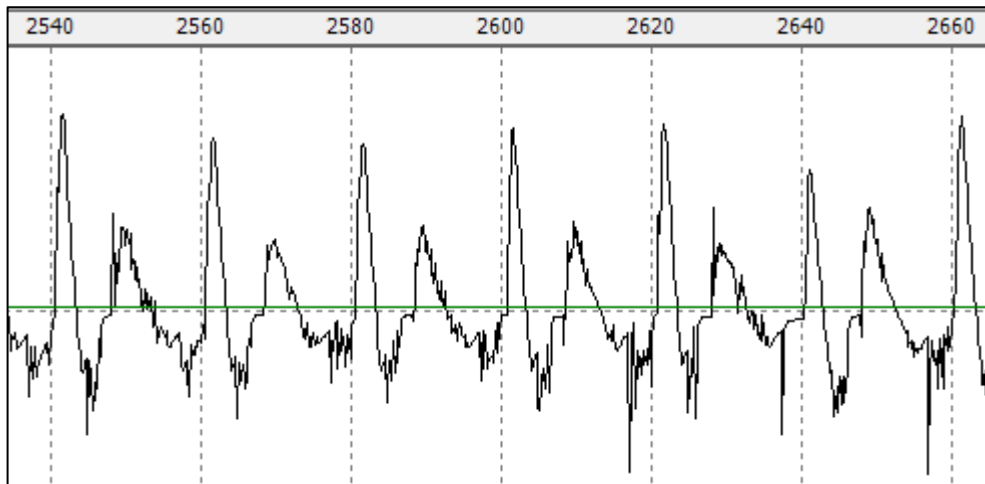


Рисунок 2.8 – Осциллограмма тока устойчивой дуги

При токах меньше 5А, скорость изменения тока сопоставима со скоростью изменения температуры столба дуги. Вследствие этого имеется высокая вероятность гашения дуги в конце каждого полупериода, обусловленная резким ростом сопротивления при уменьшении тока. Если после гашения дуги пробивное напряжения места повреждения восстанавливается медленнее, чем напряжение поврежденной фазы, происходят повторные пробои (нестационарный режим дуги). Замыкание, сопровождающееся такими сериями пробоев, называется перемежающимся ОЗЗ. Ток дуги при перемежающемся ОЗЗ показан на осциллограмме, полученной с помощью физического моделирования (рисунок 2.9).

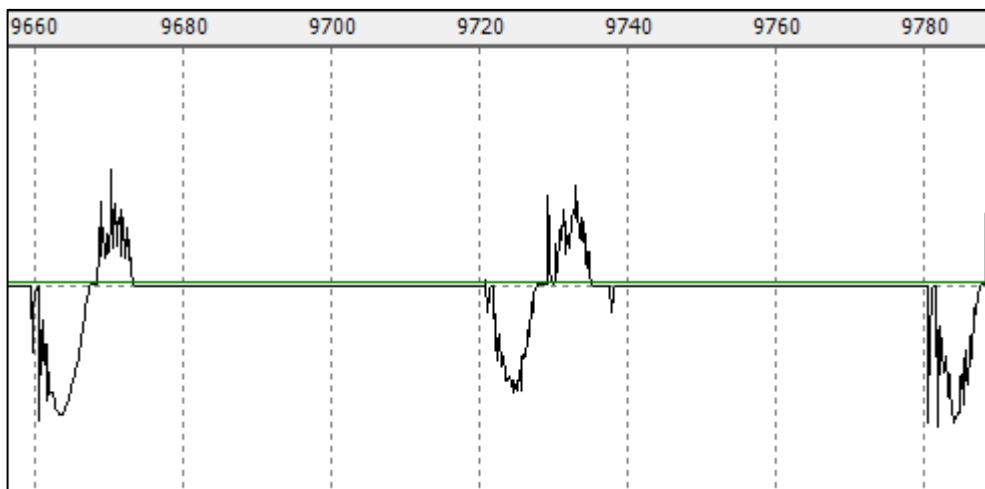


Рисунок 2.9 – Осциллограмма тока перемежающейся дуги

Данная осциллограмма получена при горении дуги в изоляции кабеля из сшитого полиэтилена (горение дуги в узком канале). Причиной медленного восстановления пробивного напряжения является малая скорость уменьшения степени ионизации и температуры плазмы в закрытом канале.

Частным случаем нестационарного режима дуги являются одиночные пробои изоляции. Процессы, протекающие при одиночных пробоях, идентичны процессам при перемежающейся дуге. Главное отличие состоит в отсутствии повторных электрических пробоев. Причиной этого является высокая скорость восстановления пробивного напряжения в месте повреждения вследствие быстрого остывания дуги и уменьшения степени ионизации. На рисунке 2.10 показаны результаты физического моделирования одиночного пробоя.

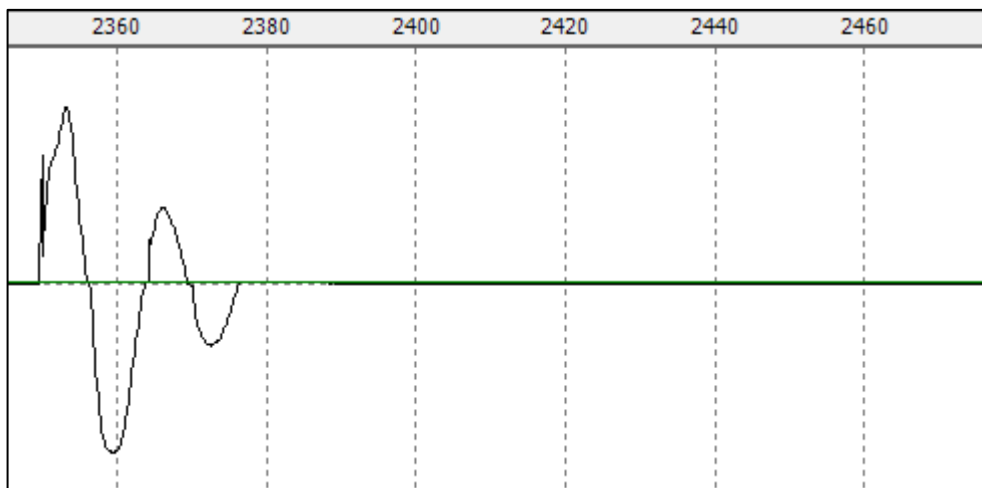


Рисунок 2.10 – Осциллограмма тока при одиночном пробое

Данный одиночный пробой получен на роговом разряднике. Горение дуги в воздухе обуславливает эффективный отвод тепла от неё и быстрое восстановление пробивного напряжения даже при токе, превышающем ток перемежающегося ОЗЗ.

Анализ механизмов образования пробоев и математических моделей горения дугового разряда позволяет сформулировать основные принципы гашения дуги.

Высокая скорость изменения тока при близких к нулю мгновенных значения тока дуги способствует возникновению стационарного режима её

горения. При токах большей частоты (высшие гармонические составляющие) достаточно меньшего действующего значения для поддержания устойчивого горения. Следовательно, гашение дуги предполагает уменьшение составляющих тока, как с частотой сети, так и высших гармонических составляющих.

После гашения дуги возникает задача предотвращения повторных пробоев. Особую значимость эта задача приобретает при ОЗЗ в кабельных линиях – горение дуги в узком канале твердого диэлектрика препятствует быстрому уменьшению степени ионизации. Поэтому уменьшение напряжения в месте повреждения дает возможность нейтрализовать дугу на ранней стадии и предотвратить ее развитие.

2.3 Алгоритмы действия управляемого заземления нейтрали сети

Алгоритм определения факта ОЗЗ

Поскольку система управляемого заземления использует разные принципы управления током компенсатора при перемежающемся дуговым и устойчивом замыканиях, то для корректной работы системы, кроме определения факта замыкания, требуется определить его характер. Блок схема алгоритма определения факта и характера ОЗЗ представлена на рисунке 2.11.

Определение характера ОЗЗ выполняется путем анализа переходного процесса по напряжению нулевой последовательности. Характерные для перемежающегося дугового ОЗЗ броски напряжения выявляются и анализируются модулем распознавания. Модуль распознавания бросков работает непрерывно и к моменту начала работы компенсатора остаточного тока его алгоритмы уже имеют данные о характере ОЗЗ.

Время работы алгоритма не превышает одного периода колебаний промышленной частоты. Информация о наличии ОЗЗ и его характере используются другими алгоритмами для выполнения точной компенсации.

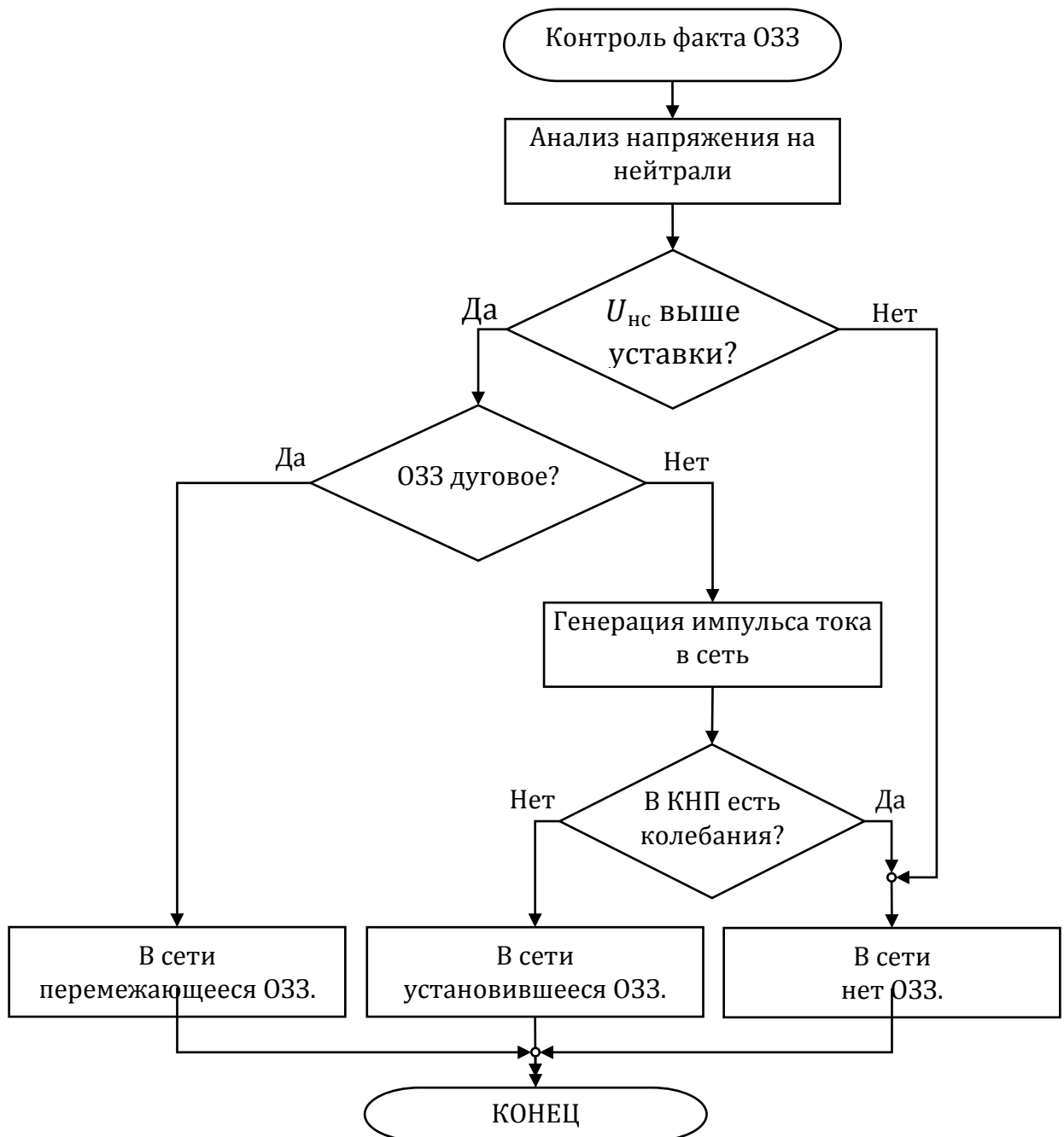


Рисунок 2.11 – Алгоритм определения факта ОЗЗ в сети

Алгоритм гашения дуги при перемежающемся дуговом ОЗЗ

Блок схема алгоритма гашения дуги при перемежающемся дуговом замыкании представлена на рисунке 2.12. При наиболее часто встречающемся перемежающемся дуговом однофазном замыкании на землю напряжение поврежденной фазы изменяется, вследствие изменения сопротивления электрической дуги, в широких пределах.

Такое изменение позволяет использовать напряжение поврежденной фазы в качестве ошибки регулирования при формировании сигнала задания тока, генерируемого в нейтраль для компенсации. При дуговом ОЗЗ главной проблемой являются кратковременные перенапряжения высокой кратности, обусловленные попеременным зажиганием и гашением дуги. Целью работы данного алгоритма является не уменьшение тока, циркулирующего через место повреждения, а гашение электрической дуги и поддержание условий, не допускающих её повторного зажигания. Следствием гашения дуги (уменьшения её проводимости до нуля), в свою очередь, является снижения тока однофазного замыкания до нуля.

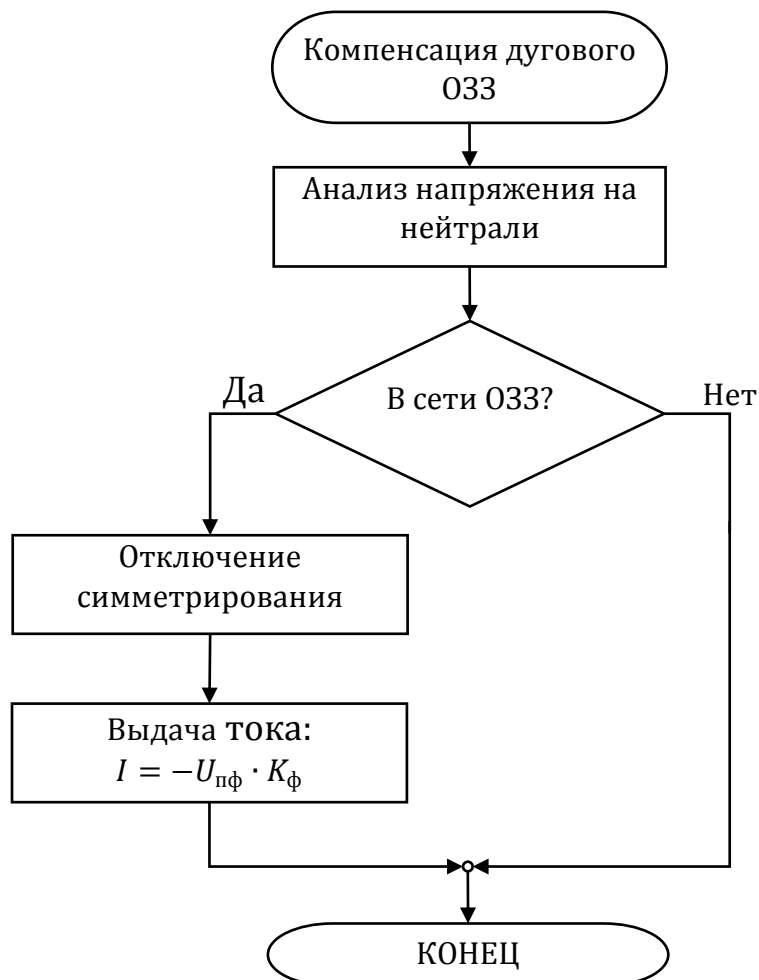


Рисунок 2.12 – Алгоритм компенсации полного тока дугового ОЗЗ

Регулирование тока компенсации осуществляется по пропорциональному закону:

$$I = -U_{\text{пф}} \cdot K_{\phi}; \quad (2.13)$$

где $U_{\text{пф}}$ – напряжение повреждённой фазы относительно земли; K_{ϕ} – коэффициент пропорциональности регулятора.

Алгоритм компенсации полного тока при устойчивом ОЗЗ

Блок схема алгоритма компенсации полного тока при устойчивом ОЗЗ представлена на рисунке 2.13.

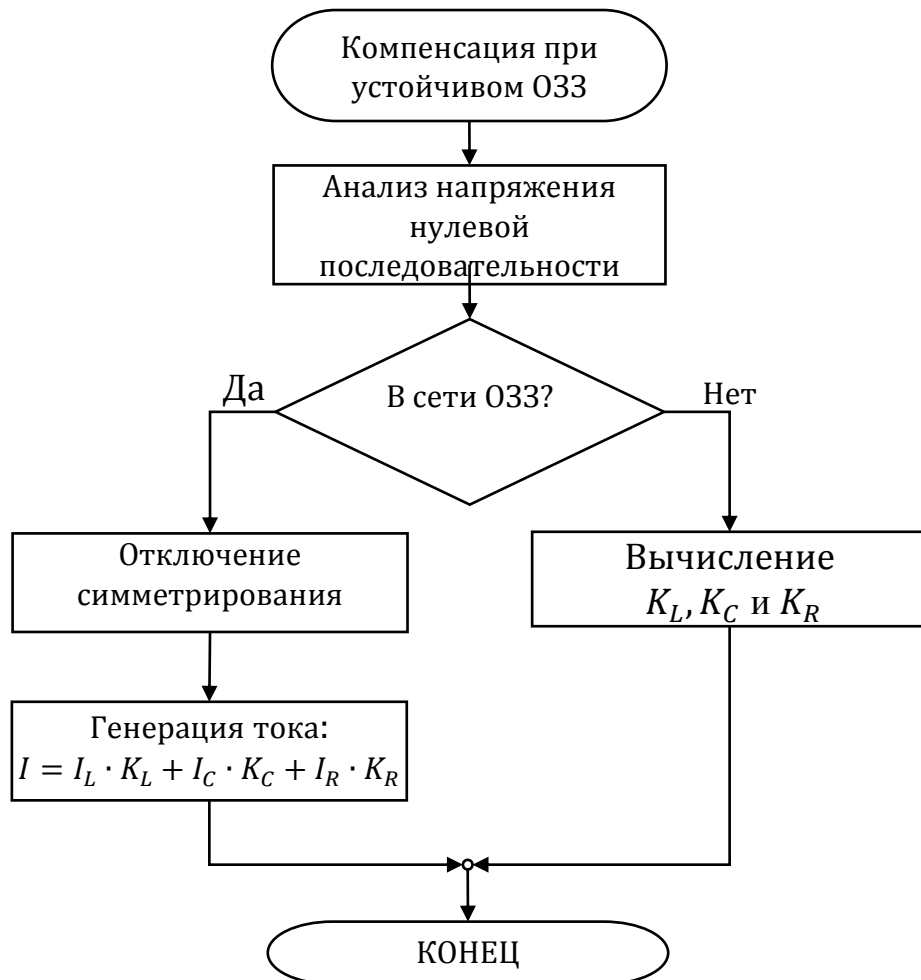


Рисунок 2.13 – Алгоритм компенсации полного тока устойчивого ОЗЗ

В случае устойчивого (металлического) однофазного замыкания на землю управляемый источник генерирует ток, используя вычисленные в нормальном режиме параметры сети.

Для определения тока в месте повреждения по результатам косвенных измерений используются три сигнала: сигнал от трансформатора тока дугогасящего реактора (для анализа формы и амплитуды индуктивной составляющей тока в месте замыкания); сигнал от трансформатора тока емкости, включенной в нейтраль (для анализа формы емкостного тока в место замыкания); сигнал от трансформатора тока резистора, включенного в нейтраль.

Результирующий сигнал получается путем приведения сигналов I_L , I_C и I_R с помощью весовых коэффициентов K_L , K_C и K_R :

$$I = I_L * K_L + I_C * K_C + I_R * K_R. \quad (2.14)$$

Генерация вычисленного тока в контур нулевой последовательности позволяет снизить ток в месте замыкания практически до нуля.

Алгоритм симметрирования сети

Блок схема алгоритма работы системы в режиме симметрирования сети представлена на рисунке 2.14. Алгоритм симметрирования нейтрали представляет собой последовательность действий по определению факта отсутствия ОЗЗ в сети, включению, сохранению, отключению режима симметрирования нейтрали и генерации тока, восстановленного из сохраненного спектрального состава.

Минимальное время перехода системы в режим симметрирования – два периода колебаний промышленной частоты. Данное время складывается из времени проверки факта отсутствия ОЗЗ, которая занимает один период колебаний промышленной частоты и времени затухания переходного процесса, протекающего не менее 20 мс.

Алгоритм прекращения работы компенсатора

При использовании описанных выше алгоритмов работы системы компенсации все обратные связи являются косвенными, так как измерение целевой величины (тока в месте повреждения) невозможно в реальной распределительной сети.

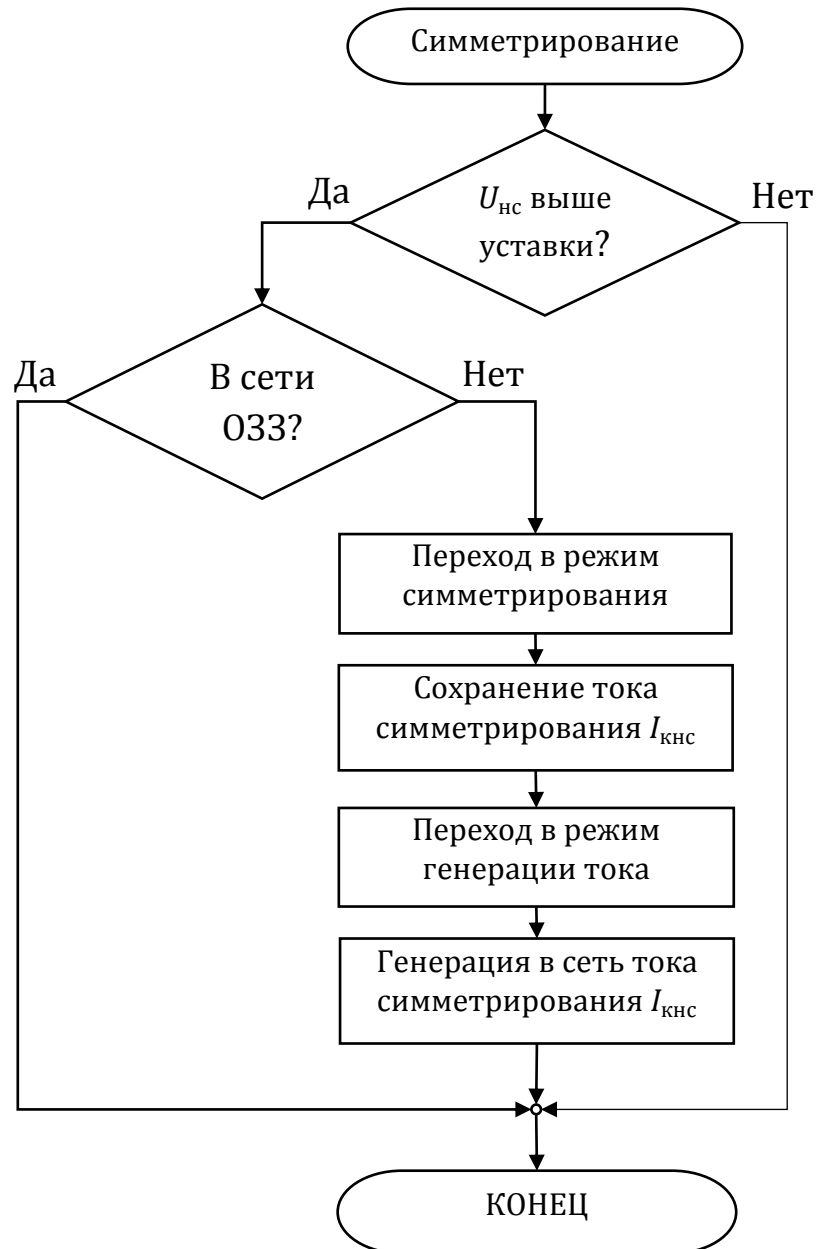


Рисунок 2.14 – Алгоритм симметрирования сети

Вследствие этого при ОЗЗ невозможно определить факт прекращения замыкания. Для этого предусмотрена функция прекращения компенсации при самоустранившемся однофазном замыкании на землю. После начала замыкания через заданное время система управления плавно уменьшает коэффициенты усиления обратных связей, и, как следствие, уменьшает ток компенсации и увеличивает напряжение в месте повреждения. Последующий анализ напряжения нулевой последовательности выявляет повторное зажигание дуги. В случае

отсутствия повторного зажигания при уменьшении коэффициентов усиления обратных связей до нуля замыкание считается самоустранившимся, и сеть продолжает работу в нормальном режиме.

2.4 Исследование процессов компенсации полного тока ОЗЗ с помощью математической модели

Созданная математическая модель позволяет исследовать процессы компенсации тока однофазного замыкания на землю в различных режимах работы сети. Основными параметрами, при помощи которых настраивается конфигурация модели, являются: мощность питающего трансформатора и суммарная длина присоединений линии, мощность управляемого заземления, емкость и добротность сети, параметры места повреждения (дуги).

Влияние паразитных параметров питающего трансформатора и продольных сопротивлений линии (оценочно рассчитываются по удельным параметрам и длине линии) учитывается продольными сопротивлениями в модели $r_{fA} = r_{fB} = r_{fC} = r_f$ и $L_{fA} = L_{fB} = L_{fC} = L_f$. Мощность управляемого заземления определяет индуктивность реактора, установленного в нейтрали, и максимальный ток компенсатора остаточного тока. Емкость и добротность сети задаются параметрами C_a, C_b, C_c и R_a, R_b, R_c поперечных сопротивлений линии.

На рисунке 2.15 показана характерная осциллограмма тока ОЗЗ и напряжения на нейтрали сети в момент возникновения замыкания.

Анализ осциллограммы показывает, что через 40 мс после момента начала замыкания остаточный ток в месте повреждения полностью скомпенсирован. В данной конфигурации дуга устойчиво горит при 5А, а пробивное напряжение места повреждения составляет 1000 В. Емкостный ток сети составляет 30А, при номинальном токе реактора 125А. Из этого следует, что для резонансной настройки КНП в нейтраль (на вторичную обмотку ДГР) подключается емкость с током 95А.

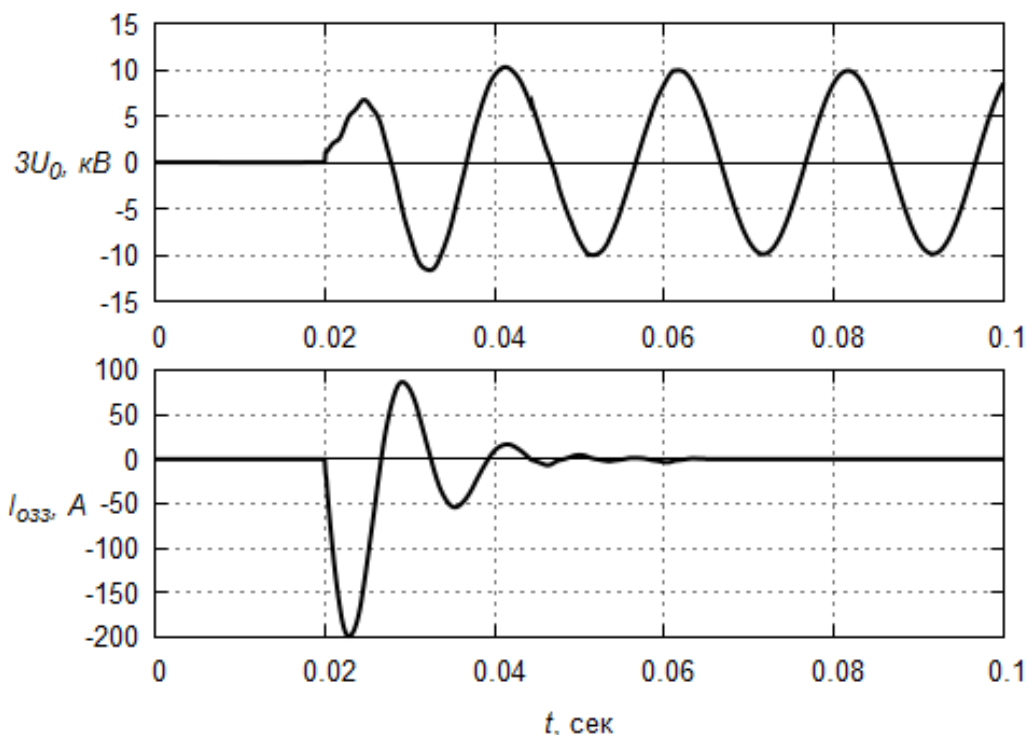


Рисунок 2.15 – Осциллограмма тока ОЗЗ и напряжения на нейтрали сети

Вследствие наличия паразитных параметров вторичной обмотки ДГР, на вид переходного процесса влияет распределение емкости КНП между нейтралью и фазными проводниками. На осциллограмме это проявляется в виде высокочастотных колебаний напряжения нулевой последовательности в начале переходного процесса.

В сетях с большими токами ОЗЗ возможно состояние, при котором большая часть емкостной проводимости распределена по линии, а не сосредоточена в нейтрали. Результаты математического моделирования ОЗЗ в такой сети, представлены на рисунке 2.16.

В данном эксперименте емкостный ток сети составил 100А. Вследствие точной настройки реактора в резонанс произошло самопогасание дуги. В момент времени 0, 15 с включилась система компенсации полного тока, что стало причиной отсутствия повторных пробоев.

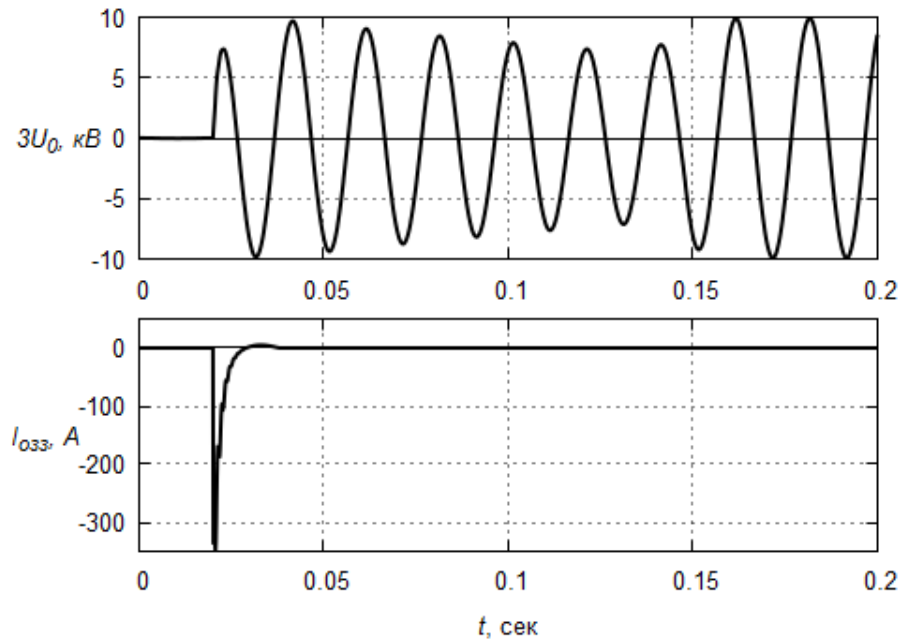


Рисунок 2.16 – Напряжение нулевой последовательности при ОЗЗ на реальной подстанции

Осциллограмма процессов при «металлическом» ОЗЗ, полученная в математической модели сети с компенсацией полного тока показана на рисунке 2.17.

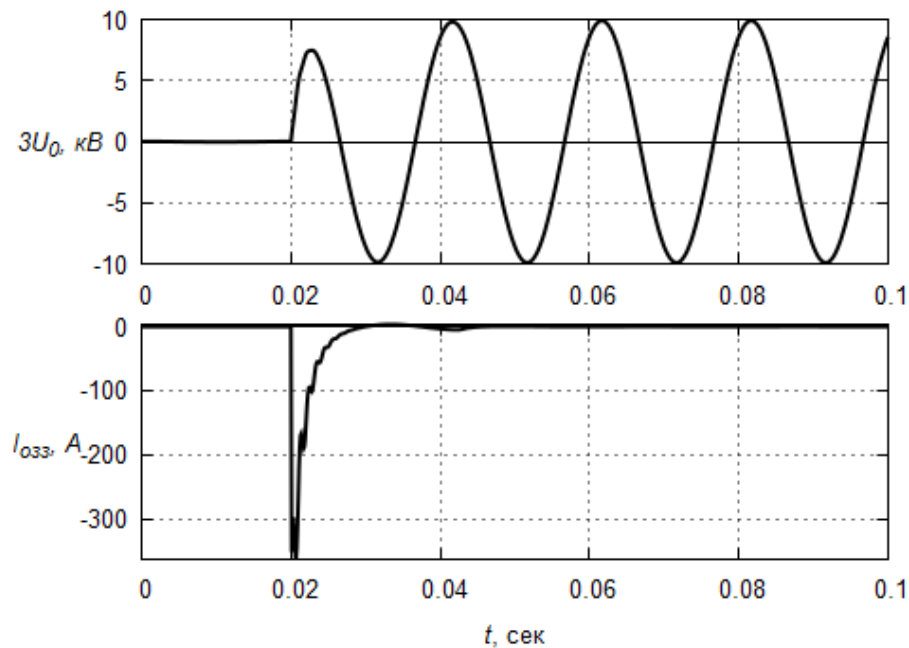


Рисунок 2.17 – Напряжение нулевой последовательности и ток ОЗЗ при «металлическом» замыкании

Анализируя переходный процесс по току в месте повреждения, можно сделать вывод, что основную энергию в месте повреждения создает разряд

емкости поврежденной фазы на землю через место замыкания, в то время как остальные составляющие тока ОЗЗ эффективно подавлены системой компенсации.

Для моделирования «металлического» ОЗЗ место повреждения представлено низкоомным активным сопротивлением. Результаты измерений в математической модели показывают, что ток, обусловленный утечками, продолжающий циркулировать через место повреждения, не превышает 300 мА.

Наличие косвенных обратных связей затрудняет определения факта прекращения замыкания. Для решения этой проблемы разработан алгоритм завершения компенсации. Его работа в математической модели сети с компенсацией показана на осциллограммах (рисунок 2.18).

Большинство однофазных замыканий в распределительных сетях среднего напряжения протекает в виде одиночных пробоев фазы на землю с большим интервалом между пробоями, обусловленным длительным восстановлением напряжения на фазе. Осциллограмма подобного процесса, полученная с использованием математической модели, показана на рисунке 2.19.

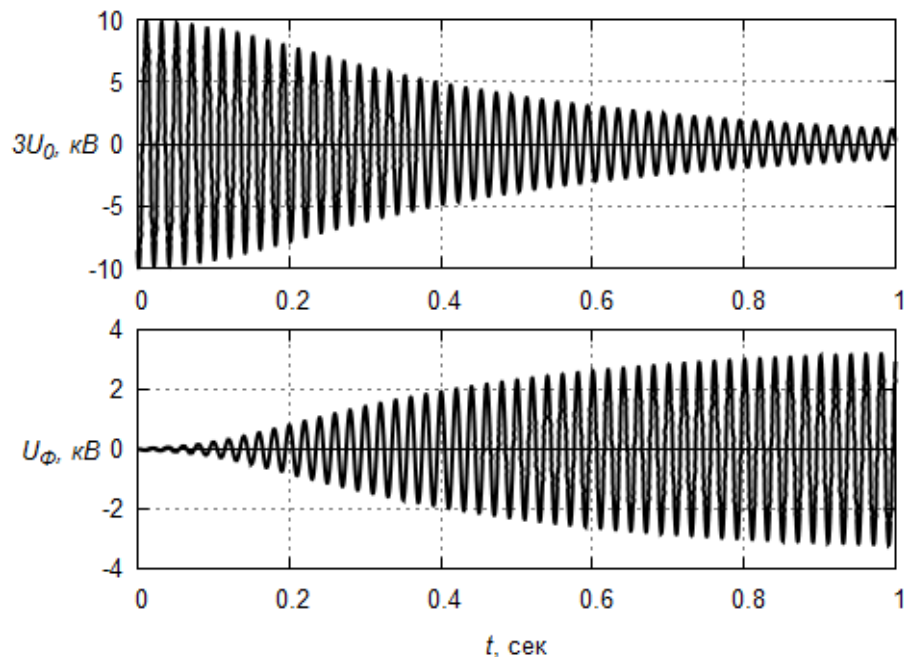


Рисунок 2.18 – Напряжение нулевой последовательности и поврежденной фазы при завершении компенсации

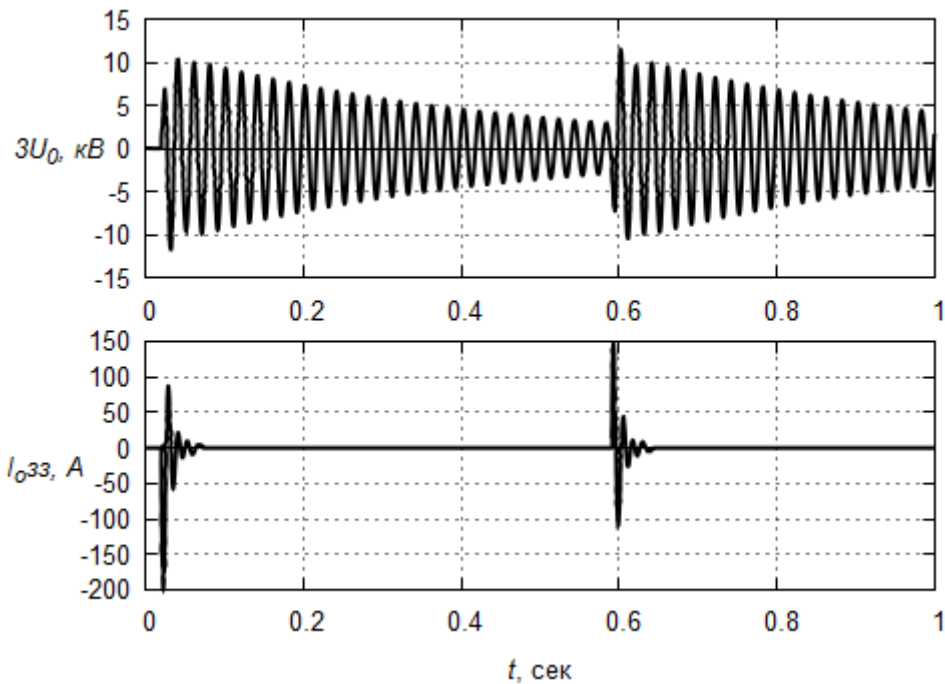


Рисунок 2.19 – Осциллограмма процессов при ОЗЗ с одиночными пробоями

Для моделирования одиночных пробоев в параметрах модели указано повышенное пробивное напряжение места повреждения – 7 кВ.

Модель позволяет исследовать процессы компенсации тока ОЗЗ при полностью контролируемых заданных условиях моделирования, что исключает влияние на результаты случайных побочных факторов. С небольшими, по сравнению с физическим моделированием, затратами удалось исследовать разные варианты управляемого заземления, определить его основные свойства и предельные параметры.

2.5 Измерение тока нулевой последовательности

Стремление улучшить основные свойства управляемого заземления нейтрали вызывает необходимость осуществлять неискажающее преобразование первичных токов нулевой последовательности в сигналы, которые могут обрабатываться цифровыми устройствами [30, 32].

Ток нулевой последовательности в трехфазной электрической сети измеряется с помощью трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) (рисунок 2.20).

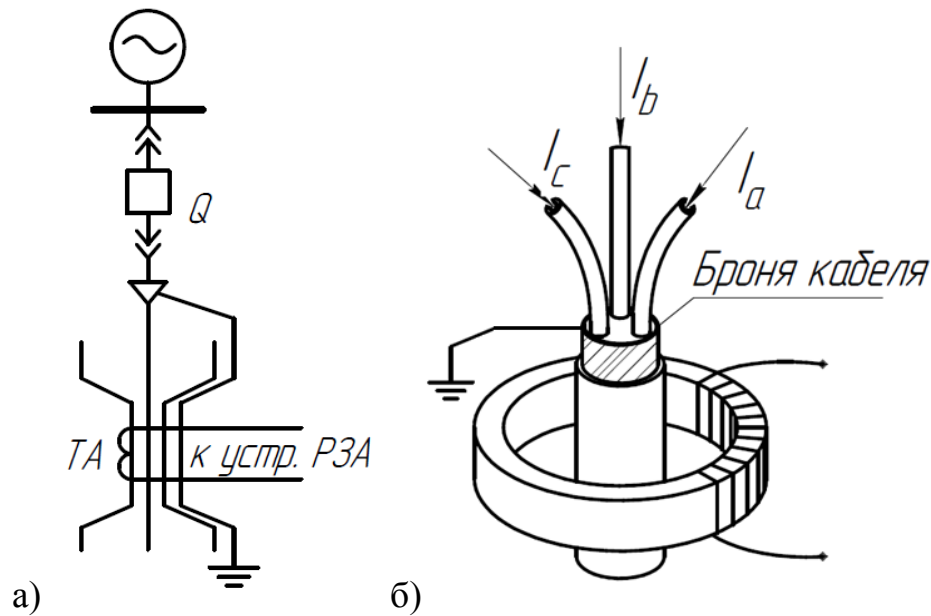


Рисунок 2.20 – Трансформатор тока нулевой последовательности

Первичной обмоткой ТТНП служат три фазных проводника, и, следовательно, первичным током ТТНП является сумма мгновенных значений токов фаз.

Имеющиеся в электрических сетях электромагнитные трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП) ТЗЛ и ТЗРЛ разработаны применительно к электромеханическим защитам и не могут быть использованы в цифровых устройствах защиты и автоматики в качестве датчиков тока вследствие их низкой точности. В связи с этим проведен анализ статической и динамической точностей преобразования тока нулевой последовательности и сформулированы требования к этим преобразователям применительно к цифровым устройствам защиты и автоматики [29, 31].

При стационарных ОЗЗ ток нулевой последовательности имеет вид гармонической функции или суммы нескольких гармонических функций, амплитуда которых нарастает по экспоненциальному закону до установившегося уровня (рисунок 2.21, а). При нестационарных (перемежающихся и других) ОЗЗ ток нулевой последовательности, как правило, имеет форму экспоненты (рисунок 2.21, б) или гармонической функции, амплитуда которой уменьшается по экспоненциальному закону (рисунок 2.21, в).

Ток нулевой последовательности в зависимости от режима контролируемого объекта может иметь форму гармонической функции, экспоненты или комбинации этих функций. В общем виде этот ток можно представить обобщенной моделью сигнала [23]:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n X_{mk} e^{-\beta_k t} \cos(\omega_k t - \varphi_k); \quad (2.15)$$

где X_{mk} – начальная амплитуда; β_k – коэффициент затухания; ω_k – частота; φ_k – начальная фаза.

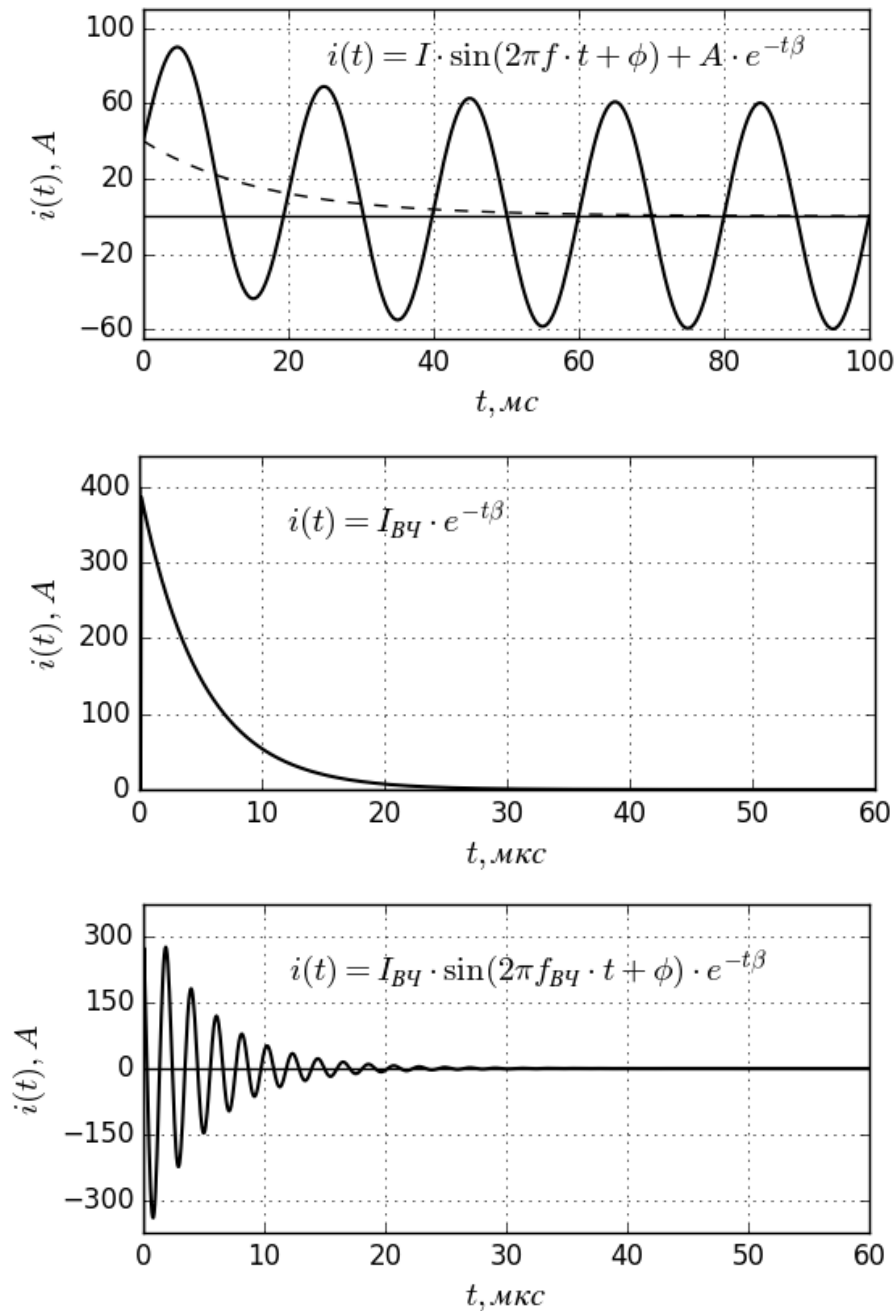


Рисунок 2.21 – Возможные формы тока нулевой последовательности при ОЗЗ

Используя в качестве базиса обобщенный сигнал, можно получить описания наиболее часто встречающихся токов нулевой последовательности (таблица 1).

Таблица 1

№	Сигнал	Описание	Условия
1	Затухающее колебание	$X_{mk}e^{-\beta_k t} \cos(\omega_k t - \varphi_k)$	$n = 1$
2	Гармонический сигнал с постоянной амплитудой	$X_{mk} \cos(\omega_k t - \varphi_k)$	$\beta_k = 0, n = 1$
3	Экспоненциальный сигнал	$X_{mk} e^{-\beta_k t}$	$\omega_k = 0, \varphi_k = 0, n = 1$
4	Скачкообразный сигнал	$X_{mk} \cdot 1(t)$	$\beta_k = 0, \omega_k = 0, \varphi_k = 0, n = 1$
5	Дельта-функция	$\delta(t)$	$X_{mk} = \beta_k, \beta_k \rightarrow \infty, \omega_k = 0, \varphi_k = 0, n = 1$

Для анализа прохождения сигналов через измерительные преобразователи их целесообразно представить в частотной области, где независимой переменной является частота ω .

Сигнал произвольной формы $f(t)$ представляется в частотной области в виде спектра, определяемого прямым преобразованием Фурье:

$$S_{\text{тек}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt; \quad (2.16)$$

Текущий спектр сигнала при наблюдении на интервале от 0 до τ описывается выражением [74]:

$$S_{\text{тек}}(\omega) = \int_0^{\tau} f(t) e^{-j\omega t} dt; \quad (2.17)$$

где τ – интервал наблюдения анализируемого сигнала.

Интервал наблюдения увеличивается вместе с текущим временем. Физический смысл спектра заключается в том, что он определяет совокупность гармонических составляющих (с частотами, амплитудами и фазами),

формирующих (восстанавливающих) заданную форму сигнала во временной области.

В общем виде, для получения (восстановления) заданной формы сигнала, необходимо бесконечное число гармонических составляющих. В реальных условиях значимость высокочастотных гармоник для целей релейной защиты сравнительно мала, и можно ограничить реальный спектр некоторой полосой частот, достаточной для воспроизведения (восстановления) исходного сигнала.

Пусть вид гармонического сигнала установлен в интервале наблюдения от 0 до τ :

$$x(t) = \begin{cases} \sin(\omega t) & \text{при } t < \tau \\ 0 & \text{при } t \geq \tau \end{cases} \quad (2.18)$$

На рисунке 2.22 представлен гармонический сигнал в функции времени для интервала наблюдения $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ (один период).

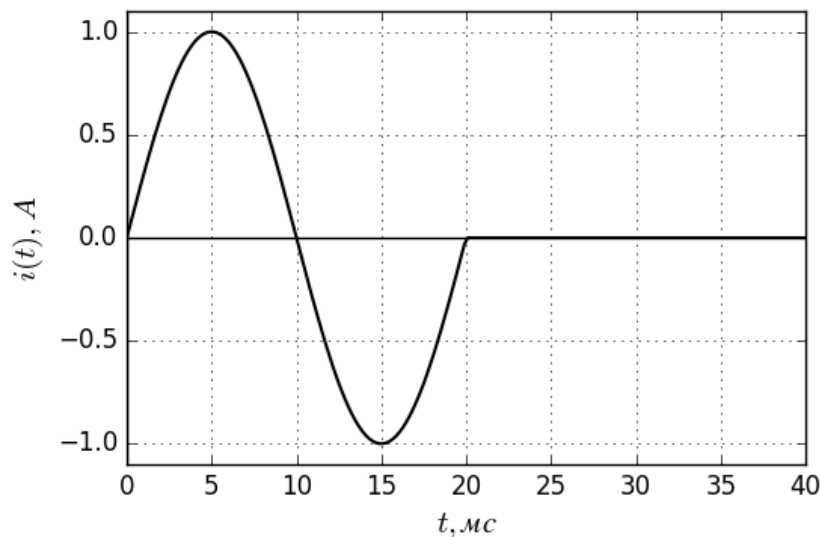


Рисунок 2.22 – Вид сигнала синусоидальной формы длительностью один период

Спектральные плотности гармонических сигналов для интервалов наблюдения $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ и $\tau = \frac{4\pi}{\omega}$ показаны на рисунках 2.23 и 2.24, соответственно.

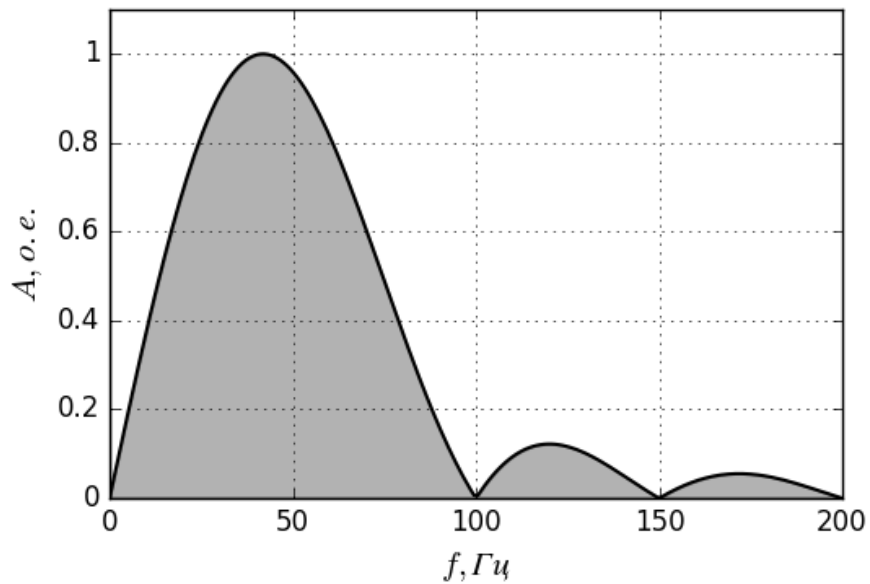


Рисунок 2.23 – Спектральная плотность сигнала синусоидальной формы длительностью один период

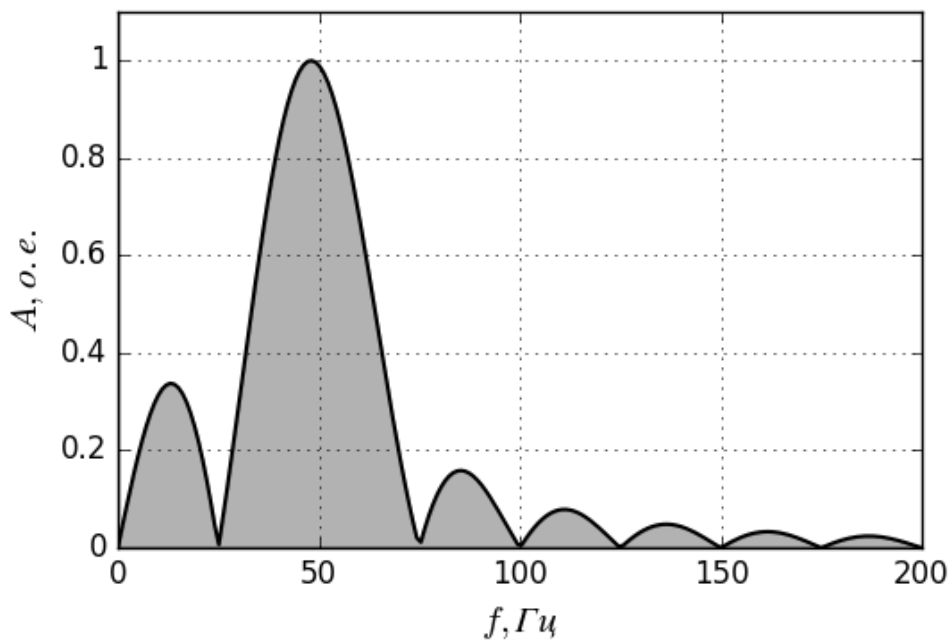


Рисунок 2.24 – Спектральная плотность сигнала синусоидальной формы длительностью два периода

В случае, когда длительность гармонического сигнала не кратна его периоду, сигнал имеет постоянную составляющую. Спектр сигнала синусоидальной формы с частотой 50 Гц длительностью полпериода представлен на рисунке 2.25.

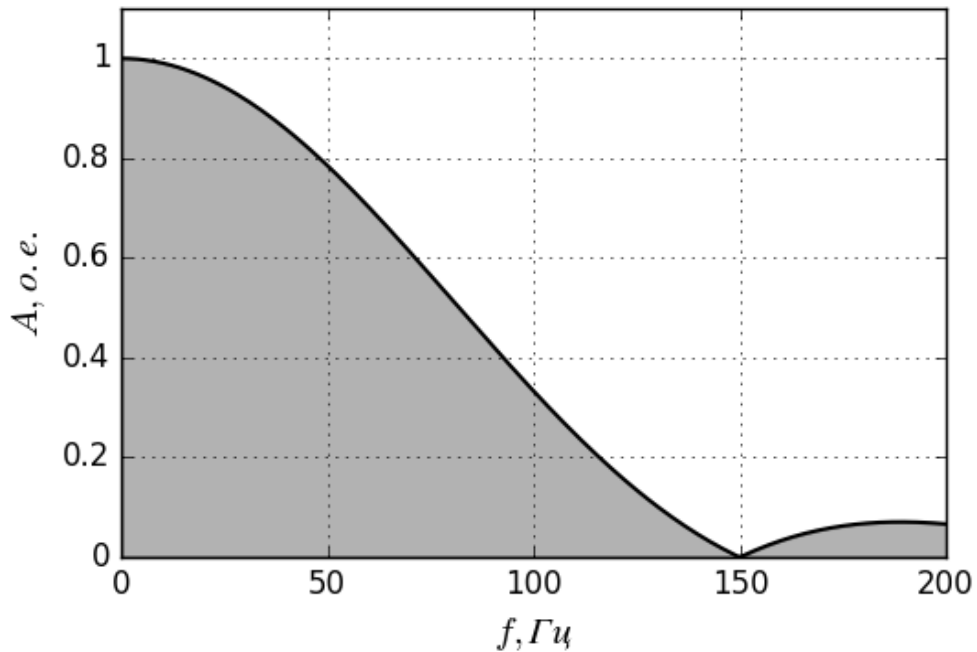


Рисунок 2.25 – Спектральная плотность сигнала синусоидальной формы длительностью полпериода

Таким образом, гармонические сигналы не бесконечной длительности имеют гармонические составляющие, частота которых ниже основной до нулевой частоты. Можно вывести выражение для спектральной плотности синусоидального сигнала в зависимости от длительности:

$$S(\tau, \omega) = \left| \frac{(e^{-\tau\omega j}(\omega_c \cos(\tau\omega) + \omega \sin(\tau\omega)j) - \omega_c)}{(\omega_c^2 - \omega^2)} \right|; \quad (2.19)$$

где ω_c – частота сигнала; τ – длительность сигнала.

Для сигнала, длительность наблюдения которого кратна числу полупериодов k , выражение для спектральной плотности принимает вид:

$$S(k, \omega) = \sqrt{\frac{(-1)^k \omega \cdot \cos\left(\frac{\pi k \omega_c}{\omega}\right) - \omega^2}{(\omega^2 - \omega_c^2)^2}}. \quad (2.20)$$

Экспоненциальный сигнал в зависимости от времени описывается следующим выражением:

$$x(t) = e^{-\beta t}; \quad (2.21)$$

где β – коэффициент затухания.

Его представление во временной области показано на рисунке 2.26.

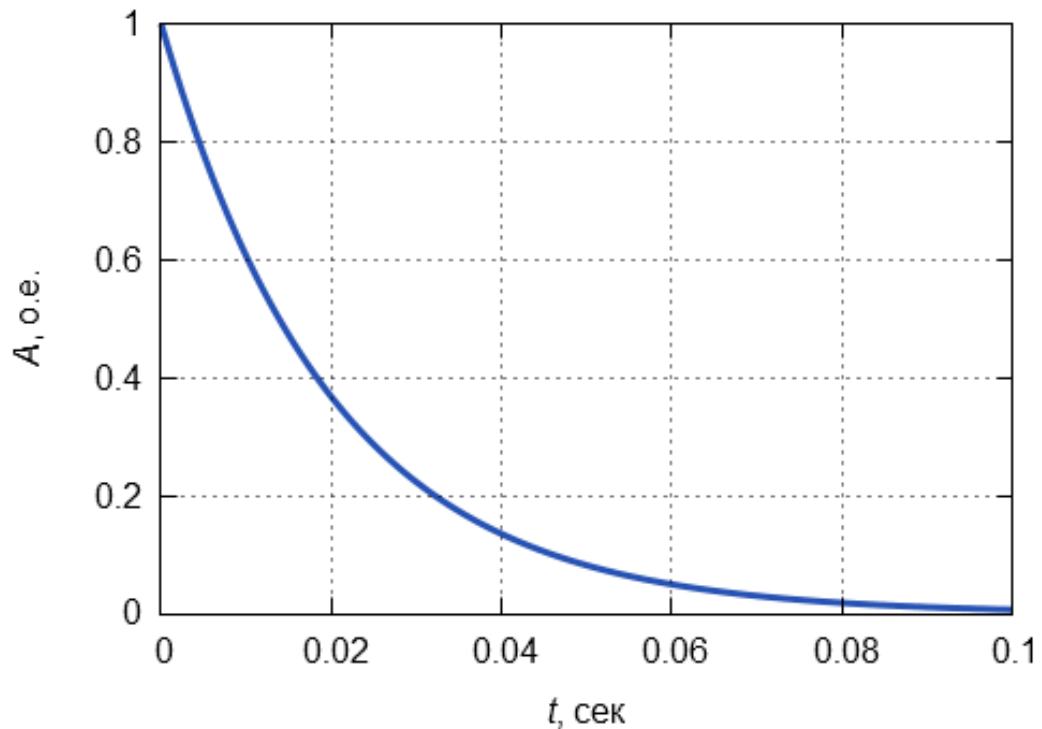


Рисунок 2.26 – Сигнал экспоненциальной формы

Спектральная плотность такого сигнала имеет пик на нулевой частоте и также зависит от длительности сигнала. Выражение для спектральной плотности сигнала экспоненциальной формы в зависимости от длительности наблюдения:

$$S(\tau, \omega) = \left| \frac{(\beta - \omega i)(e^{-\tau\beta - \tau\omega i} - 1)}{(\beta^2 + \omega^2)} \right|; \quad (2.22)$$

где τ – длительность сигнала.

На рисунке 2.27 показаны спектральные плотности этого сигнала для различных длительностей.

Зависимость спектра экспоненты от длительности сигнала можно наглядно показать в виде поверхности в трехмерной прямоугольной системе координат (рисунок 2.28).

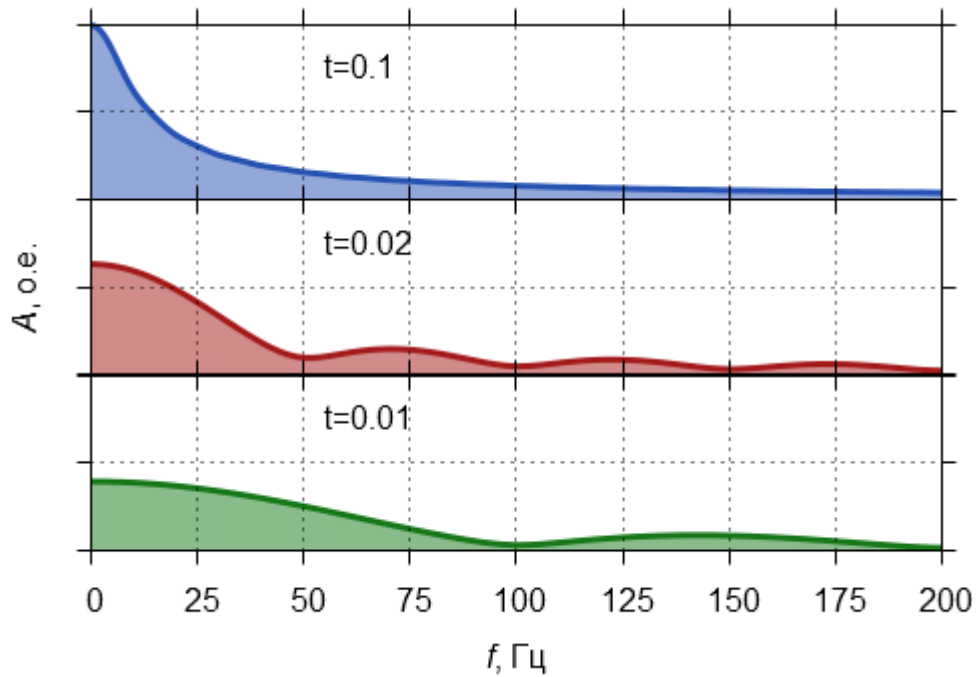


Рисунок 2.27 – Спектр сигнала экспоненциальной формы

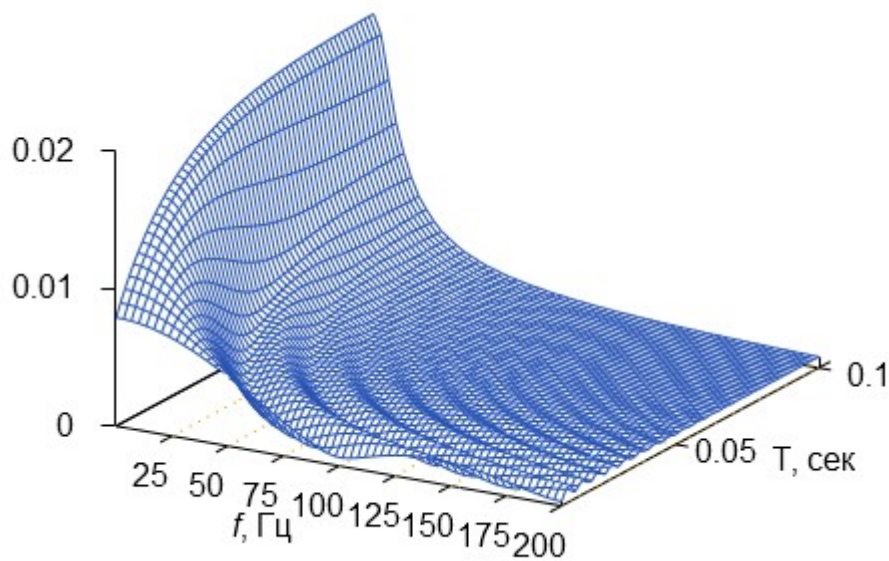


Рисунок 2.28 – Спектр экспоненциального сигнала

Таким образом, можно отметить, что сигналы, используемые в защитах от ОЗЗ, имеют спектр, распределенный в широкой полосе частот. При небольшой длительности сигналов (что характерно для наиболее часто возникающих нестационарных ОЗЗ) вблизи нулевой частоты наблюдается значительная спектральная плотность. Это означает, что значительная доля энергии (а, следовательно, и информации) сигналов сосредоточена на нижних частотах.

С целью построения системы управляемого заземления с высокими показателями селективности, быстродействия, чувствительности и надежности необходимо использовать всю доступную информацию об ОЗЗ. Ток нулевой последовательности, измеренный с помощью ТТНП, является наиболее информативным сигналом, поэтому, в целях компенсации полного тока, необходимо обеспечить как можно более точное его преобразование. Этого можно достичь при условии линейности параметров и постоянства коэффициента передачи измерительного преобразователя (в частности, электромагнитного ТТНП) в полосе частот, в которой сосредоточена подавляющая часть энергии сигнала.

В соответствии с указанным подходом, анализ преобразовательных свойств ТТНП удобно проводить на основе общепринятой схемы замещения (рисунок 2.29), все параметры которой приведены ко вторичной обмотке.

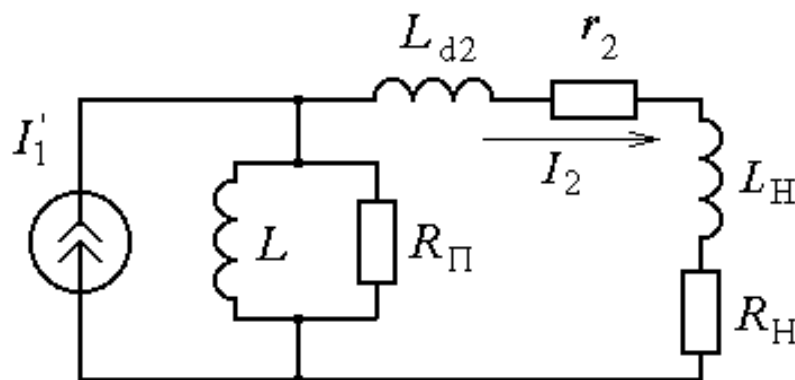


Рисунок 2.29 – Схема замещения трансформатора тока

Передаточная функция трансформатора тока, полученная по представленной схеме:

$$W(p) = \frac{\frac{L}{r} p}{\frac{L_1 \cdot L}{r \cdot R} p^2 + \left(\frac{L}{R} + \frac{L_1}{r} + \frac{L}{r} \right) p + 1}; \quad (2.23)$$

Где L_1 – индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТ; L – индуктивность намагничивания ТТ; R – сопротивление потерь в магнитопроводе; r – активное сопротивление в цепи вторичной обмотки ТТ.

После приведения к типовым динамическим звеньям, она принимает вид:

$$W(p) = \frac{\frac{L}{r}p}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}. \quad (2.24)$$

Здесь постоянные времени T_1 и T_2 принимают значения:

$$T_1 = \frac{L_1R + Lr + LR + \sqrt{(L_1R + Lr + LR)^2 - 4LL_1Rr}}{2Rr}; \quad (2.25)$$

$$T_2 = \frac{L_1R + Lr + LR - \sqrt{(L_1R + Lr + LR)^2 - 4LL_1Rr}}{2Rr}. \quad (2.26)$$

В предположении, что $T_1 \gg T_2$ (что выполняется в реальных ТТ), выражения для постоянных времени можно упростить:

$$T_1 = \frac{L}{r}; \quad T_2 = \frac{L_1}{R}.$$

Следовательно, упрощенная передаточная функция трансформатора тока:

$$W(p) = \frac{T_1p}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}; \quad (2.27)$$

где T_1 – наибольшая постоянная времени трансформатора; T_2 – наименьшая постоянная времени трансформатора.

Наличие ненулевого коэффициента перед оператором в числителе передаточной функции также означает, что трансформатор будет подавлять сигналы, находящиеся в области низких частот.

Виды амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) ТТНП представлены на рисунках 2.30 и 2.31 соответственно.

Малая спектральная плотность в области высоких частот позволяет не учитывать влияние наименьшей постоянной времени в первом приближении при анализе свойств ТТНП. Таким образом, можно дополнительно упростить передаточную функцию ТТНП до следующего вида:

$$W(p) = \frac{T_1p}{(T_1p + 1)}. \quad (2.28)$$

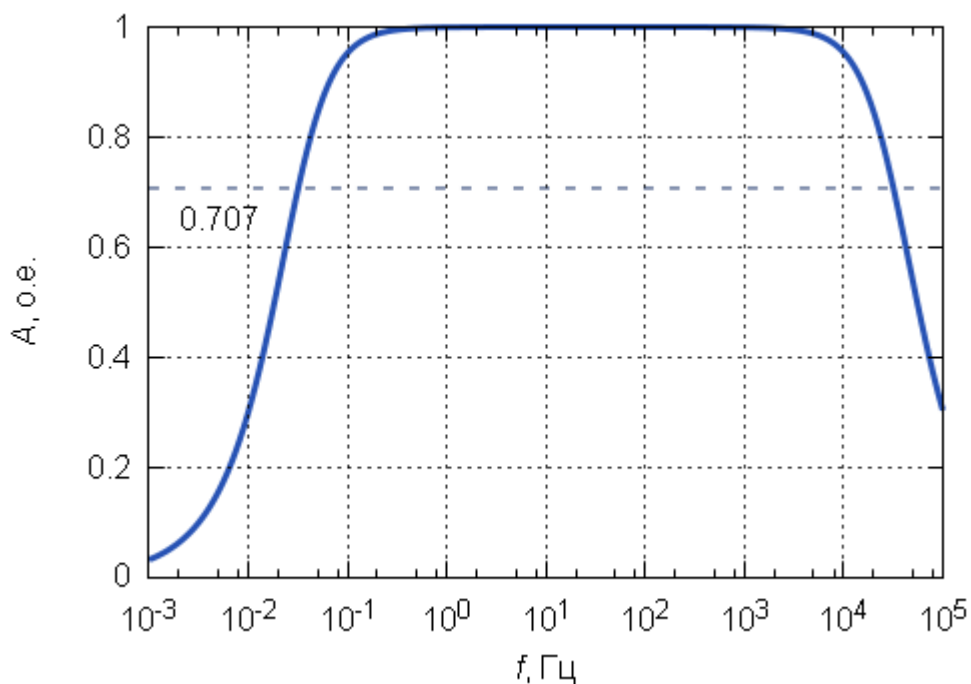


Рисунок 2.30 – АЧХ ТТПП

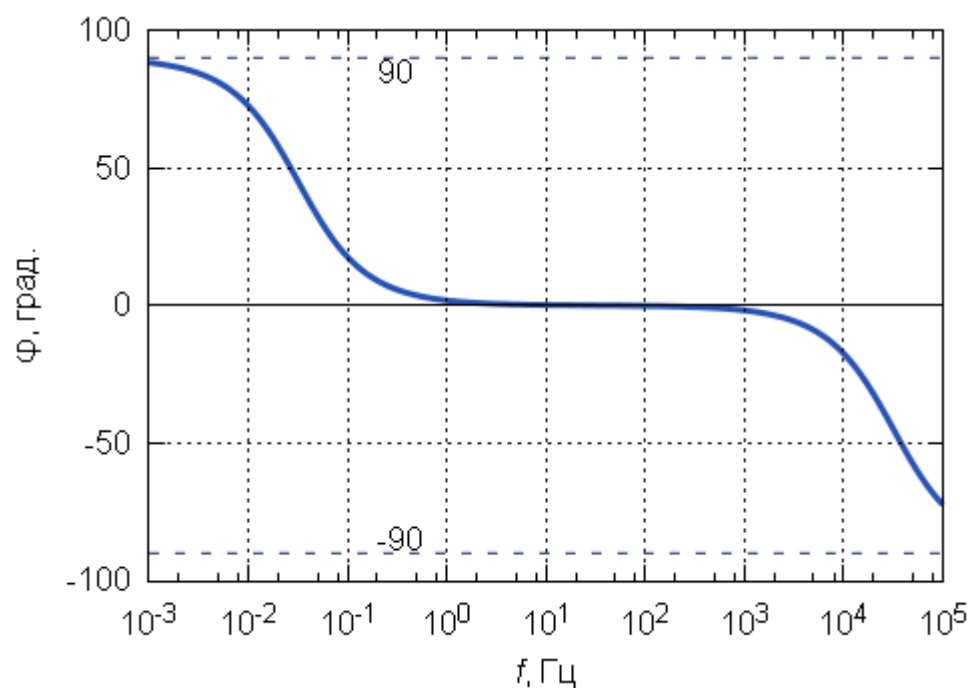


Рисунок 2.31 – ФЧХ ТТПП

Такое упрощение понижает степень передаточной функции в два раза, что дает возможность оперировать простыми и наглядными аналитическими выражениями.

При анализе частотных характеристик удобно пользоваться понятием полосы пропускания – диапазона частот, в пределах которого обеспечивается преобразование сигнала с некоторым максимально допустимым линейным искажением. В теории автоматического управления нижняя/верхняя граничная частота (сопряженная частота) на АЧХ представляет собой величину обратную постоянной времени:

$$\omega = \frac{1}{T}.$$

На этой частоте относительный уровень коэффициента усиления системы равен $A_H = 0,707$, то есть амплитудная погрешность равна 29.3%, а фазовый сдвиг $\varphi = \pm 45^\circ$. Поэтому данную частоту невозможно использовать как граничную из-за недопустимо высоких погрешностей при приближении частоты измеряемого тока к частоте сопряжения. Задавшись некоторой допустимой погрешностью (или относительным уровнем амплитуды), можно вывести формулу для определения нижней граничной частоты, удовлетворяющей требованиям. Выражение для нижней граничной частоты ТТНП в зависимости от наибольшей постоянной времени (учет только наименьшей постоянной времени) [17]:

$$f_H(T) = \frac{A_H}{\sqrt{1 - A_H^2}} \frac{1}{2\pi T}; \quad (2.29)$$

где A_H – допустимый уровень амплитуды; T – наибольшая постоянная времени ТТНП.

Выражение для верхней граничной частоты в зависимости от наименьшей постоянной времени (учтена только наибольшая постоянная времени):

$$f_B(T) = \frac{\sqrt{1 - A_H^2}}{A_H} \frac{1}{2\pi T}; \quad (2.30)$$

где T – наименьшая постоянная времени.

АЧХ ТТНП с нижней граничной частотой $f_H=0.8$ Гц, удовлетворяющей требованию $A_H \geq 0.9$, представлена на рисунке 2.32.

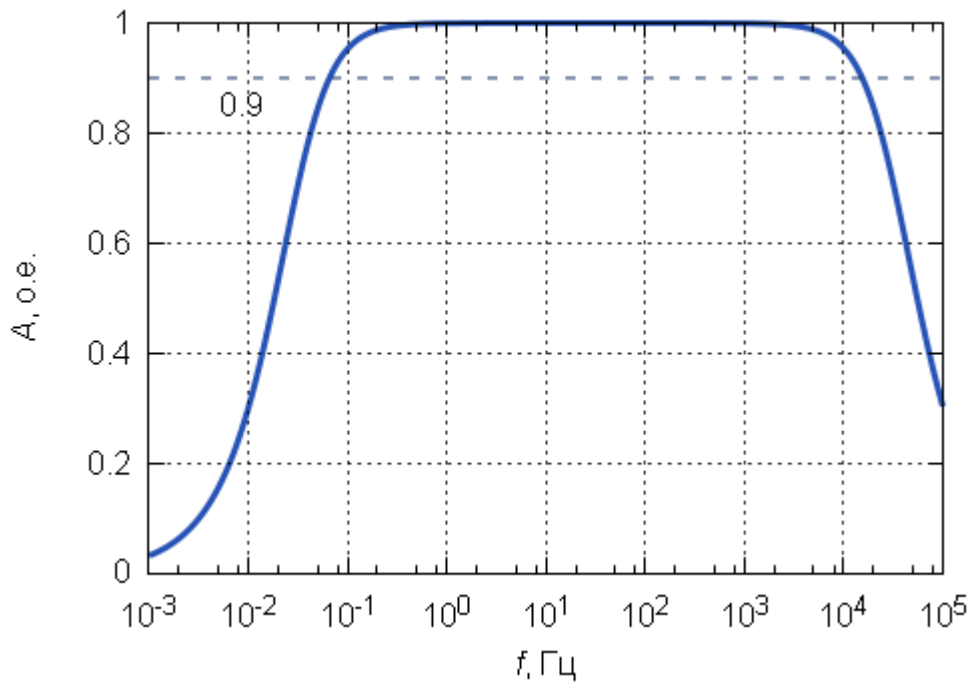


Рисунок 2.32 – Полоса пропускания ТТП

В реальных измерительных трактах вторичный ток ТТП часто подается на токовые входы терминалов, которые представляют собой первичную обмотку промежуточного трансформатора тока. Таким образом, измерительный тракт представляет собой два трансформатора тока, соединенных каскадно. Передаточная функция такой системы:

$$W_{\text{общ}}(p) = \frac{T_1 T_3 p^2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}. \quad (2.31)$$

Здесь T_1 – наибольшая постоянная времени первого трансформатора;

T_2 – наименьшая постоянная времени первого трансформатора;

T_3 – наибольшая постоянная времени второго трансформатора;

T_4 – наименьшая постоянная времени второго трансформатора.

Если не принимать во внимание влияние наименьшей постоянной времени, то:

$$W_{\text{общ}}(p) = \frac{T_1 T_2 p^2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad (2.32)$$

где T_1 – постоянная времени первого трансформатора; T_2 – постоянная времени второго трансформатора.

Система из двух трансформаторов имеет одну общую нижнюю граничную частоту, следовательно, при последовательном соединении неверно оперировать понятием граничной частоты отдельного трансформатора. Общая граничная частота определяется из условия того, что общий уровень относительной амплитуды ЛАЧХ, например, $A_{Н.общ} \geq 0,9$. Общий уровень относительной амплитуды равен произведению уровней каждого отдельного трансформатора:

$$A_{Н.общ} = A_{Н1}A_{Н2}. \quad (2.33)$$

Можно вывести выражение для уровня относительной амплитуды отдельного трансформатора в зависимости от частоты сигнала:

$$A_{Н}(f) = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{2\pi T} - f^2}}. \quad (2.34)$$

Следовательно, для всей системы:

$$A_{Н.общ}(f) = \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{2\pi T_1} - f^2}} \frac{f}{\sqrt{\frac{1}{2\pi T_2} - f^2}}. \quad (2.35)$$

Можно получить выражения для нижней граничной частоты системы из двух трансформаторов:

$$f_{Н} = \sqrt{\frac{-A_{Н} \left(\sqrt{a_1^4 A_{Н}^2 - 2a_1^2 a_2^2 A_{Н}^2 + 4a_1^2 a_2^2 + a_2^4 A_{Н}^2} + a_1^2 A_{Н}^2 + a_2^2 A_{Н}^2 \right)}{2A_{Н}^2 - 2}}; \quad (2.36)$$

где:

$$a_1 = \frac{1}{2\pi T_1}; \quad a_2 = \frac{1}{2\pi T_2}.$$

При достаточно большом значении $A_{Н}$ выражение можно упростить до вида:

$$f_H = -A_H \sqrt{\frac{\frac{1}{2\pi T_1}^2 + \frac{1}{2\pi T_2}^2}{A_H^2 - 1}}. \quad (2.37)$$

Приведенные выражения для нижней граничной частоты и относительного снижения амплитуды удобно использовать при оценке применимости ТТНП для работы в установившемся режиме.

Применение операторного метода позволяет проанализировать прохождение любого сигнала, как через отдельный трансформатор, так и через систему из нескольких трансформаторов.

Входной сигнал во временной области описывается выражением:

$$x(t) = \sin(\omega t). \quad (2.38)$$

Изображение синусоидального сигнала в p -области:

$$X(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}. \quad (2.39)$$

Следовательно, изображение реакции трансформатора тока с передаточной функцией (2.28) на входной сигнал:

$$Y(p) = \frac{T_1 p \omega}{(T_1 p + 1)(p^2 + \omega^2)}. \quad (2.40)$$

Зависимость выходного сигнала от времени, полученная применением обратного преобразования Лапласа:

$$y(t) = \frac{T_1^2 \omega^2 \sin(\omega t) + T_1 \omega \cos(\omega t) - T_1 \omega e^{\frac{-t}{T_1}}}{T_1^2 \omega^2 + 1}. \quad (2.41)$$

Ошибка преобразования сигнала равна:

$$e(t) = \sin(\omega t) - \frac{T_1^2 \omega^2 \sin(\omega t) + T_1 \omega \cos(\omega t) - T_1 \omega e^{\frac{-t}{T_1}}}{T_1^2 \omega^2 + 1}. \quad (2.42)$$

Временная диаграмма входного и выходного сигналов, и ошибки ТТНП представлена на рисунке 2.33.

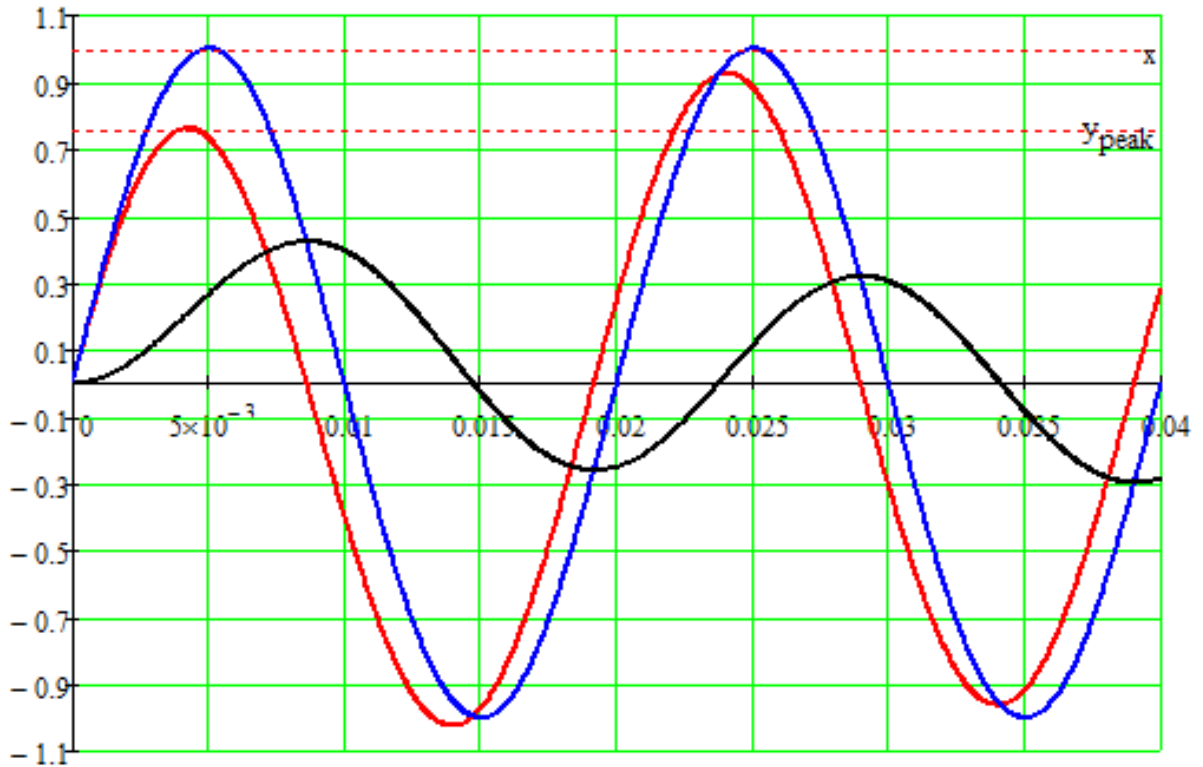


Рисунок 2.33 – Вход, выход и ошибка преобразования ТНП

Видно, что с увеличением длительности сигнала амплитуда пиков ошибки уменьшается по экспоненциальному закону, что обуславливается увеличением спектральной плотности в зоне основной частоты. Зависимость ошибки от времени и постоянной времени показана на рисунке 2.34. Нижняя граничная частота нелинейно зависит от постоянной времени, но более наглядно позволяет оценить работу трансформатора. График зависимости ошибки от времени и нижней граничной частоты трансформатора показан на рисунке 2.35. Анализируя диаграммы (рисунки 2.34 и 2.35) можно сделать вывод, что увеличение постоянной времени трансформатора тока уменьшает его ошибку преобразования, и, как следствие, повышает точность измерения и точность настройки автоматики, использующей трансформатор.

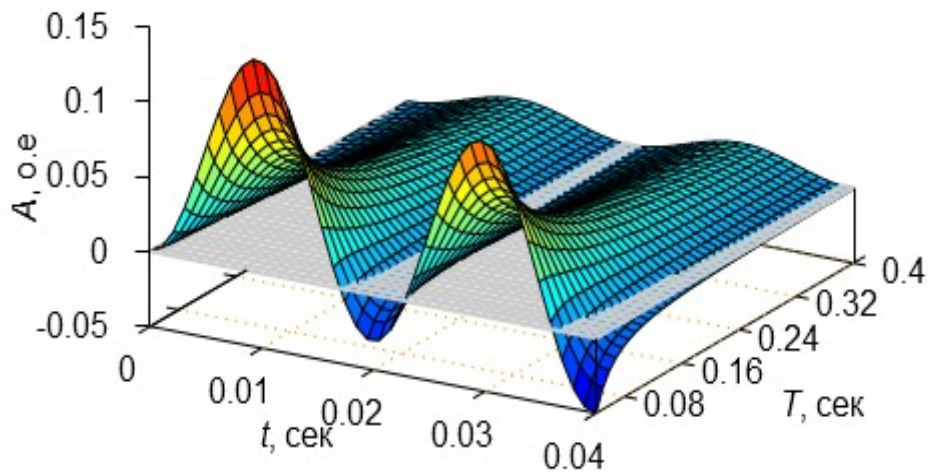


Рисунок 2.34 – Ошибка преобразования в зависимости от времени и постоянной времени

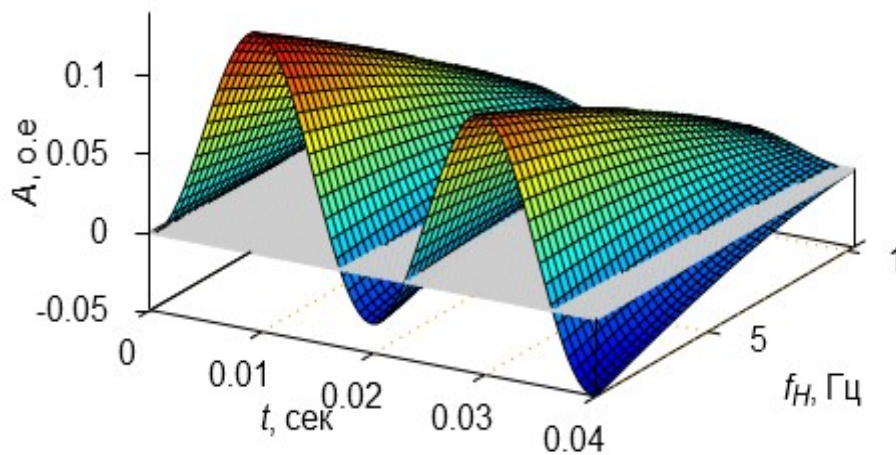


Рисунок 2.35 – Ошибка преобразования в зависимости от времени и нижней граничной частоты ТТНП

Аналитические выражения для амплитуды пика ошибки и разности амплитуд первого периода неудобны для использования. Зависимости этих величин от постоянной времени для частоты $f=50$ Гц представлены на рисунке 2.36.

Для вычисления полных потерь энергии (информации) в ТТНП целесообразно использовать для оценки интегральную квадратичную ошибку:

$$I_2 = \int_0^T (y(t) - x(t))^2; \quad (2.43)$$

где I_2 – интегральная квадратичная ошибка; $y(t)$ – выходной сигнал в функции времени; $x(t)$ – входной сигнал в функции времени.

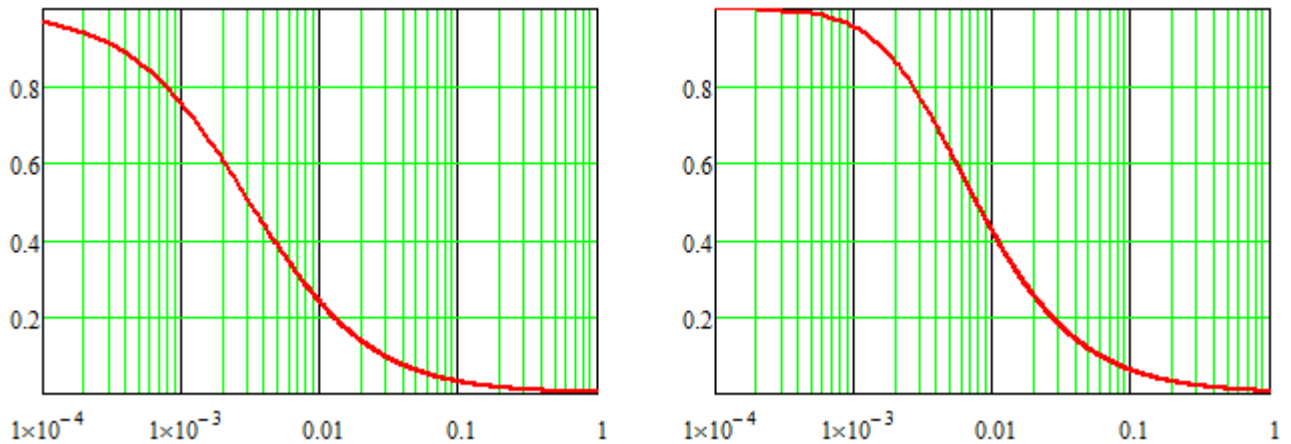


Рисунок 2.36 – Амплитуды пика ошибки и разности амплитуд первого полупериода в зависимости от постоянной времени

Так как трансформатор является реактивным элементом, он будет запасать энергию, которая будет влиять на его работу после исчезновения входного сигнала. Выходной сигнал при этом будет описываться выражением:

$$y'(t) = e(\tau)e^{\frac{-t+\tau}{T_1}}; \quad (2.44)$$

где τ – длительность сигнала; T_1 – наибольшая постоянная времени; t – время переходного процесса с начала подачи входного сигнала.

Ошибка преобразования в таком случае определяется по формуле:

$$e'(t) = -y'(t) = e(\tau)e^{\frac{-t+\tau}{T_1}}. \quad (2.45)$$

Квадратичная интегральная ошибка преобразования синусоидального сигнала складывается из интегральной ошибки колебательной части процесса и экспоненциальной части после исчезновения входного сигнала:

$$I_2 = \int_0^{\tau} e(t)^2 + \int_{\tau}^{\infty} e'(t)^2. \quad (2.46)$$

Так как интегральная ошибка зависит не только от параметров трансформатора, но и от площади входного воздействия, следует использовать относительную интегральную квадратичную ошибку:

$$I'_2 = \frac{I_2}{\int_0^\infty x(t)^2 dt}. \quad (2.47)$$

На рисунке 2.37 показаны входное воздействие, отклик и мгновенная ошибка ТНП при прохождении через него синусоидального сигнала частотой 50 Гц длительностью $\tau = 0,02$ сек.

Аналитические выражения для интегральной квадратичной ошибки в зависимости от времени наблюдения, постоянной времени ТНП и частоты слишком громоздки, но возможно получить простые формулы для некоторых распространенных частных случаев (таблица 2).

Таблица 2

№	Выражение	Время наблюдения
1	$I'_2 = \frac{\pi + \pi T_1^2 \omega^2 + 2T_1^3 \omega^3 (1 + e^{-\frac{\pi}{T_1 \omega}})}{\pi(T_1^2 \omega^2 + 1)^2}$	Полпериода
2	$I'_2 = \frac{\pi + \pi T_1^2 \omega^2 + T_1^3 \omega^3 (1 - e^{-\frac{2\pi}{T_1 \omega}})}{\pi(T_1^2 \omega^2 + 1)^2}$	Один период
3	$I'_2 = \frac{3\pi + 3\pi T_1^2 \omega^2 + 2T_1^3 \omega^3 (1 + e^{-\frac{3\pi}{T_1 \omega}})}{3\pi(T_1^2 \omega^2 + 1)^2}$	Полтора периода
4	$I'_2 = \frac{2\pi + 2\pi T_1^2 \omega^2 + T_1^3 \omega^3 (1 - e^{-\frac{4\pi}{T_1 \omega}})}{2\pi(T_1^2 \omega^2 + 1)^2}$	Два периода

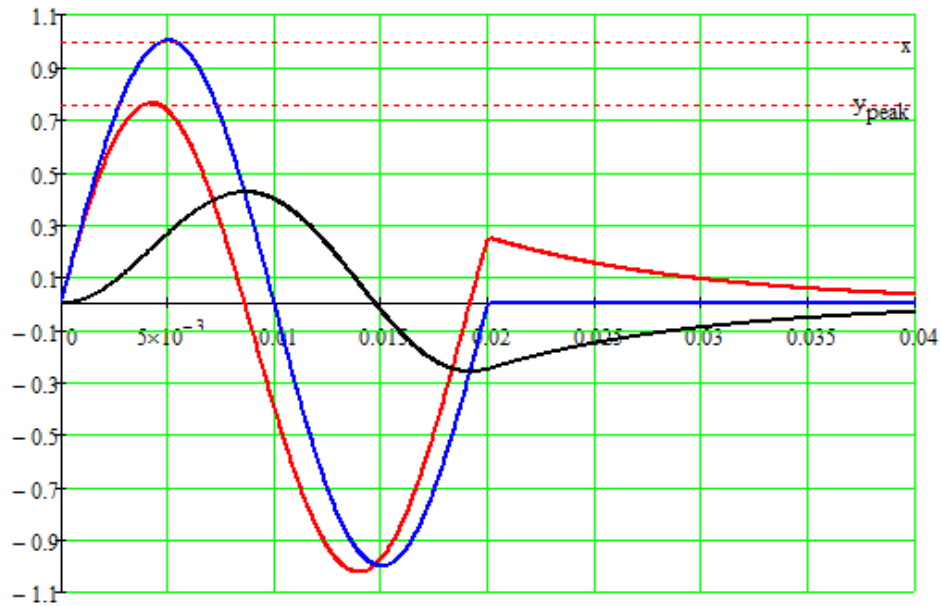


Рисунок 2.37 – Входной и выходной сигналы и ошибка преобразования ТТП

Прохождение сигнала экспоненциальной формы также можно анализировать, используя преобразование Лапласа. Входной сигнал во временной области описывается выражением (2.21):

Изображение сигнала в p -области:

$$X(p) = \frac{1}{p + \beta}. \quad (2.49)$$

Изображение реакции ТТП с передаточной функцией (2.28) на входной сигнал:

$$Y(p) = \frac{T_1 p}{(T_1 p + 1)(p + \beta)}. \quad (2.50)$$

Зависимость выходного сигнала от времени, полученная применением обратного преобразования Лапласа:

$$y(t) = \frac{-e^{-\frac{t}{T_1}} - T_1 \beta e^{-t}}{T_1 \beta - 1}. \quad (2.51)$$

Следовательно, ошибка преобразования сигнала равна:

$$e(t) = e^{-\beta t} + \frac{e^{-\frac{t}{T_1}} - T_1\beta e^{-t}}{T_1\beta - 1}. \quad (2.52)$$

Зависимость входного и выходного сигналов и ошибки от времени ТТНП представлена на рисунке 2.38.

Диаграмма мгновенной ошибки во времени в зависимости от наибольшей постоянной времени ТТНП показана на рисунке 2.39.

Переходя от постоянной времени к нижней граничной частоте, полученной с условием $A_H \geq 0.9$, можно получить диаграмму ошибки во времени в зависимости от частоты (рисунок 2.40).

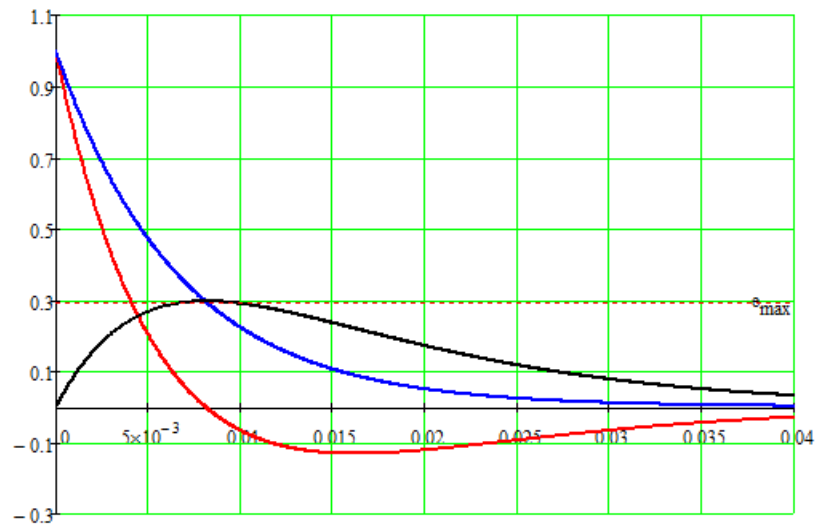


Рисунок 2.38 – Входной и выходной сигналы и ошибка преобразования ТТНП

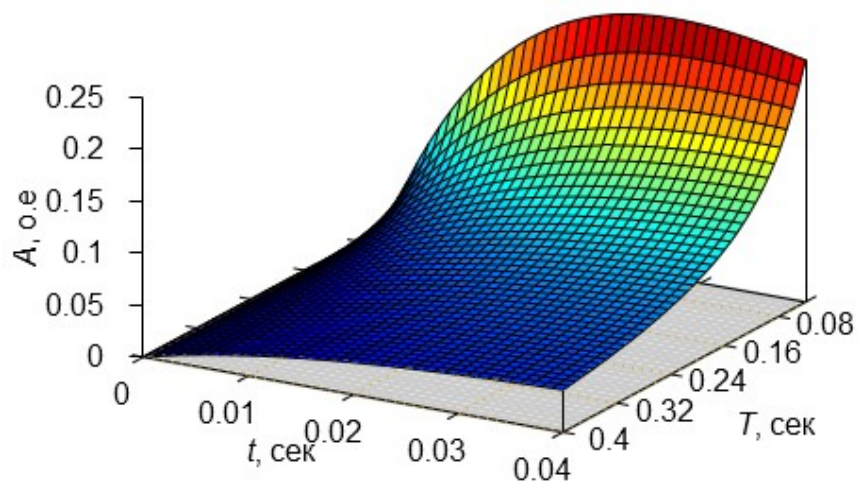


Рисунок 2.39 – Ошибка преобразования ТТНП

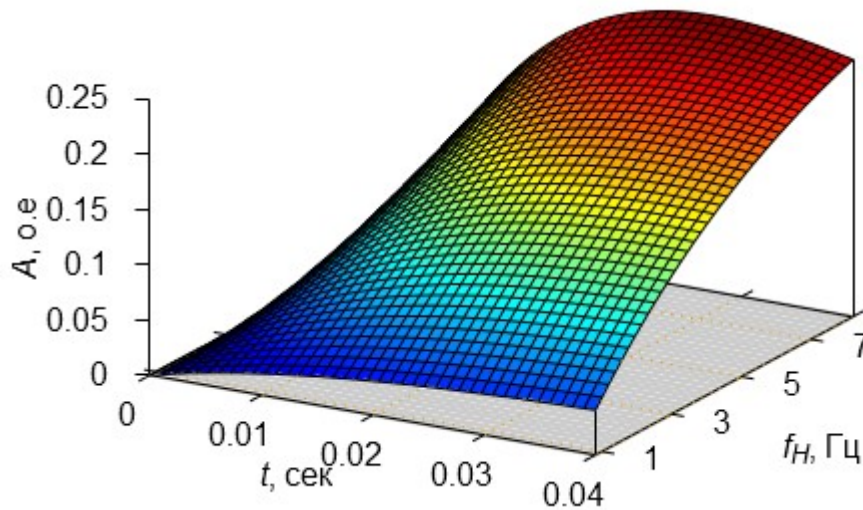


Рисунок 2.40 – Ошибка преобразования ТНП

Относительную квадратичную интегральную ошибку преобразования экспоненциального сигнала можно рассчитать, используя выражение:

$$I'_2 = \frac{1}{T_1\beta + 1}. \quad (2.53)$$

В качестве тестового сигнала для численной оценки динамической погрешности ТНП предлагается использовать синусоидальный сигнал длительностью полпериода.

Спектр такого сигнала показан на рисунке 2.25. Анализируя его можно сделать вывод, что наибольшая спектральная плотность приходится на частоту $\omega = 0$, что обуславливает сложность преобразования такого сигнала трансформатором тока. Зависимость относительной интегральной квадратичной ошибки от постоянной времени трансформатора в полулогарифмическом масштабе показана на рисунке 2.41.

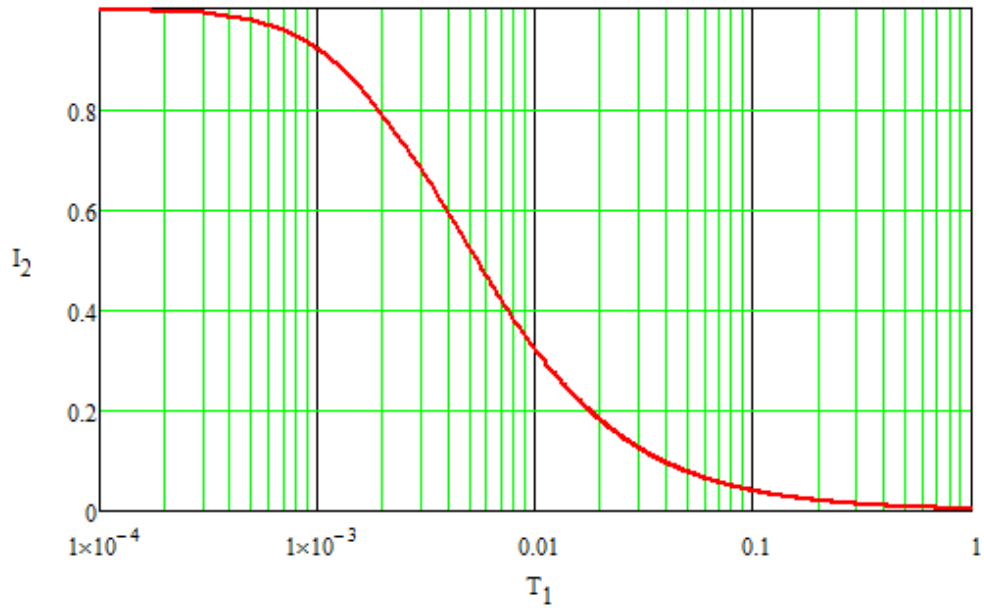


Рисунок 2.41 – Зависимость относительной интегральной квадратичной ошибки от постоянной времени трансформатора

Для регламентирования точности работы ТТНП в динамических режимах можно воспользоваться теми же классами точности, которые уже применяются для нормирования погрешностей трансформаторов тока для защиты [28] (таблица 3)

Таблица 3

Класс точности	Допустимая токовая погрешность	
	При номинальном токе	При токе максимальной кратности
5P	$\pm 1\%$	$\pm 5\%$
10P	$\pm 3\%$	$\pm 10\%$

В релейной защите используются ТТ с классом точности 10P, следовательно, для расчета наихудших допустимых параметров ТТНП, можно задаться уровнем относительной интегральной квадратичной ошибки, равным допустимой токовой погрешности при номинальном токе для данного класса точности.

$$I'_2(T_1) = 0.03.$$

При входном воздействии, заданном системой:

$$x(t) = \begin{cases} \sin(\omega t) & \text{при } t < \frac{\pi}{\omega}; \\ 0 & \text{при } t \geq \frac{\pi}{\omega} \end{cases};$$

$$\omega = 2\pi 50.$$

Простое аналитическое решение для $T_1(I'_2)$ найти затруднительно. Численное решение:

$$T_1 = 0.13258353.$$

Таким образом, ТТНП с постоянной времени меньше, чем полученное значение T_1 , будут иметь недопустимо высокую погрешность преобразования тока в переходных режимах.

Данная постоянная времени получена для точности преобразования 3%. Для приблизительного вычисления постоянной времени с произвольным заданием точности можно использовать рисунок 2.41. Также, для оценочных расчетов, можно вывести аналитическое выражение $T_1(I'_2)$, получив параметры эквивалентной экспоненты, имеющей такую же сложность преобразования ТТНП, как и половина периода синусоиды. Формализация задачи:

$$I'_{2\sin}(T_1) = I'_{2\exp}(T_1).$$

Решение:

$$\frac{1}{T_1\beta + 1} = 0,03; T_1 = 0.13258353;$$

$$\beta = 243.87141496.$$

Экспонента с коэффициентом затухания β будет преобразована ТТНП с такой же относительной интегральной ошибкой, как и половина периода синусоиды. Так как выражение для ошибки при экспоненциальном входном

воздействии гораздо проще такового для полупериода синусоиды, можно вывести аналитически:

$$T_1(I'_2) = \frac{1 - I'_2}{I'_2\beta}. \quad (2.54)$$

Ошибка вычисления по формуле, полученной переходом от синусоидальной формы сигнала к экспоненциальной показана на рисунке 2.42.

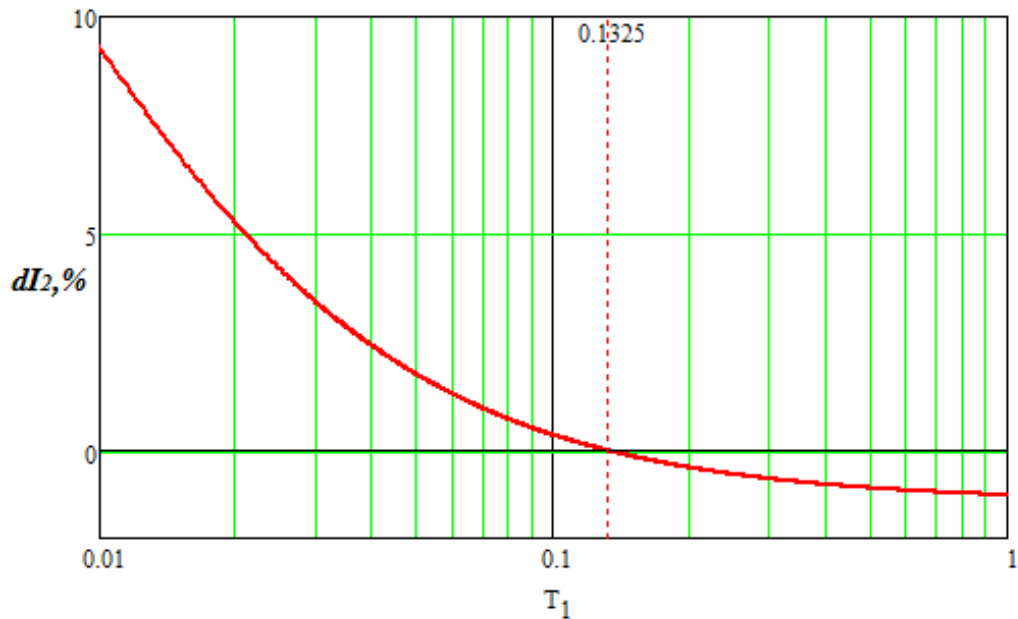


Рисунок 2.42 – Ошибка вычисления постоянной времени по упрощенной формуле

Определить постоянную времени ТТНП можно несколькими способами: определяя частоту сопряжения (величину, обратную постоянной времени) путем измерения трансформатором синусоидального тока в установившемся режиме, анализируя переходной процесс по любому заранее известному воздействию на трансформатор тока и анализируя переходный процесс при ненулевых начальных условиях.

Используя источник синусоидального тока, можно определить постоянную времени трансформатора следующим образом. При прохождении через ТТНП синусоидального тока следует сравнивать фазы первичного и вторичного токов, увеличивая частоту тока от 0 до значения, при котором вторичный ток опережает

первичный на угол $\varphi = 45^\circ$. Полученное значение угловой частоты связано с постоянной времени:

$$\omega = \frac{1}{T}. \quad (2.55)$$

Постоянную времени также можно определить, анализируя переходный процесс по вторичному току при заранее известном первичном. В этом случае требуется анализировать работу трансформатора под каждым тестовым воздействием.

Удобнее всего испытывать ТТНП при ненулевых начальных условиях. Схема метода изображена на рисунке 2.43.

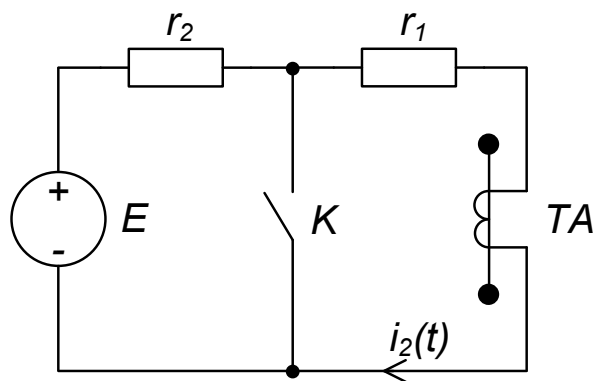


Рисунок 2.43 – Схема измерения постоянной времени ТТНП

Вторичная цепь ТТНП представляет собой вторичную обмотку и дополнительное сопротивление r_1 , включающее в себя сопротивление проводов, переходное сопротивление клемм и т.д. ТТНП насыщается источником постоянного тока, подключенным к вторичной обмотке, после этого замыкается ключ и в обмотке начинается переходный процесс, обусловленный ненулевыми начальными условиями (насыщение постоянным током). Он будет описываться выражением:

$$i_2(t) = A_{i_2} e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (2.56)$$

где T_1 – постоянная времени трансформатора тока нулевой последовательности; A_{i_2} – начальная амплитуда экспоненты.

Вид переходного процесса представлен на рисунке 2.44. Численное значение постоянной времени можно получить путем осциллографирования тока и последующего поиска значения T_1 по экспериментальным данным и известному аналитическому выражению.

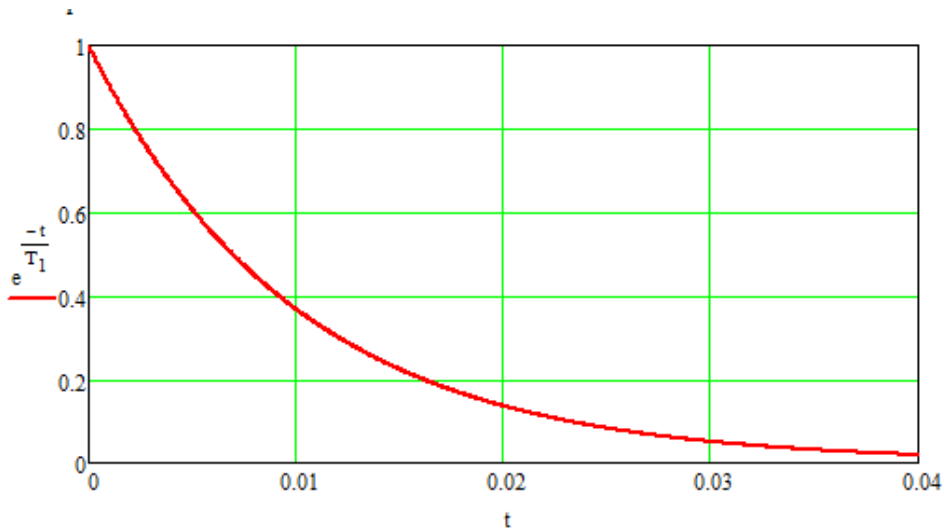


Рисунок 2.44 – Вид переходного процесса в ТТНП

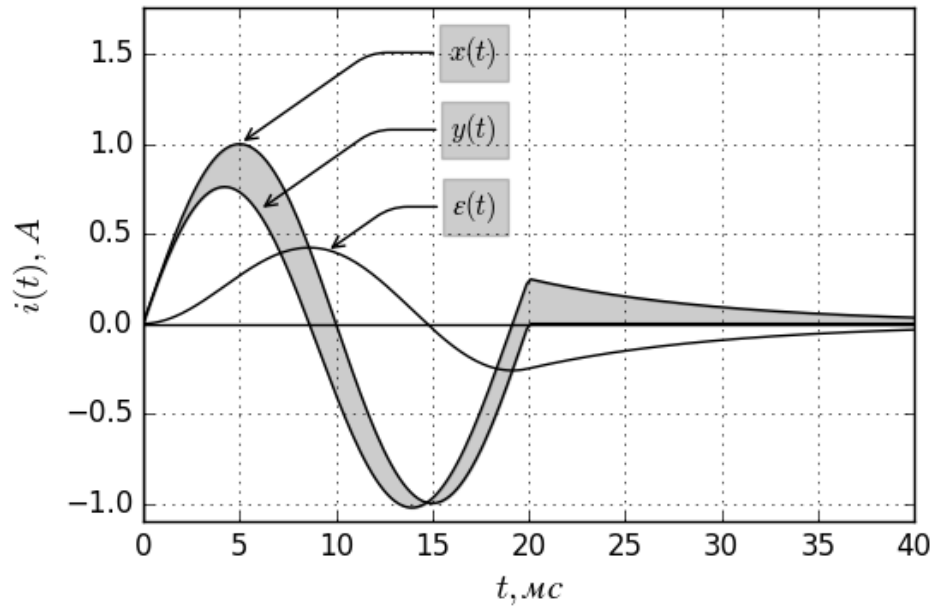
Также можно определить значение постоянной времени, зная одну точку переходного процесса:

$$T_1 = \frac{-t}{\ln\left(\frac{A}{A_{i_2}}\right)}; \quad (2.57)$$

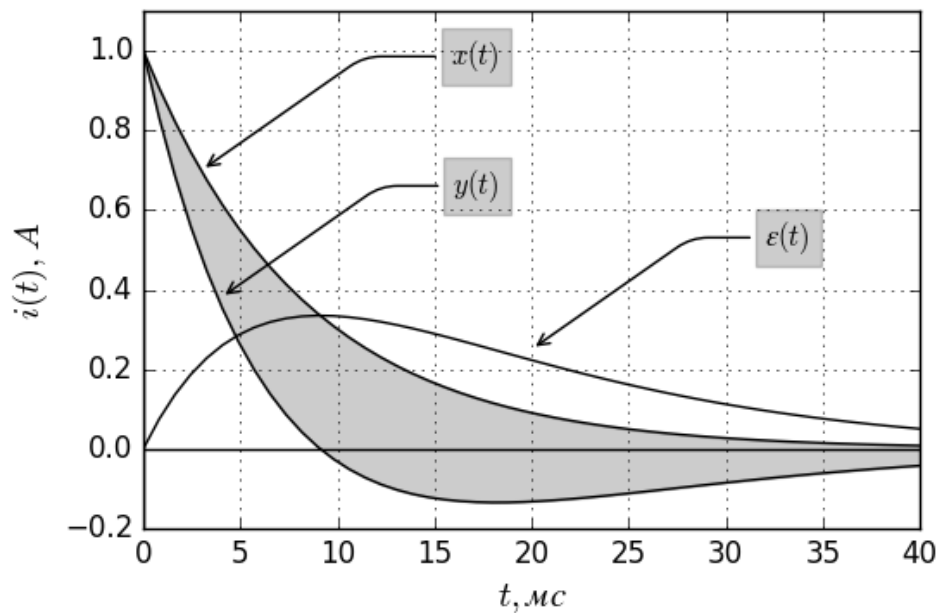
где t – выбранный момент времени переходного процесса; A – мгновенное значение тока в момент времени t .

Данный метод измерения постоянной времени использован для определения параметров двух ТТНП: Бреслер-ТЗРЛ-200 и ТЗРЛ-30 и последующего анализа

Расчетные осциллограммы сигналов и ошибок преобразования, позволяющие проанализировать прохождение сигнала синусоидальной формы (один период 50 Гц) и экспоненциальной формы (с постоянной времени затухания 50 с^{-1}) через ТТНП, показаны на рисунке 2.45. Как видно, ТТНП типа ТЗРЛ-30 передает сигналы со значительными погрешностями.



a)



б)

Рисунок 2.45 – Сигналы и погрешности ТТНП.

Для проверки адекватности построенных математических моделей прохождения сигналов через ТТНП исследуемому процессу проведен сравнительный анализ результатов, полученных путем теоретического анализа и экспериментальным путем.

На рисунке 2.46 показаны картины процессов, полученные в результате экспериментов.

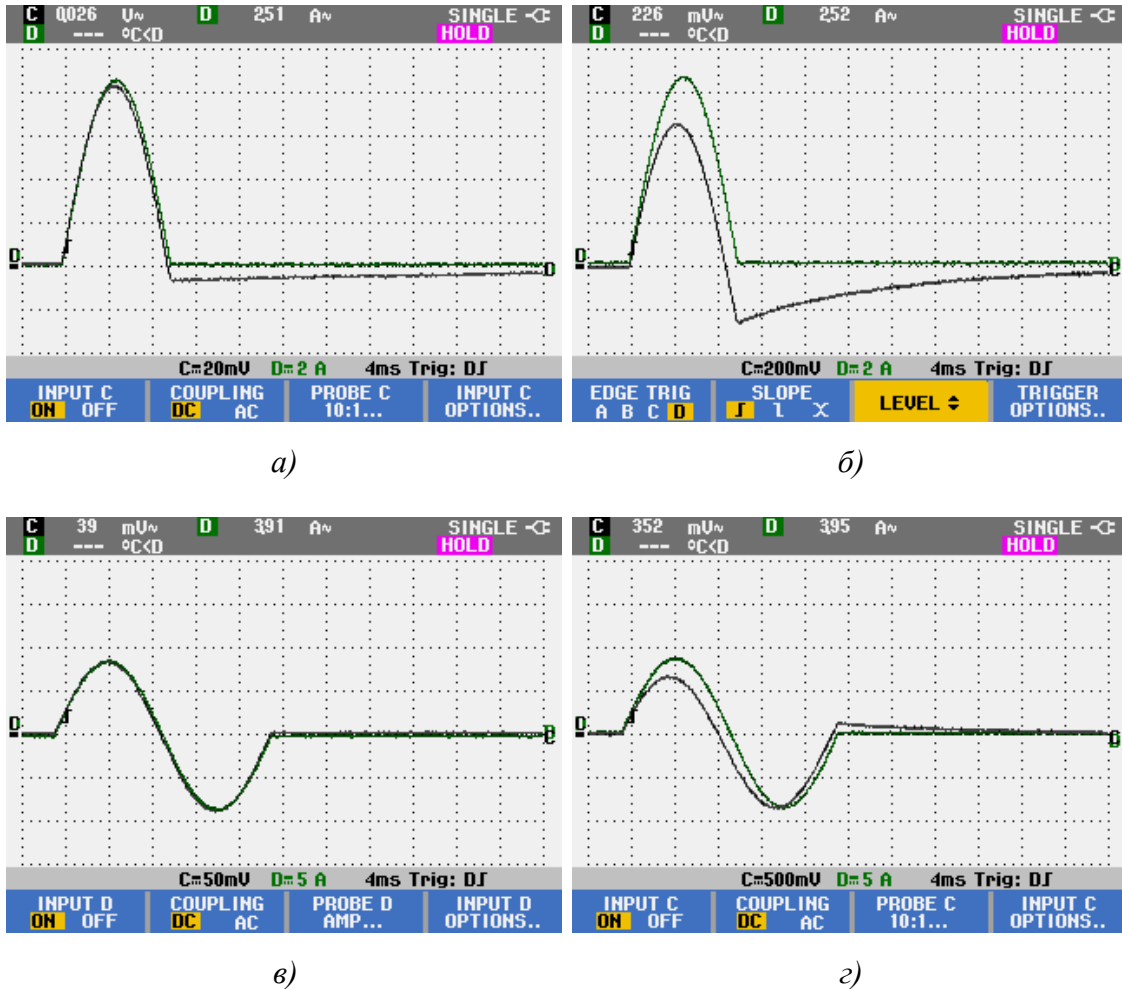


Рисунок 2.46 – Осциллограммы прохождения тока нулевой последовательности через ТНП Бреслер-ТЗРЛ-200/1 (а, в) и ТЗРЛ-30/1 (б, г).

Результаты экспериментальных исследований подтверждают адекватность математических моделей ТНП и правомерность принятых при разработке этих моделей ограничений и допущений.

Выводы

1. Базовый вариант единой системы компенсации построен по комбинированной схеме и предполагает отдельную компенсацию емкостной составляющей тока ОЗЗ на частоте сети и остаточного тока, содержащего другие составляющие. Раздельная компенсация этих составляющих позволяет снизить

требования к мощности управляемого источника, используемого для компенсации остаточного тока.

2. Предложенная концепция отдельной компенсации позволяет использовать существующие средства компенсации тока ОЗЗ на основе дугогасящих реакторов путем подключения к ним компенсатора остаточного тока на основе управляемого источника тока через согласующий трансформатор.

3. Предложенный метод компенсации полного тока на основе параметров сети, измеряемых в нормальном режиме, позволяет эффективно уменьшать ток в месте повреждения и гасить электрическую дугу в случае устойчивого ОЗЗ.

4. Использование метода предотвращения повторных пробоев позволяет в случае дугового ОЗЗ достичь стабильной работы сети без периодических кратковременных перенапряжений высокой кратности, что увеличивает надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей.

5. Созданная математическая модель учитывает все параметры, оказывающие существенное влияние на процессы при ОЗЗ. С её помощью исследованы процессы компенсации тока ОЗЗ при полностью контролируемых заданных условиях моделирования, что исключает влияние на результаты случайных побочных факторов. С небольшими, по сравнению с физическим моделированием, затратами удалось исследовать разные варианты управляемого заземления, определить его основные свойства и предельные параметры.

6. В результате исследования динамических свойств электромагнитных ТТНП разработаны рекомендации, позволяющие повысить точность измерения токов нулевой последовательности в стационарных и динамических режимах путем расширения полосы пропускания в области нижних частот за счет увеличения коэффициента трансформации.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УПРАВЛЯЕМОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ СЕТИ

3.1 Разработка опытного образца управляемого заземления нейтрали сети 10 кВ

Аппаратная часть опытного образца управляемого заземления нейтрали сети выполнена в виде комплекса, содержащего нейтралеобразующий трансформатор, управляемый ДГР, компенсатор остаточного тока и систему управления компенсацией полного тока ОЗЗ. Номинальная мощность составляет 800 кВА при номинальном напряжении 10, 5 кВ.

Структурная схема опытного образца показана на рисунке 3.1.

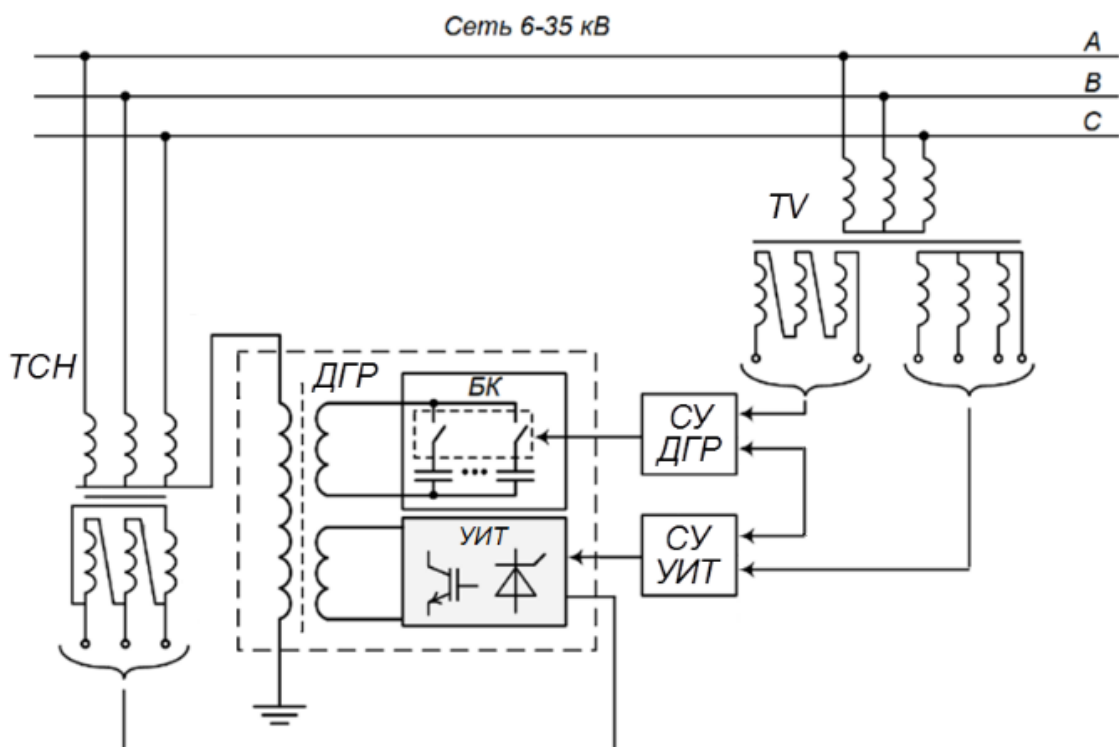


Рисунок 3.1 – Структурная схема опытного образца

Нейтралеобразующий трансформатор мощностью 1000 кВА предназначен для формирования искусственной нулевой точки сети, а также используется в качестве источника питания для управляемого источника тока и трансформатора

собственных нужд подстанции. Особенность ДГР, используемого в опытном образце, заключается в том, что он содержит дополнительную обмотку, через которую подключается к сети управляемый источник тока УИТ, и датчики сигналов для системы управления. Дополнительная обмотка обеспечивает гальваническое разделение выходных цепей УИТ и силовой сети. При этом существенно смягчаются условия работы УИТ, и, как следствие, снижается степень его уязвимости и достигается повышение надежности работы в целом.

Внешний вид специального ДГР с дополнительной обмоткой компенсации остаточного тока и шкафа компенсатора остаточного тока ОЗЗ показан на рисунке 3.2, а и рисунке 3.2, б соответственно.

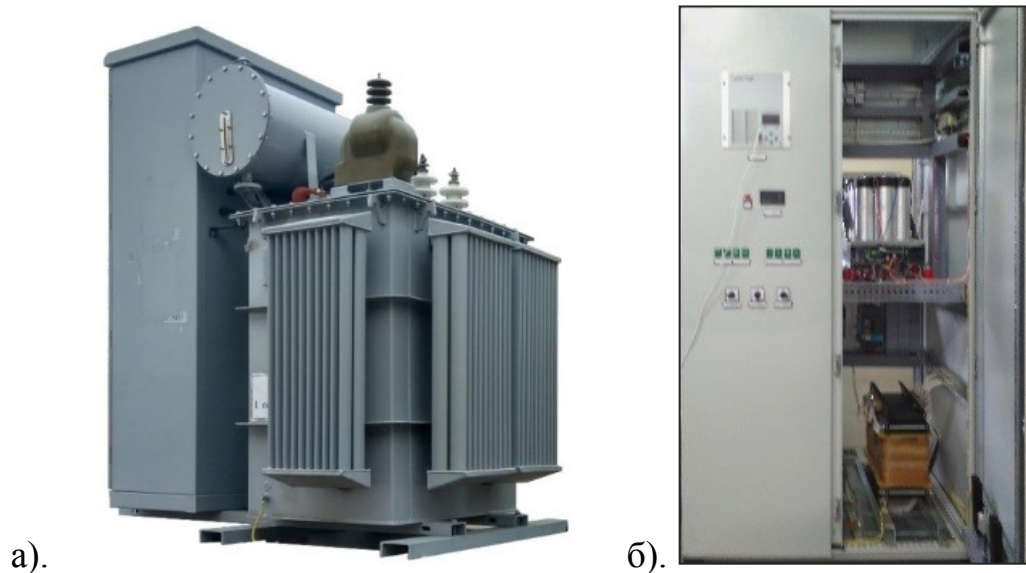


Рисунок 3.2 – Внешний вид специального ДГР (а) и шкафа компенсатора остаточного тока (б)

К управляемому источнику тока предъявляются особые требования. УИТ должен быть основан на технологии, дающей возможность простого масштабирования его мощности. Возможность регулирования выходного тока и генерации тока с частотами, отличающимися от частоты сети, также являются обязательными условиями. Кроме этого, необходимо, чтобы источник не генерировал паразитных высших гармонических составляющих, способных поддержать горение дуги. Сегодня эти условия могут быть выполнены в полной мере на базе современной силовой электроники и микропроцессорных средств управления, состояние развития которых позволяет создать систему, решающую

поставленные задачи. Современные IGBT-транзисторы позволяют построить управляемый источник тока, который не генерирует существенных высших гармонических составляющих. Этого можно достичь за счет увеличения несущей частоты при использовании принципа широтно-импульсной модуляции. При этом пульсации тока компенсации, вызванные широтно-импульсным управлением, будут эффективно сглаживаться продольными индуктивностями линии и индуктивностями рассеяния согласующего устройства.

Программная часть опытного образца реализует разработанный метод компенсации полного тока ОЗЗ в общей системе управления ДГР и управляемого источника тока (СУ ДГР и СУ УИТ), выполненной на основе базового микропроцессорного терминала «Бреслер-0107» и блока управления компенсатором. Последовательно, на основе предложенной концепции, разработаны управляющие программы компенсации полного тока ОЗЗ.

Для управления компенсатором разработан отдельный блок на основе ПЛИС. Структурная схема блока управления компенсатором представлена на рисунке 3.3.

В блоках 9 – 12 осуществляется масштабирование и фильтрация сигналов. После фильтрации сигналы поступают на блок 14, формирующий сигнал управления резонансной компенсацией (ФРК), и на блоки 18, 20 и 21, осуществляющие измерения текущей проводимости КНП сети, остаточного тока в месте повреждения, и активного и реактивного токов КНП сети (блок 21). Сигнал с выхода блока 14 поступает на исполнительный орган реактивной компенсации (ИОР), который, посредством ступенчатого или плавного регулирования индуктивности, переводит реактор в положение резонансной настройки.

Формируемые блоками 18 и 21 сигналы для управления компенсацией остаточного тока поступают на сумматор 19, где происходит их наложение. Результирующий сигнал с выхода сумматора 19 поступает на прямой вход усилителя ошибки 17, при этом на инверсный вход подается сигнал обратной связи, получаемый с обмотки трансформатора тока 5 в выходной цепи УИТ.

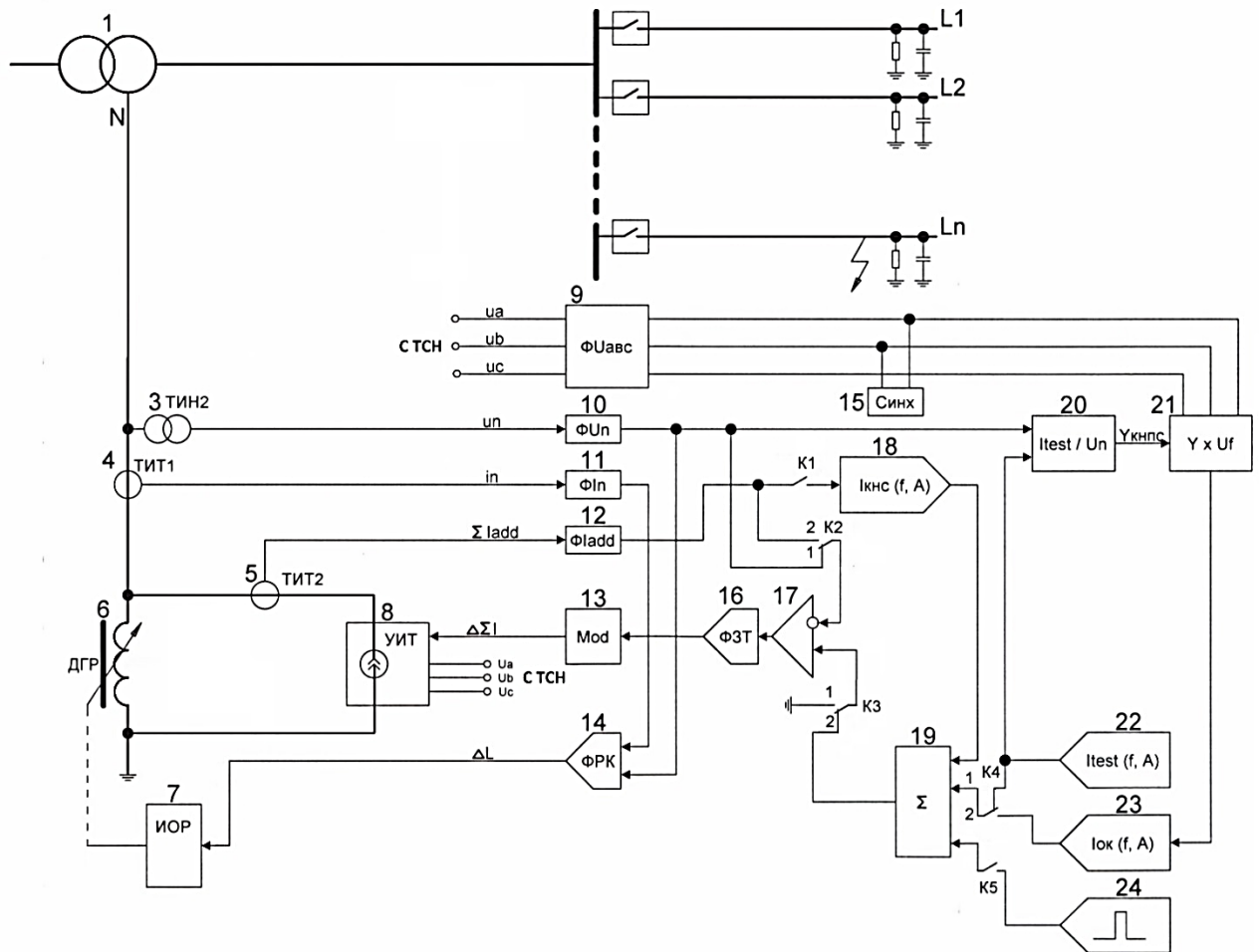


Рисунок 3.3 – Структурная схема блока управления компенсатором

С выхода усилителя 17 сигнал рассогласования поступает на формирователь 16, а затем на модулятор 13, который посредством широтно-импульсного регулирования тока источника 8, обеспечивает его переход в режим компенсации остаточного тока.

В условиях нормальной работы сети источник 8 функционирует в режиме генерации в нейтраль тестового тока, задаваемого блоком 22. При этом, в зависимости от используемого метода измерения параметров КНП сети, частота тестового тока может совпадать с частотой сети, либо быть кратной ей, например, в 2 или 3 раза ниже частоты сети. В том случае, когда предполагается применение косвенного метода измерений с использованием свободных колебаний в контуре сети, источник 8 переводится в режим генерации импульсного тока посредством подключения коммутатором К5 генератора тестового импульса 24. Переключение источника УИТ в режим компенсации остаточного тока производится по факту

возникновения ОЗЗ при помощи коммутатора К4. С помощью коммутаторов К1 – К3 реализуются разнесенные во времени измерительные процедуры, производимые блоком 18, контролирующим в условиях нормальной работы сети форму и величину тока, уменьшающего напряжение смещения нейтрали.

По факту возникновения ОЗЗ в блоке 18 происходит запись осциллограммы тока, действующего в период, предшествующий замыканию на землю. В результате с выхода блока 18 продолжает поступать сигнал управления УИТ, обеспечивающий нейтрализацию в месте повреждения составляющей тока ОЗЗ, обусловленной неравенством проводимостей фаз относительно земли. Вычисление активной и реактивной составляющих тока КНП сети выполняется в блоке 21 с учетом реальной расстройки КНП сети на момент возникновения ОЗЗ. Для этого используются записанные в блоке 20 данные последних измерений активной и реактивной проводимостей КНП сети.

Использование ПЛИС для управления компенсатором остаточного тока повышает надежность всей схемы и позволяет снизить общую задержку распространения сигналов.

3.2 Лабораторные испытания с использованием физической модели сети

Физическая модель сети с компенсацией полного тока ОЗЗ

Сложность процессов при ОЗЗ, неоднозначность параметров элементов и стремление наиболее точно воспроизвести в модели реальные процессы вызвали необходимость создания физической модели [18, 37].

С целью получения наиболее близких по сущности процессов горения дуги, физическая модель построена на номинальное напряжение 10 кВ с током ОЗЗ, примерно, 30 А. Для моделирования электрической дуги при ОЗЗ в модели использованы специальные разрядники рогового и шарового типов, а также – кабель с искусственно поврежденной изоляцией. Для создания активной составляющей тока ОЗЗ в модели применен блок резисторов БР, который в опытах ОЗЗ обуславливает активный ток, примерно, 5, 4 А. Расстройка ДГР составляла менее 0, 5%.

Площадка, используемая для физического моделирования, оборудована высоковольтной испытательной установкой, имитирующей условия, приближенные к условиям реальной эксплуатации, и обеспечивающей функционирование испытуемого изделия в соответствии с его назначением. Схема физической модели представлена на рисунке 3.4.

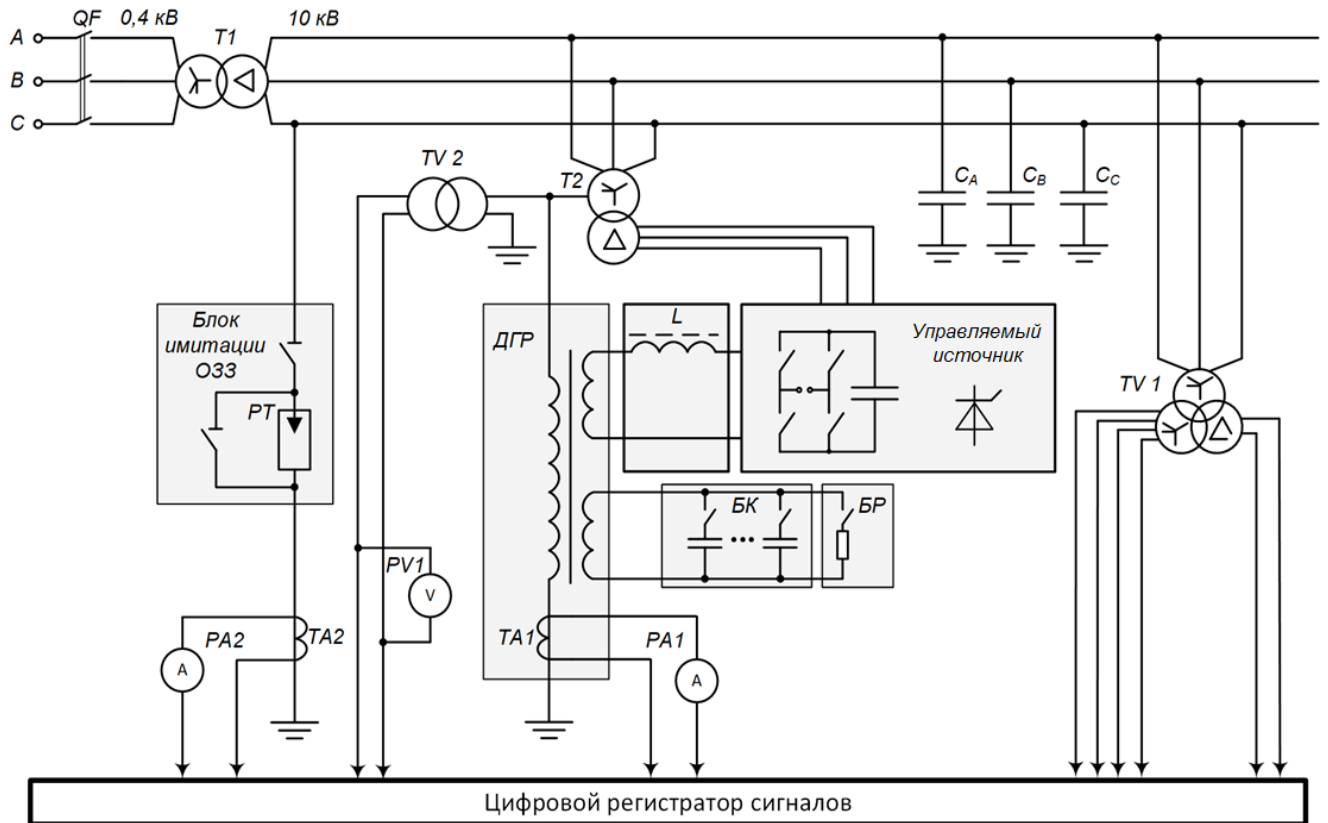


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема физической модели

Трехфазная распределительная сеть моделируется с помощью повышающего трансформатора 0, 4/10 кВ Т1 и высоковольтных конденсаторов C_A , C_B , C_C , включенных между фазными проводниками и землей. Дугогасящий реактор с конденсаторным управлением в цепи вторичной обмотки подключен к сети через нейтралеобразующий трансформатор Т2. Управляемый источник (реализованный на основе ШИМ-конвертора) подключен к сети через дополнительную обмотку ДГР. Питание управляемого источника осуществляется от вторичной обмотки трансформатора Т2.

Остаточный ток складывается из некомпенсированной емкостной составляющей тока, активной составляющей, создаваемой потерями в силовом

оборудовании и блоком резисторов (БР), и высокочастотной гармонической составляющей, обусловленной нелинейностью кривых намагничивания магнитопроводов силового оборудования.

Физическое моделирование повреждений в сети 10 кВ

Однофазное замыкание на землю создается специальной электрической цепью, соединяющей поврежденную фазу с землей, которая содержит кабель, блок имитации ОЗЗ, измерительный трансформатор тока с амперметром и заземление. Для моделирования дуговых замыканий использованы разрядники разных конструкций. Замыкания, сопровождающиеся открытой дугой (например, замыкания не воздушной ЛЭП), имитируются роговым разрядником. Фотография дуги в роговом разряднике с током 10А показана на рисунке 3.5.

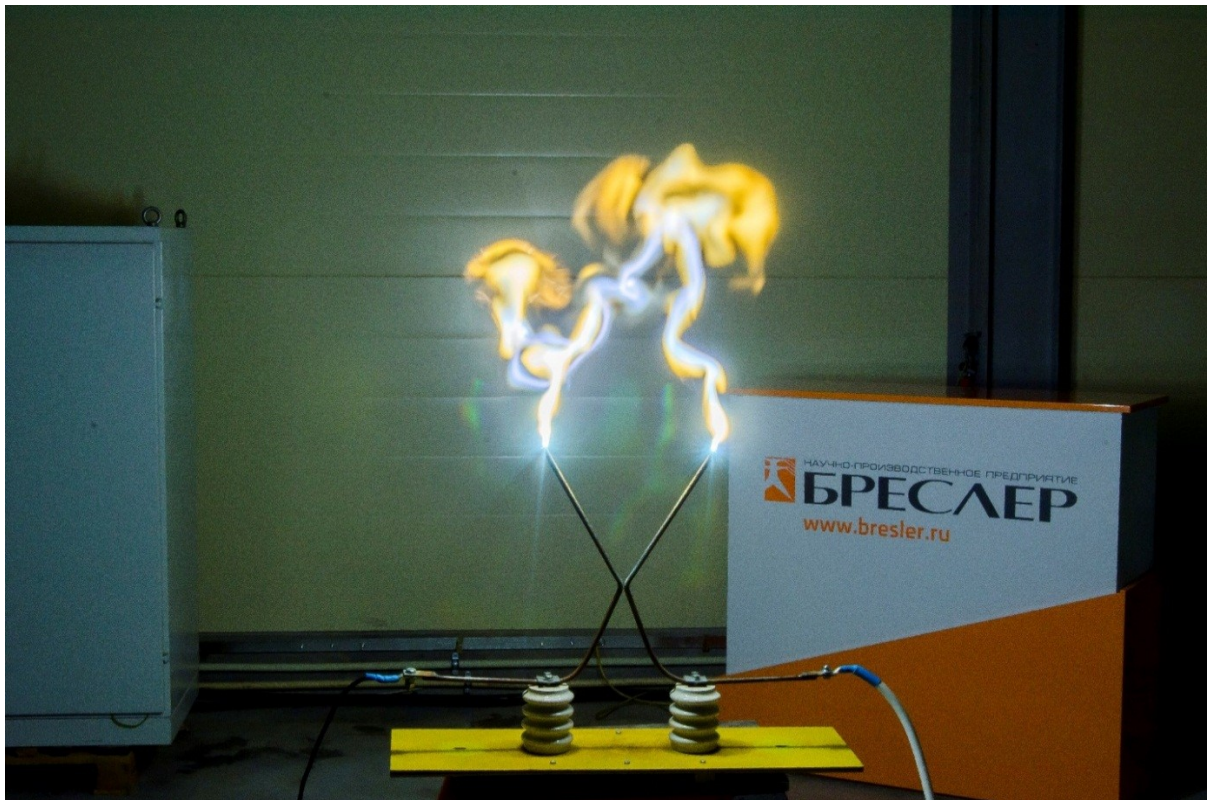


Рисунок 3.5 – Фотография дуги в роговом разряднике при токе 10 А

Фотография дуги при ОЗЗ с током 45А показана на рисунке 3.6.

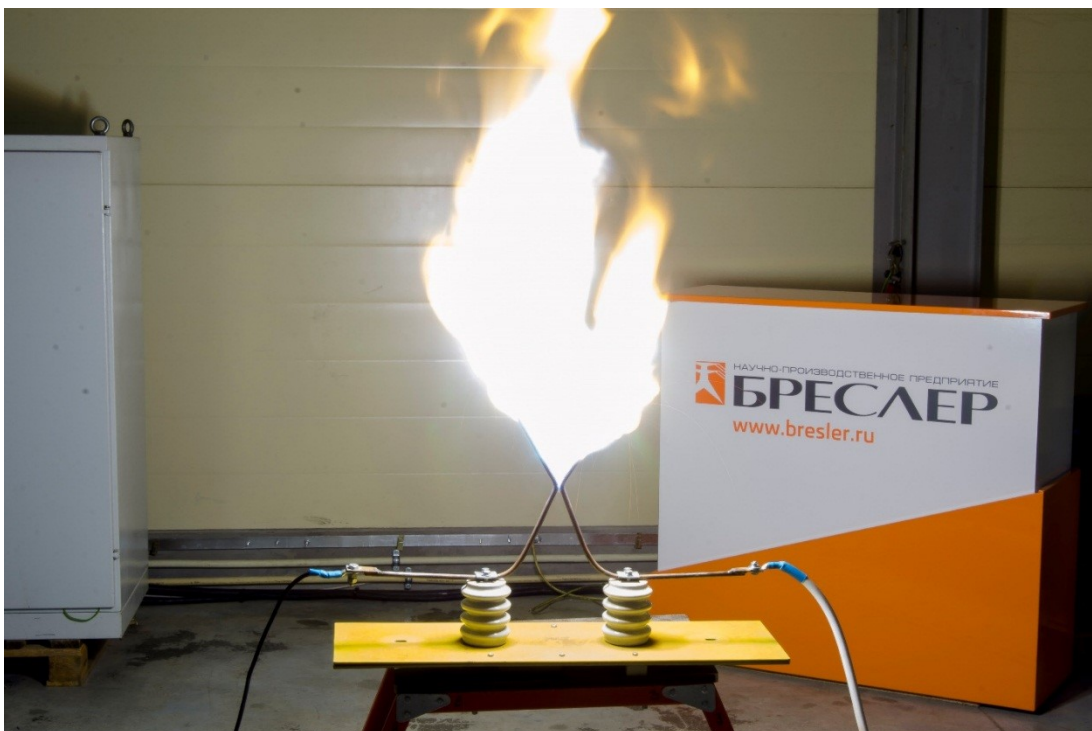


Рисунок 3.6 – Фотография дуги в роговом разряднике при токе 45 А

Для физического моделирования ОЗЗ в кабельных линиях создан разрядник, представляющий собой кабель из сшитого полиэтилена с искусственно поврежденной изоляцией. На рисунке 3.7 показано дуговое замыкание в кабеле с током 5А.

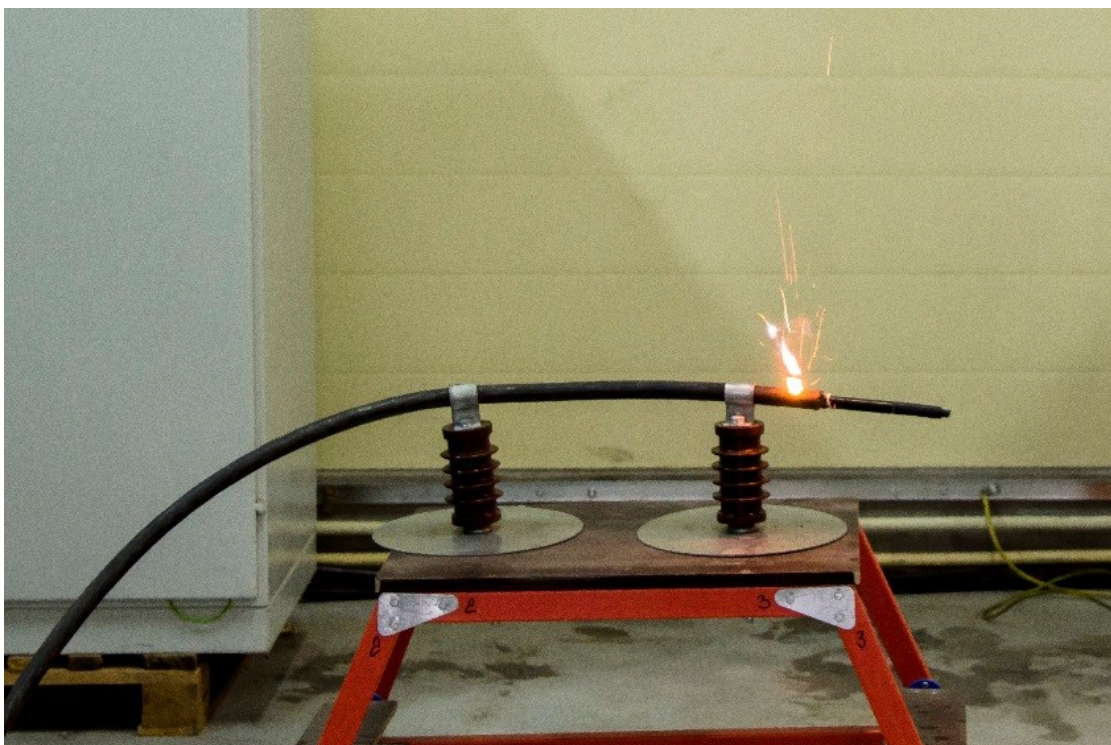


Рисунок 3.7 – Фотография дуги в кабеле из сшитого полиэтилена при токе 5А

На рисунке 3.8 показано дуговое замыкание в кабеле с током 10А.

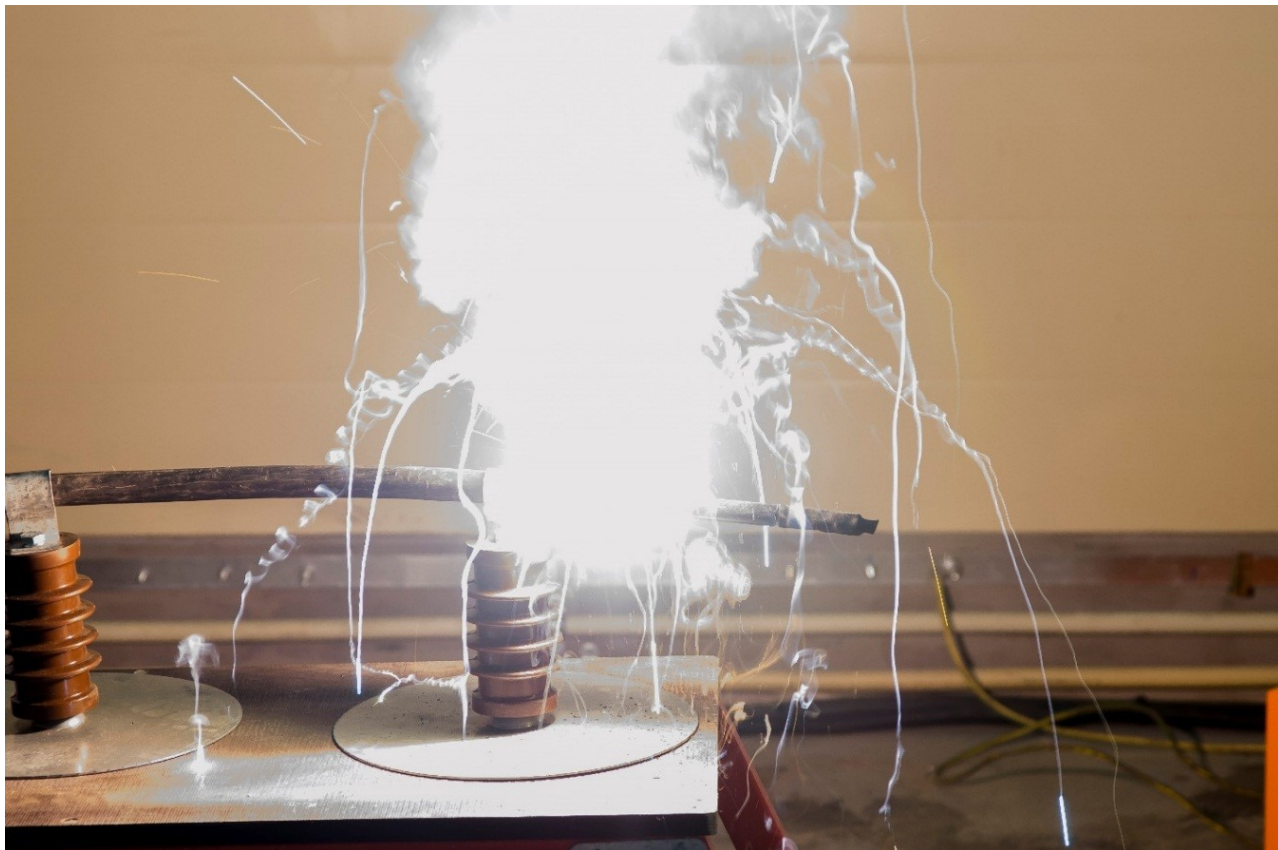


Рисунок 3.8 – Дуговое замыкание в кабеле из сшитого полиэтилена при токе 10А

3.3.3. Исследование опытного образца при разных видах ОЗЗ

Методика проведения физического моделирования предусматривает два этапа: моделирование компенсации полного тока в режиме устойчивого ОЗЗ и моделирование компенсации полного тока в режиме перемежающегося дугового ОЗЗ.

На первом этапе замыкание создается путем соединения фазного проводника на землю через блок имитации ОЗЗ, внутри которого разрядник шунтируется разъединителем. Питание физической модели включается, когда в моделируемой сети уже присутствует устойчивое «металлическое» ОЗЗ. Через небольшой промежуток времени после включения установки под напряжение, включается система компенсации полного тока, вследствие чего уменьшается ток в месте повреждения. Процесс осциллографируется на интервале времени 3-4 с, и, затем, питание модели сети отключается.

На втором этапе (компенсация полного тока в режиме дугового ОЗЗ) разъединитель, шунтирующий разрядник, отключается и подается напряжение на физическую модель сети. Система компенсации переводится в автоматический режим, в котором инвертор включается при обнаружении однофазного замыкания в сети.

Проведен опыт устойчивого ОЗЗ в двух режимах. В первом, при настройке ДГР близкой к резонансной остаточный ток составил 4,7 А. Во втором, при недокомпенсации остаточный ток был 5,4 А.

Осциллограмма опыта с остаточным током 4,7 А представлена на рисунке 3.9. На осциллограмме показаны 7 сигналов: напряжение фазы А, напряжение фазы В, напряжение фазы С, напряжение нулевой последовательности, ток в месте повреждения, ток управляемого инвертора, ток реактора.

Как видно, после включения системы компенсации в момент времени $t=6810$ мс (первая вертикальная метка) появился ток ОЗЗ. Через 80 мс, после начала переходного процесса, действующее значение тока в месте повреждения уменьшилось в несколько раз. Ток в месте ОЗЗ до включения компенсатора составил 4,7 А, остаточный ток после компенсации не превышает 0,26 А. Расстройка составила -0,2%. Абсолютная величина статической ошибки в данном случае составляет 260 мА. Ток в месте повреждения уменьшился в $\frac{4,7}{0,26} \sim 18$ раз.

Осциллограмма опыта с остаточным током 5,4 А представлена на рисунке 3.10. Ток в месте ОЗЗ до включения компенсатора составил 5,4 А, остаточный ток после компенсации не превышает 0,21 А. Расстройка составила 3,2%. Абсолютная величина статической ошибки в данном случае составляет 320 мА. Ток в месте повреждения уменьшился в $\frac{5,44}{0,21} \sim 26$ раз.

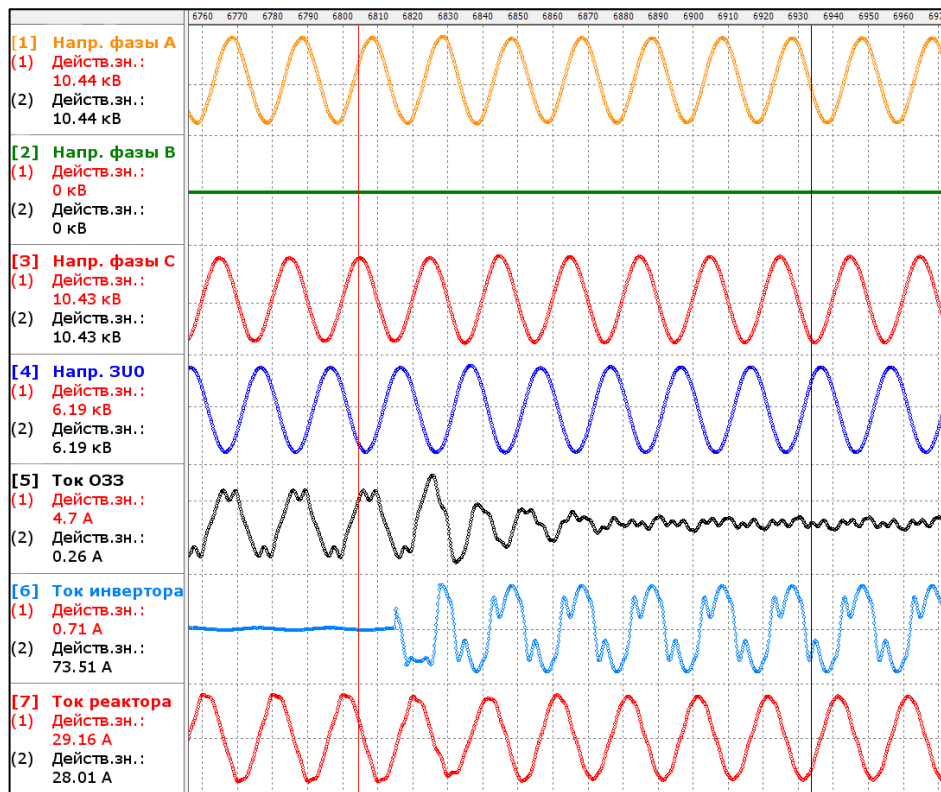


Рисунок 3.9 – Осциллограмма устойчивого ОЗЗ с остаточным током 4,7 А

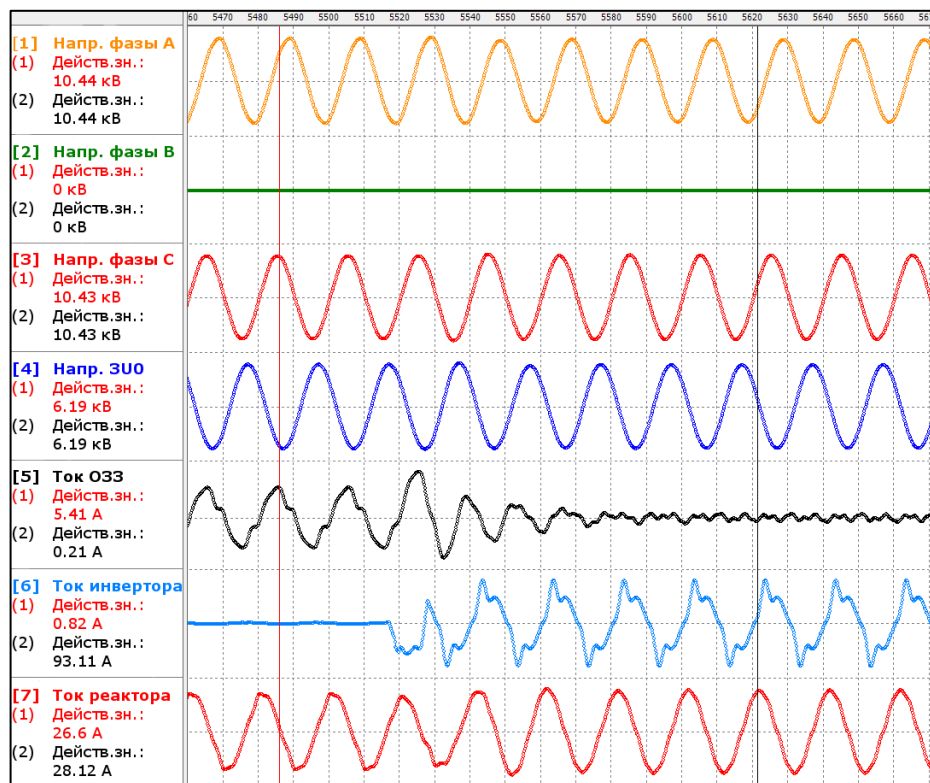


Рисунок 3.10 – Осциллограмма устойчивого ОЗЗ с остаточным током 5,4 А

Оценены динамические свойства системы компенсации полного тока. Для этого проведены два специальных опыта устойчивого ОЗЗ (рисунок 3.11).

Первый, при настройке ДГР близкой к резонансной (расстройка $-0, 2\%$, рисунок 3.12). Вторым, при недокомпенсации (расстройка $3, 2\%$, рисунок 3.13).

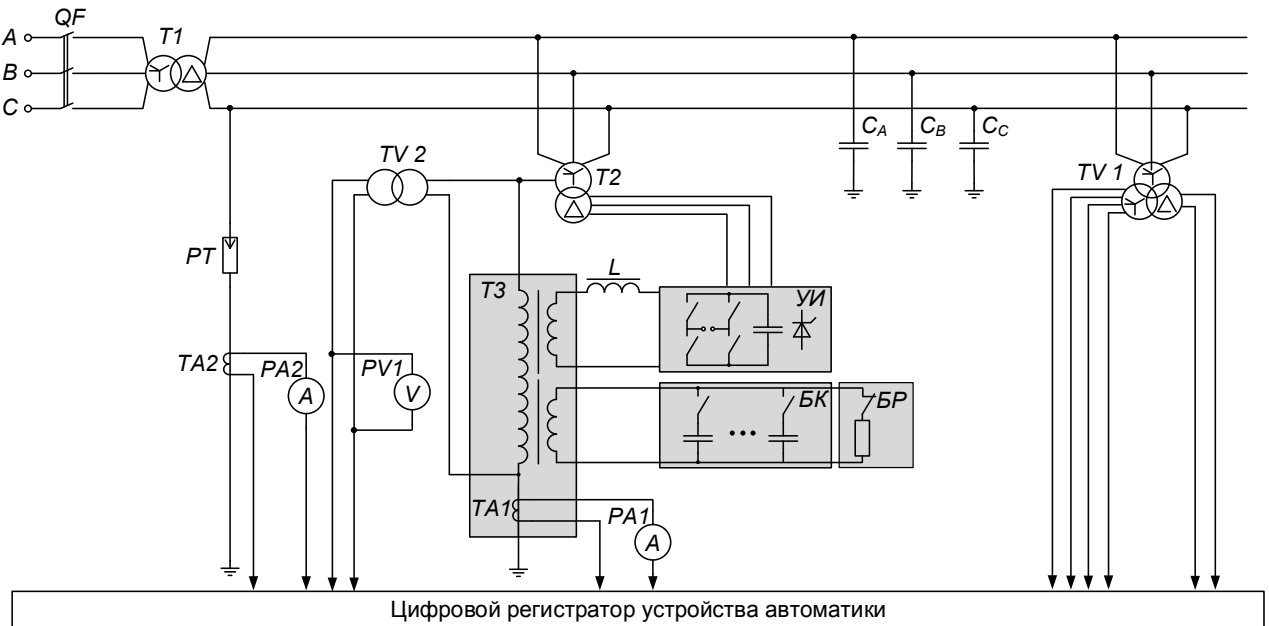


Рисунок 3.11 – Схема физической модели с дуговым ОЗЗ

Как видно (см. рисунок 3.12), через 25 мс после возникновения замыкания включается инвертор и начинается процесс уменьшения тока в месте повреждения и гашения дуги. После включения инвертора за время, приблизительно равное одному периоду, ток в месте повреждения прекращается вследствие полного гашения дуги и отсутствия в месте повреждения условий для повторного зажигания. С момента начала замыкания до полного гашения дуги проходит не более трех периодов колебаний промышленной частоты (60 мс). Для предотвращения повторных электрических пробоев места повреждения система управления компенсацией поддерживает близкое к нулю напряжение повреждённой фазы, создавая таким образом «виртуальное замыкание на землю» в распределительной сети. «Виртуальное замыкание на землю» отличается от обычного ОЗЗ тем, что оно является полностью управляемым состоянием сети и при нем отсутствует ток в месте повреждения.

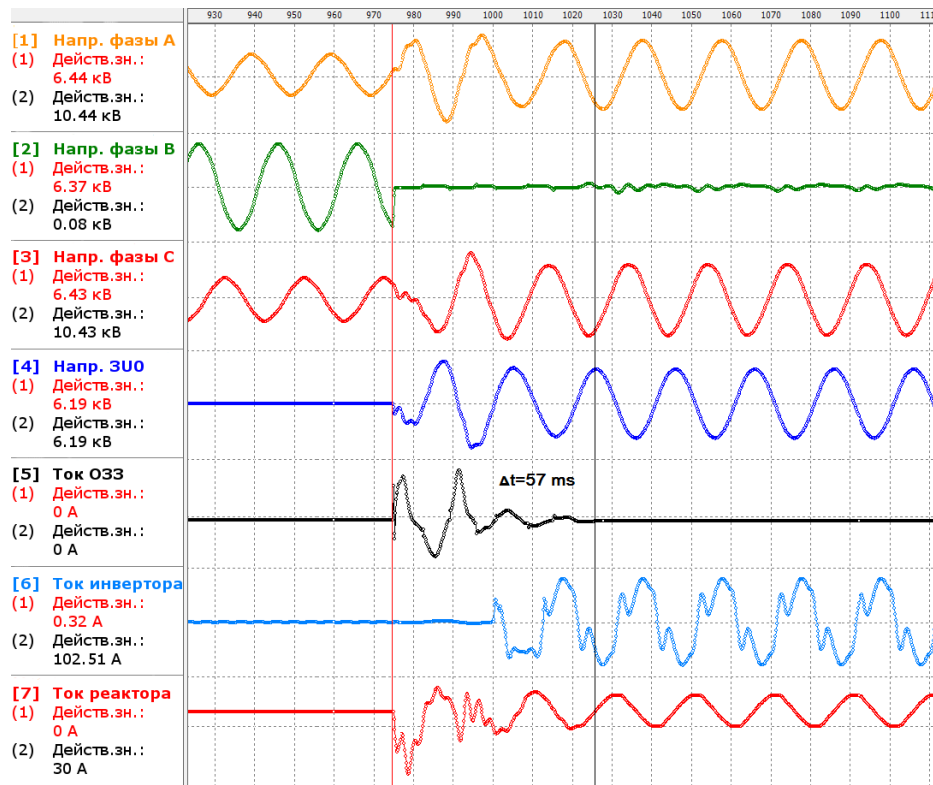


Рисунок 3.12 – Осциллограмма опыта дугового ОЗЗ в режиме, близком к резонансному с компенсацией полного тока

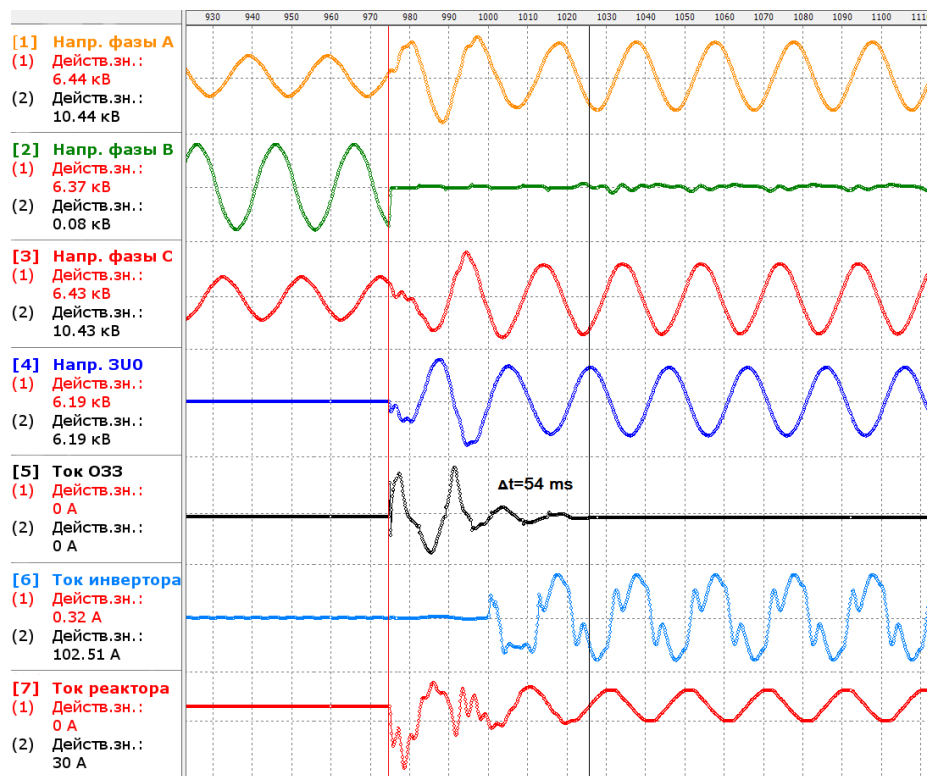


Рисунок 3.13 – Осциллограмма опыта дугового ОЗЗ в режиме, недокомпенсации с компенсацией полного тока

Результаты моделирования дуговых ОЗЗ при различном времени восстановления пробивного напряжения, а также ОЗЗ при введении секции в работу показаны в приложении 1.

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что система устойчива, так как при начальном возмущении (включении системы) в регулируемом параметре (токе в месте повреждения) возникают быстрозатухающие колебания. Синусоидальный ток после окончания переходного процесса не является автоколебательным и обусловлен наличием статической ошибки регулирования и непрерывным синусоидальным входным воздействием.

Предельные динамические возможности при данных алгоритмах управления ограничены, в основном, физическими свойствами дуги и не зависят от мощности системы компенсации. Из серии опытов, проведенных при различных условиях, установлено, что время от момента начала замыкания до полного гашения дуги составляет не более 60 мс.

Предельные статические возможности системы зависят только от мощности установленных силовых компонентов системы, таких как управляемый инвертор и дугогасящий реактор, и измерительных, таких как трансформаторы тока и напряжения, терминалы РЗА. Неидеальность преобразовательных трактов системы не позволяет установить высокий коэффициент обратной связи в системе автоматического управления из-за риска возникновения автоколебаний, что является причиной высокой статической ошибки компенсации в режиме устойчивого замыкания. Можно отметить, что в случае дугового замыкания статическая ошибка равна нулю вследствие отсутствия замкнутого контура циркуляции тока (электрической дуги).

3.3 Исследования опытного образца в реальных условиях эксплуатации на действующей подстанции

Опытный образец управляемого заземления с функцией компенсации полного тока ОЗЗ разработан, изготовлен и введен в опытную эксплуатацию на

действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Схема подключения образца на подстанции показана на рисунке 3.14.

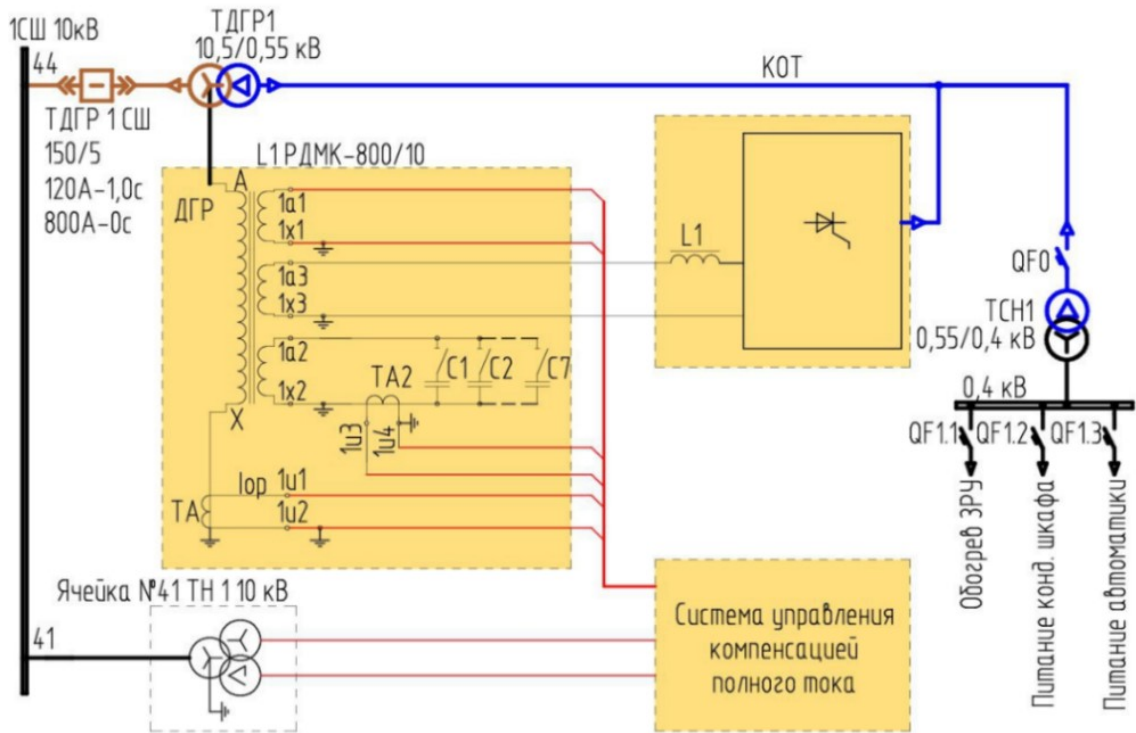


Рисунок 3.14 – Схема подключения опытного образца на подстанции

За время работы опытного образца в сети произошло несколько ОЗЗ. Во всех случаях система компенсации полного тока идентифицировала замыкание и перешла в режим компенсации полного тока.

Осциллограмма токов и напряжений во время работы опытного образца при ОЗЗ показана на рисунке 3.15. Как видно, на фазе С возникло дуговое однофазное замыкание. После выдержки времени система управляемого заземления дала команду на включение управляемого источника тока. При этом, в качестве сигнала задания использовалось мгновенное значение восстанавливающегося напряжения повреждённой фазы С.

Автоматикой управления записана осциллограмма события, при котором напряжение нулевой последовательности увеличилось выше допустимого предела. Осциллограмма, демонстрирующая работу управляемого заземления в данном режиме показана на рисунке 3.16.

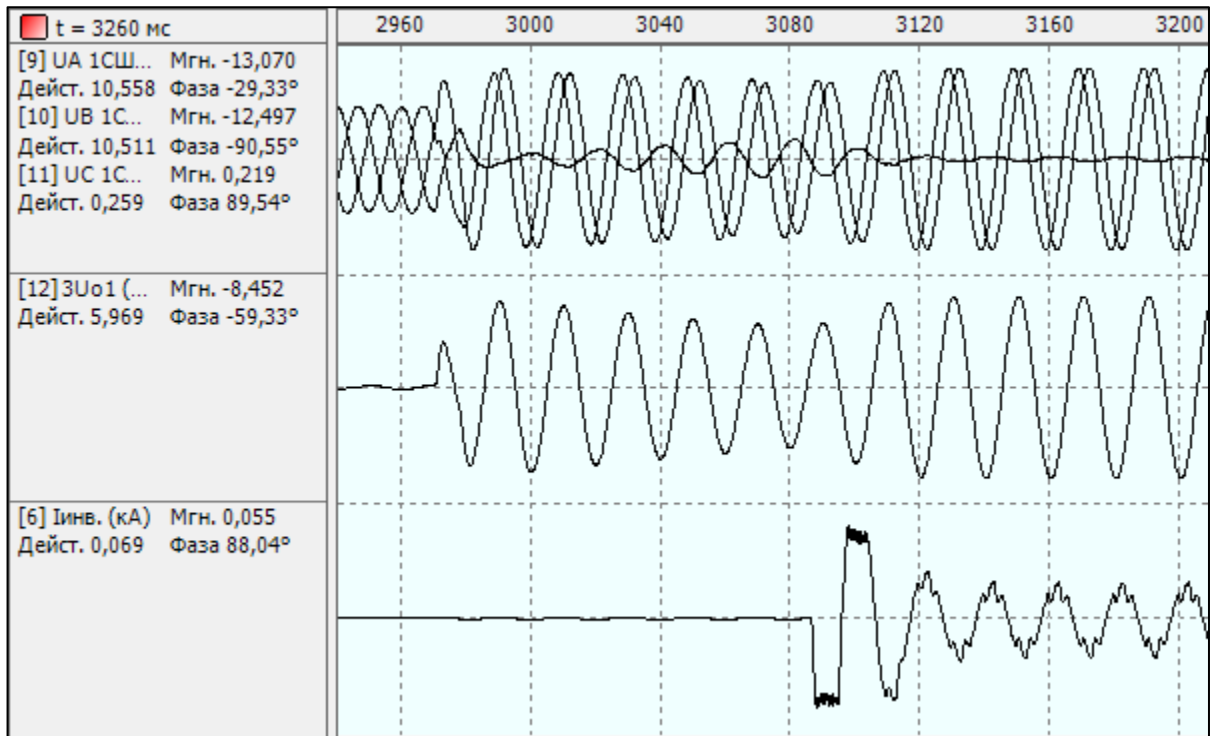


Рисунок 3.15 – Осциллограмма работы опытного образца при ОЗЗ

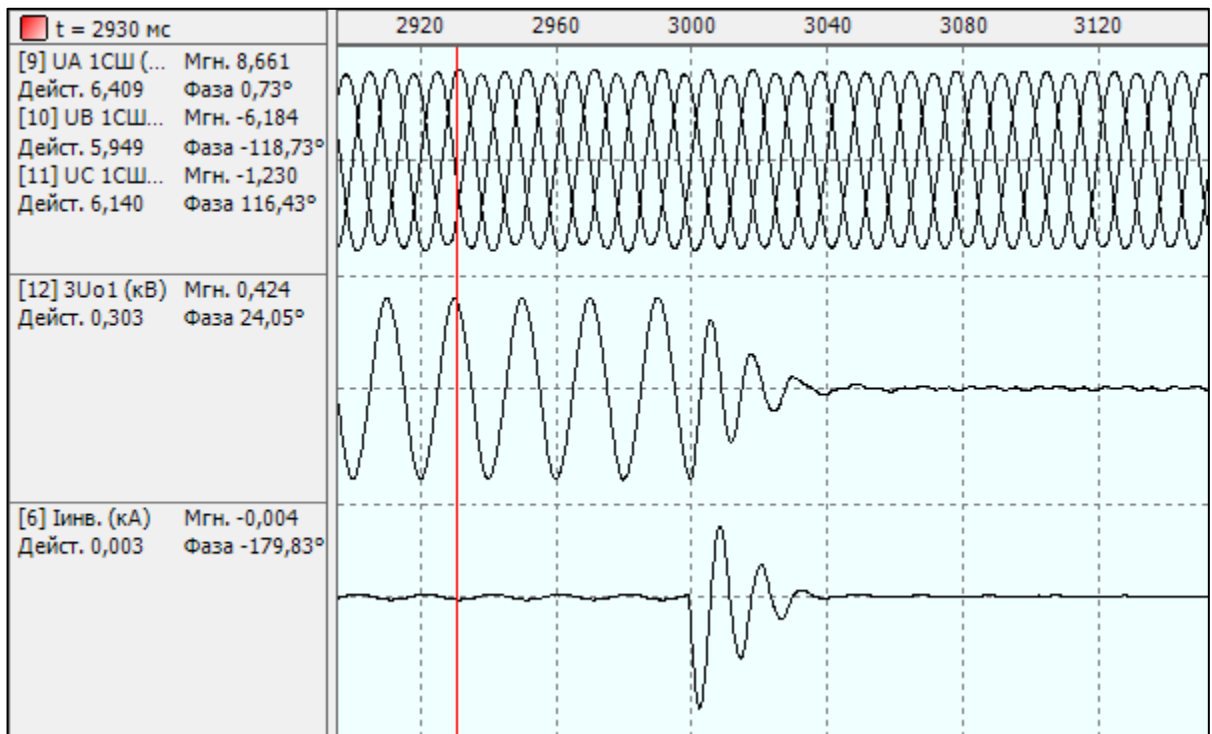


Рисунок 3.16 – Осциллограмма работы опытного образца в режиме симметрирования нейтрали

Получен уникальный опыт эксплуатации управляемого заземления нейтрали сети 10 кВ в реальных условиях. Проведен анализ работы опытного

образца при реальных ОЗЗ, который подтвердил все основные параметры управляемого заземления, заданные при разработке.

Выводы

1. Разработанная физическая модель позволила всесторонне исследовать процессы при компенсации полного тока ОЗЗ и подтвердить правомерность решений и допущений, принятых в процессе разработки системы. Анализ результатов физического моделирования показал, что обусловленный утечками остаточный ток в месте повреждения, как правило, не превышает 300 мА. Время, необходимое для компенсации полного тока ОЗЗ и гашения дуги в месте повреждения, не превышает 60 мс.

2. Созданное управляемое заземление нейтрали с функцией компенсации полного тока ОЗЗ обеспечивает повышение надежности и безопасности распределительных сетей вследствие того, что достигнута возможность снижать ток в месте ОЗЗ до уровня, обеспечивающего гашение электрической дуги, и создавать условия, при которых невозможны повторные электрические пробой.

3. Полученный опыт эксплуатации системы управляемого заземления подтвердил эффективность метода компенсации полного тока ОЗЗ, а также правильность выбора основных параметров управляемого заземления, заданных при разработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создано управляемое заземление нейтрали с функцией компенсации полного тока однофазного замыкания на землю для сетей 6-10 кВ, обладающее новыми свойствами снижения тока и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю, и обеспечивающее повышение надежности и безопасности этих сетей. Достигнута возможность снижать ток в месте ОЗЗ до уровня, обеспечивающего гашение дуги, и создавать условия для предотвращения повторного зажигания дуги.

2. Предложен метод компенсации полного тока (содержащего активную составляющую и гармонические составляющие с частотами, отличными от частоты сети) и гашения электрической дуги в месте однофазного замыкания на землю. Обоснована реализуемость предложенного метода с помощью управляемого источника тока. Своеобразие метода заключается в его способности создавать в электрической сети условия, допускающие эксплуатацию этой сети при наличии однофазного замыкания на землю в течение длительного времени.

3. Разработаны математическая и физическая модели управляемого заземления нейтрали, доказано их соответствие реальному объекту. Проведены всесторонние теоретические и экспериментальные исследования в стационарных и переходных режимах, которые подтвердили правомерность принятых в процессе разработки ограничений и допущений, доказали преимущества разработанного управляемого заземления и позволили определить его основные эксплуатационные параметры. Остаточный ток после гашения дуги в месте ОЗЗ, обусловленный остаточными утечками не превышает 300 мА. Время, необходимое для компенсации полного тока ОЗЗ и гашения дуги в месте повреждения, составляет, примерно, 60 мс.

4. Решена задача информационного обеспечения для цифровой системы управления компенсацией тока однофазного замыкания на землю. Предложены улучшенные математические модели первичных преобразователей сигналов

(трансформаторов тока нулевой последовательности), которые положены в основу исследования их частотных характеристик. Определены границы областей использования линейной модели. Проведен анализ погрешностей в стационарных и динамических режимах работы. Сформированы требования к точности преобразования сигналов. Даны рекомендации по повышению точности работы первичных преобразователей сигналов в переходных режимах. Результаты теоретических исследований (математического моделирования) подтверждены результатами физического моделирования процессов и натуральных экспериментов.

5. Разработан и изготовлен опытный образец управляемого заземления мощностью 800 кВА, который всесторонне исследован в условиях заводской лаборатории на напряжении 10 кВ с током однофазного замыкания на землю 30 А, что позволило получить близкие по сущности к реальным процессы дуговых замыканий на землю. Для моделирования дуговых замыканий использованы специальные разрядники рогового и шарового типов, а также – кабель с искусственно поврежденной изоляцией. Положительные результаты заводских испытаний позволили сделать вывод о возможности включения опытного образца в реальную сеть 10 кВ на действующей подстанции.

6. Опытный образец управляемого заземления нейтрали введен в опытную эксплуатацию на действующей подстанции ПАО «МРСК Волги». Получен опыт эксплуатации в реальных условиях. Проведен анализ работы опытного образца в нормальных режимах и при реальных повреждениях в сети. Результаты анализа показали, что ввод в работу управляемого заземления нейтрали не вносит неблагоприятных изменений в условия работы сети и подтвердили все основные параметры этого управляемого заземления, заданные при разработке.

7. Результаты работы теоретического и практического характера использованы в ООО «НПП Бреслер» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также – в учебном процессе в Институте повышения квалификации специалистов релейной защиты и автоматики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арцишевский, Я.Л. Исследование и разработка способов повышения быстродействия релейной защиты и автоматики в секционированной электрической сети 6-35 кВ (на примере ТЭЦ МЭИ) / Я.Л. Арцишевский, С.А. Вострокнутов // Вестник МЭИ. – 2010. – № 3. – С. 71-77.
2. АС № 1111225, кл. Н 02 Н 9/08. Устройство для компенсации тока однофазного замыкания на землю // Петров О.А., Сидоров А.И.; Заявлено 20.05.1983; Опубликовано 30.08.1984.
3. АС № 1264263, кл. Н 02 Н 9/08. Способ компенсации токов однофазного замыкания на землю в трехфазной сети с дугогасящим реактором в нейтрали // Обабков В.К., Целуевский Ю.Н., Осипов Э.Р., Ильин В.М.; Заявлено 30.10.1984; Опубликовано 15.10.1986, Бюл. № 38.
4. АС № 2524347, кл. Н 02 J 3/26. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях (варианты) // Мустафа Г.М.; Заявлено 15.05.2012; Опубликовано 27.07.2013, Бюл. № 32.
5. АС № 813587, кл. Н 02 J 3/18. Устройство для компенсации полного тока однофазного замыкания на землю // Обабков В.К., Целуевский Ю.Н.; Заявлено 07.06.1979; Опубликовано 15.03.1981.
6. АС № 907684, кл. Н 02Н 9/08. Устройство для автоматической компенсации тока однофазного замыкания на землю // Петров А.О., Ершов А.М.; Заявлено 01.04.1980; Опубликовано 23.02.1982.
7. АС №1777199, кл. Н 02 Н 9/08. Устройство для компенсации полного тока однофазного замыкания в коротких сетях // Обабков В.К., Целуевский Ю.Н., Ефимов Ю.К.; Заявлено 21.05.1990; Опубликовано 23.11.1992, Бюл. № 43.
8. АС №412651 СССР, кл. Н 02h 3/16. Устройство для компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания // Никифоровский Н.Н., Ксенофонтов А.П., Алексеев Н.А., Александров М.Г., Брунав Я.П.; Заявлено 19.07.1971; Опубликовано 25.01.1974.

9. АС №534006 СССР, кл. Н 02Н 3/16, Н 02J 3/18. Устройство для компенсации активного и емкостного тока замыкания на землю // Никифоровский Н.Н., Брунав Я.П.; Заявлено 17.06.1974; Опубликовано 30.10.1976.

10. АС №559325 СССР, кл. Н 02Н 1/02. Устройство для компенсации активной составляющей тока однофазного замыкания на землю // Петров О.А., Ершов А.М.; Заявлено 23.09.1975; Опубликовано 25.07.1977.

11. АС №565346, кл. Н 02J 3/18. Способ автоматической компенсации активной составляющей тока замыкания на землю // Петров А.О., Ершов А.М.; Заявлено 16.02.1973; Опубликовано 15.07.1977.

12. АС №858170, кл. Н 02Н 9/08. Устройство для компенсации тока однофазного замыкания на землю в электрической сети // Петров А.О., Сидоров А.И.; Заявлено 27.03.1979; Опубликовано 23.08.1981.

13. Базуткин, В.В. К проблеме компенсации емкостных токов в сетях 6-10-35 кВ / В.В. Базуткин // Электро. – 2007. – № 1. – С. 13-18.

14. Бортник, И.М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин; под общ. ред. И.П. Верещагина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.

15. Брызгин, О.Р. Некоторые способы измерения расстройки компенсации емкостного тока при дуговых замыканиях на землю / О.Р. Брызгин // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1969. – Вып. 21. – С. 78-84.

16. Брызгин, О.Р. Фазовый метод настройки компенсации в электрических сетях при замыкании на землю / О.Р. Брызгин // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1970. – Вып. 26. – С. 19-23.

17. Булычев, А.В. Исследование частотных характеристик трансформаторов тока / А.В. Булычев, В.К. Ванин // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений). – 1987. – № 8. – С. 19-21.

18. Булычев, А.В. Экспериментальные исследования управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока замыкания на землю

в сетях 6-10 кВ / А.В. Булычев, Ю.А. Дементий, В.Н. Козлов // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 4. – С. 37-41.

19. Бурак Н.В. Обзор регулируемых заземляющих дугогасящих реакторов и основные требования к ним / Н.В. Бурак, В.Д. Головчан // Электроснабжение и автоматизация промышленных предприятий. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1976. – С. 3-11.

20. Вайнштейн, Р.А. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин, В.С. и др. // Электрические станции. – 1998. – № 7. – С. 26-30.

21. Вайнштейн, Р.А. Непрерывный контроль и автоматическая настройка компенсации емкостных токов с использованием наложенного тока частоты 25 Гц / Р.А. Вайнштейн, С.Е. Аньков // Режимы нейтрали в электрических системах. – Киев: Наук. думка, 1974. – С. 115-120.

22. Валеев, Г.С. Расчет дугогасящего реактора с дискретным регулированием индуктивности по методу подобия / Г.С. Валеев // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. – Челябинск Изд-во ЧПИ, – 1977. – Вып. 191. – С. 22-29.

23. Ванин, В.К. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В.К. Ванин, Г.М. Павлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 336 с.

24. Ванштейн, Р.А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учеб. пособие / Р.А. Ванштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 118 с.

25. Вольпов, К.Д. Экспериментальное исследование регулируемой дугогасящей катушки нового типа / К.Д. Вольпов, Л.И. Дорожко, М.С. Либкинд, Г.И. Тарасов // Электрические станции. – 1969. – № 9. – С. 77-81.

26. Головкин, С.И. Селективная сигнализация однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 30, 35 кВ / С.И. Головкин, Р.А. Ванштейн, С.М. Юдин // Электрические станции. – 2000. – № 7. – С. 33-36.

27. Головчан, В.Д. Заземляющие реакторы с плавным регулированием индуктивности / В.Д. Головчан, Н.В. Бурак, С.Д. Гильман // Электротехника. – 1980. – № 1. – С. 21-24.
28. ГОСТ 7746–2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2012. – 90 с.
29. Дементий, Ю.А. Динамические свойства датчиков тока нулевой последовательности / Булычев А.В., Дементий Ю.А. // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 04 (29). – С. 13-19.
30. Дементий, Ю.А. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю / Булычев А.В., Дементий Ю. А., Дыбина Т. А. // Международный союз ученых «Наука. Технологии. Производство». – 2015. – № 7. – С. 33-36.
31. Дементий, Ю.А. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Дыбина Т.А. // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всеросс. науч.-техн. конф.-Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – С. 317-325.
32. Дементий, Ю.А. Измерение токов в защитах от однофазных замыканий на землю и в автоматике управления дугогасящими реакторами / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Пряников В.С. // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 37-44.
33. Дементий, Ю.А. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Иматдинов Р.А. // «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства». Материалы 20-й Всероссийской научно-технической конференции. – Дивноморское, 2017. – С. 54-56.
34. Дементий, Ю.А. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Иматдинов Р.А. // «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России». Сборник тезисов

докладов 4 международной научно-практической конференции. Чебоксары. 2017. – С. 13-14.

35. Дементий, Ю.А. Компенсация полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. // Вестник Чувашского университета. – 2018. – № 1. – С. 24-35.

36. Дементий, Ю.А. Компенсация тока ОЗЗ в распределительных сетях 6–10 кВ. Новые технологии. / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. // Новости Электротехники. – 2018. – №1 (109). – С. 28-30.

37. Дементий, Ю.А. Экспериментальные исследования управляемого заземления нейтрали с функцией компенсации полного тока замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Булычев А.В., Дементий Ю.А., Козлов В.Н. // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 4 (29). – С. 37-41.

38. Добротворский, И.Н. Теория электрических цепей: учебник для техникумов / И.Н. Добротворский. – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с.

39. Дубинчик Е.А. Регулируемый дугогасящий реактор нового типа / Е.А. Дубинчик // Энергетик. – 1978. – № 4. – С. 23-24.

40. Дубинчик, Е.А. Дугогасящие реакторы с плавной настройкой тока / Е.А. Дубинчик, А.И. Тарасов // Энергетик. – 1970. – № 2. – С. 27-29.

41. Киреева, Э.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем / С.А Цырук, Э.А. Киреева. – М.: Академия, 2010. – 288 с.

42. Князев, В. Техническая политика ФСК. Требования к распределительному электросетевому комплексу [Электронный ресурс] / В. Князев, Г. Боков // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6(42). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/42/04.php>.

43. Кучеренко, В. Дугогасящие реакторы в сетях 6-35 кВ. Опыт эксплуатации / В. Кучеренко, В. Сазонов, Д. Багаев // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 3 (45). – С. 66-68.

44. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

45. Лихачёв, Ф.А. Защита от внутренних перенапряжений установок 3-220 кВ / Ф.А. Лихачёв – М.: Энергия, 1968. – 103 с.
46. Лихачёв, Ф.А. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 104 с.
47. Михайлов, А.М., Трухан А.П. Симметрирование компенсированной сети регулированием добротности контура нулевой последовательности / А.М. Михайлов, А.П. Трухан // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1974. – Вып. 43. – С. 153-160.
48. Мокин, Б.И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б.И. Мокин, Ю.Н. Выговский. – Киев: Техника, 1985. – 104 с.
49. Обабков, В.К. Об экстремальном управлении резонансным объектом / В.К. Обабков, Е.В. Сергин, Ю.Н. Целуевский // Корреляционно-экстремальные системы управления. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1979. – С. 283-287.
50. Обабков, В.К. Построение самонастраивающейся системы компенсации емкостных токов утечки с поиском поврежденной фазы / В.К. Обабков, Е.В. Сергин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1983. – № 3. – С. 90-94.
51. Обабков, В.К. Принцип построения измерителей расстройки компенсации емкостных токов в сетях 6-35 кВ / В.К. Обаков // Электрические станции. – 1992. – № 10. – С. 76-79.
52. Обабков, В.К. Синтез адаптивных систем управления резонансными объектами / В.К. Обабков. – Киев: Наук. думка, 1993. – 250 с.
53. Обабков, В.К. Совершенствование фазового способа автоматического поддержания условий компенсации емкостных токов в кабельных сетях 6-35 кВ / В.К. Обабков // Электричество. – 1989. – № 1. – С. 18-25.
54. Обабков, В.К. Способ экстремального регулирования в нестационарных инерционных системах с синхронным детектированием / В.К. Обабков, Ю.К. Сергеев // Поиск Экстремума. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1969. – С. 74-77.

55. Обабков, В.К. Способы построения самонастраивающихся систем с компенсированной нейтралью / В.К. Обабков, Ю.Н. Целуевский // Изв. вузов. Энергетика. – 1979. – № 12. – С. 20-27.

56. Патент № 14061. Устройство для защиты электрических сетей высокого напряжения от токов заземления // Петерсен В.; Заявлено 07.09.1926; Опубликовано 30.03.1930.

57. Петров, О.А. Система автоматической настройки дугогасящих катушек / О.А. Петров // Электрические станции. – 1973. – № 1. – С. 61-64.

58. Петров, О.А., Принципы автоматической настройки дугогасящих катушек с нелинейными вольт-амперными характеристиками / О.А. Петров, В.И. Гиря // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. – Челябинск: Изд-во Челяб. политех. ин-та, 1975. – Вып. 160. – С. 25-28.

59. Попов, И.Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И.Н. Попов, В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

60. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: Энергосервис, 2003. – 151 с.

61. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: НЦ ЭНАС, 2007. – 512 с.

62. Рихтер, И. Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сетях высокого напряжения в ЧССР / И. Рихтер // Электричество. – 1961. – № 11. – С. 85-87.

63. Рябошапка, А.Т. Дугогасящий реактор с тиристорным регулятором / А.Т. Рябошапка, В.М. Сичкарь, С.В. Смоляков // Проблемы преобразовательной техники. – Киев: ИЭД АН УССР, 1983. – Ч. 4. – С. 257-259.

64. Сапунков, М.Л. Применение реакторов с фазоимпульсным регулированием для систем автоматической компенсации в рудничных сетях 6 кВ / М.Л. Сапунков, В.С. Бондарчук, А.П. Долганов // Автоматизация

технологических процессов в промышленных установках: тез. докл. конф. – Пермь: Пермский политехн. ин-т, 1979. – С. 60-61.

65. Сапунков, М.Л. Характеристики дугогасящего реактора с фазоимпульсным регулированием / М.Л. Сапунков, В.С. Бондарчук, П.А. Долганов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1983. – № 5. – С. 89-92.

66. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов // Киев: Наук. думка, 1985. – 264 с.

67. Сомов, В.А. Дугогасящая катушка с плавным регулированием / В.А. Сомов, В.В. Шуть, С.А. Бобриков // Электричество. – 1965. – № 5. – С. 44-48.

68. Степанчук, Д.Н. Способ автоматической компенсации емкостной составляющей токов замыкания на землю в шахтных электрических сетях высокого напряжения / Д.Н. Степанчук // Горная электромеханика и автоматика. – Харьков: Изд-во Харьк. гос. ун-та, 1971. – Вып. 18. – С. 71-77.

69. Таев, И. С. Электрические аппараты. Общая теория / И.С. Таев. – М.: Энергия, 1977. – 272 с.

70. ТИ 34-70-070-87. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. – М.: Союзтехэнерго, 1988. – 56 с.

71. Трухан, А.П. О применении измерительного трансформатора НТМИ для смещения нейтрали компенсированной сети / А.П. Трухан, Н.Ф. Головатюк // Проблемы технической электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1974. – Вып. 48. – С. 54-56.

72. Трухан, А.П. Эффективность различных способов заземления нейтрали сетей 6-10 кВ. Режимы нейтрали в энергетических системах / А.П. Трухан. – Киев: Наук. думка, – 1993. – 250 с.

73. Успенский, М.И. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях / М.И. Успенский, И.В. Кызродев. – Сыктывкар, 2010. – 122 с.

74. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – 4-е издание. – М.: Физматгиз, 1962. – 236 с.

75. Цапенко, Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / Е.Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
76. Целуевский, Ю.Н. Анализ и синтез самонастраивающихся систем управления резонансными объектами с поисковой модуляцией параметров / Ю.Н. Целуевский. – Донецкий политехн. ин-т, Донецк: 1979. – 33 с.: 10 ил. – Деп. в ВИНТИ, ФН 1672.
77. Черников, А.А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью / А.А. Черников. – М.: Энергия, 1974. – 96 с.
78. Шуть, В.В. Компенсация емкостных токов и защита от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / В.В. Шуть // Энергетика и электрификация. – 1967. – № 1. – С. 19-22.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – ОСЦИЛЛОГРАММЫ В ДОПОЛНЕНИЕ К РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данном приложении представлены парные осциллограммы в мелком масштабе, позволяющие оценить процессы в масштабах времени нескольких секунд и крупном масштабе, позволяющие анализировать переходные процессы по токам и напряжениям в момент возникновения ОЗЗ.

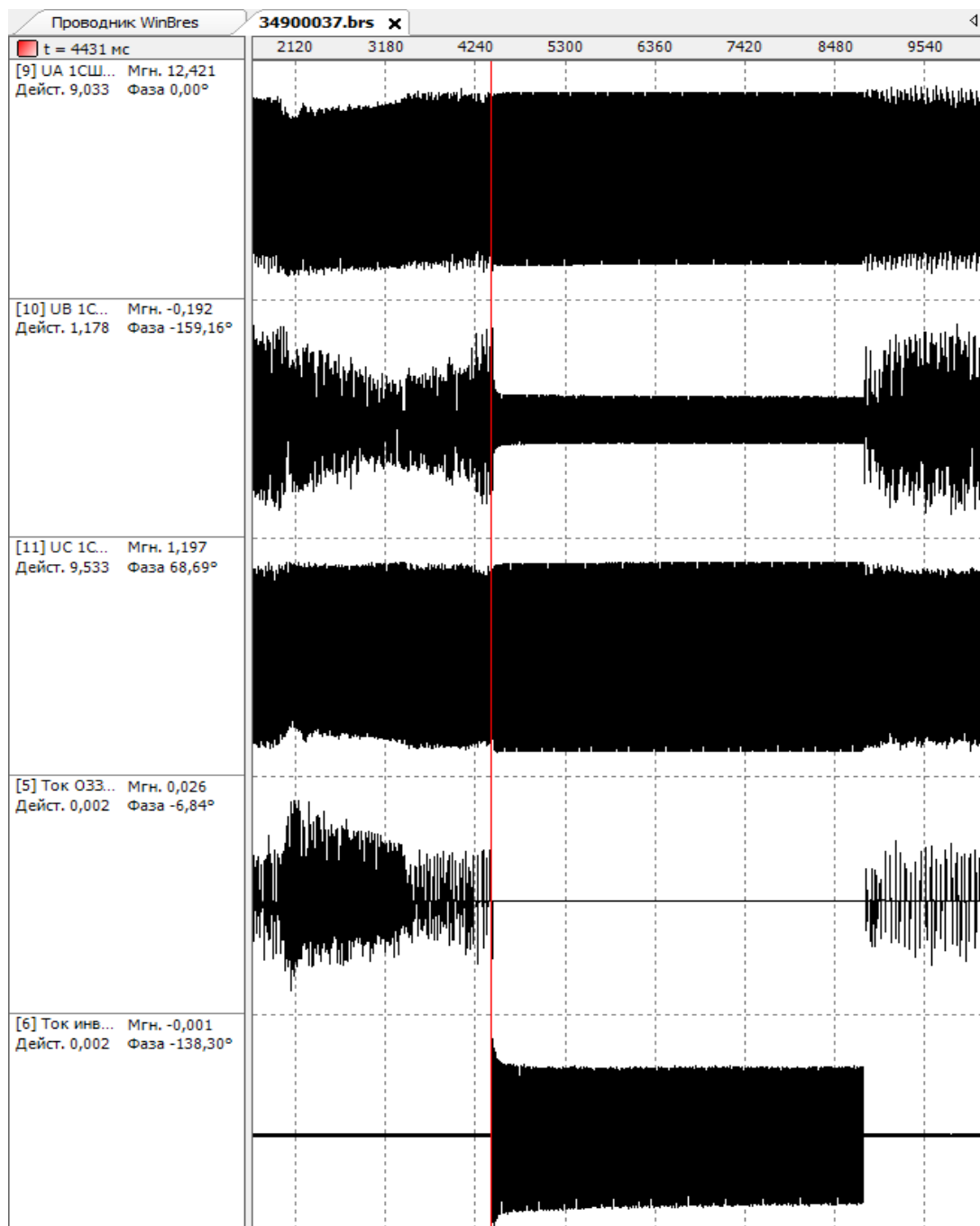


Рисунок П1.1 – Осциллограмма дугового ОЗЗ с компенсацией полного тока. Мелкий масштаб

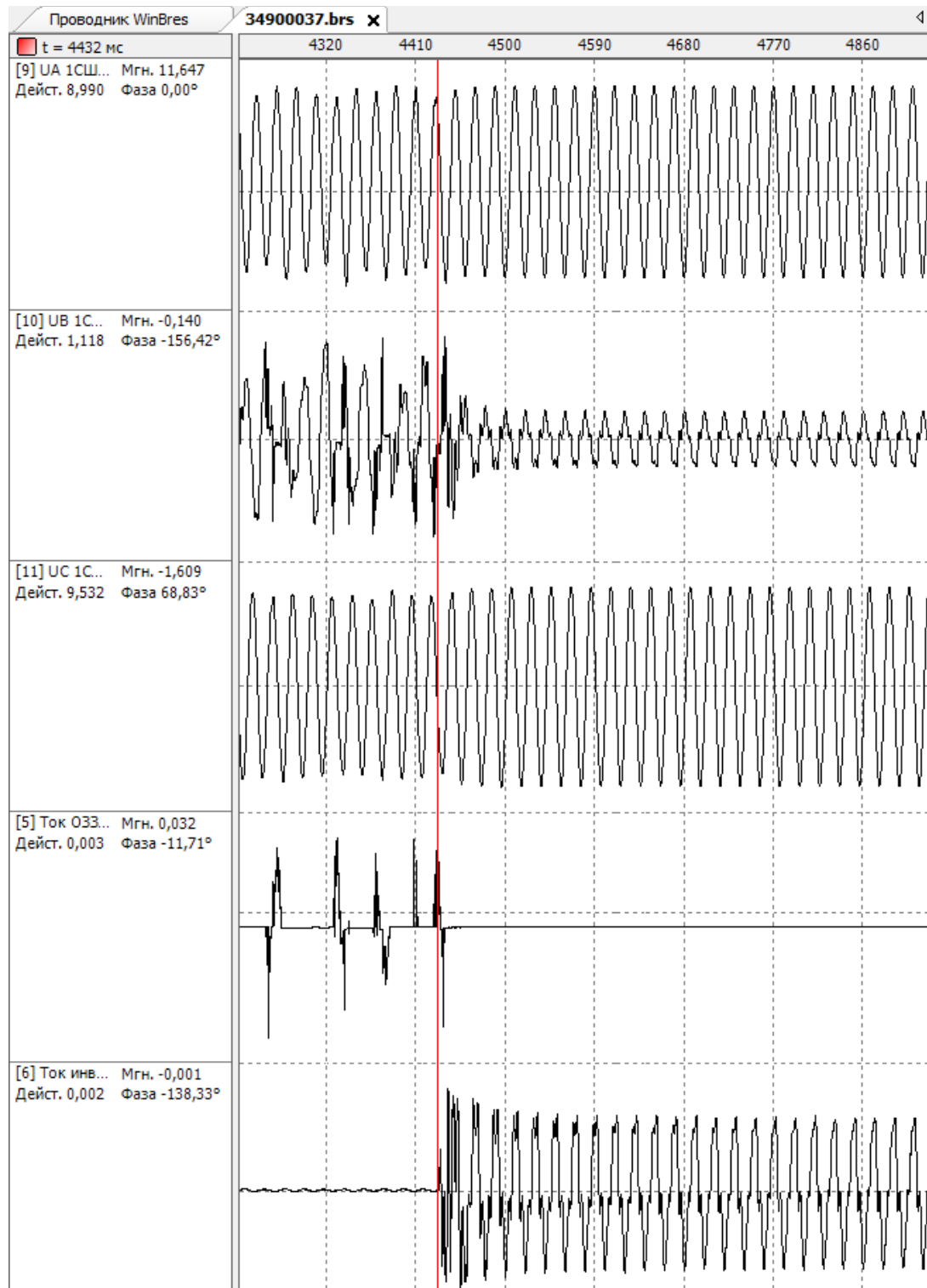


Рисунок П1.2 – Осциллограмма дугового ОЗЗ с компенсацией полного тока. Крупный масштаб

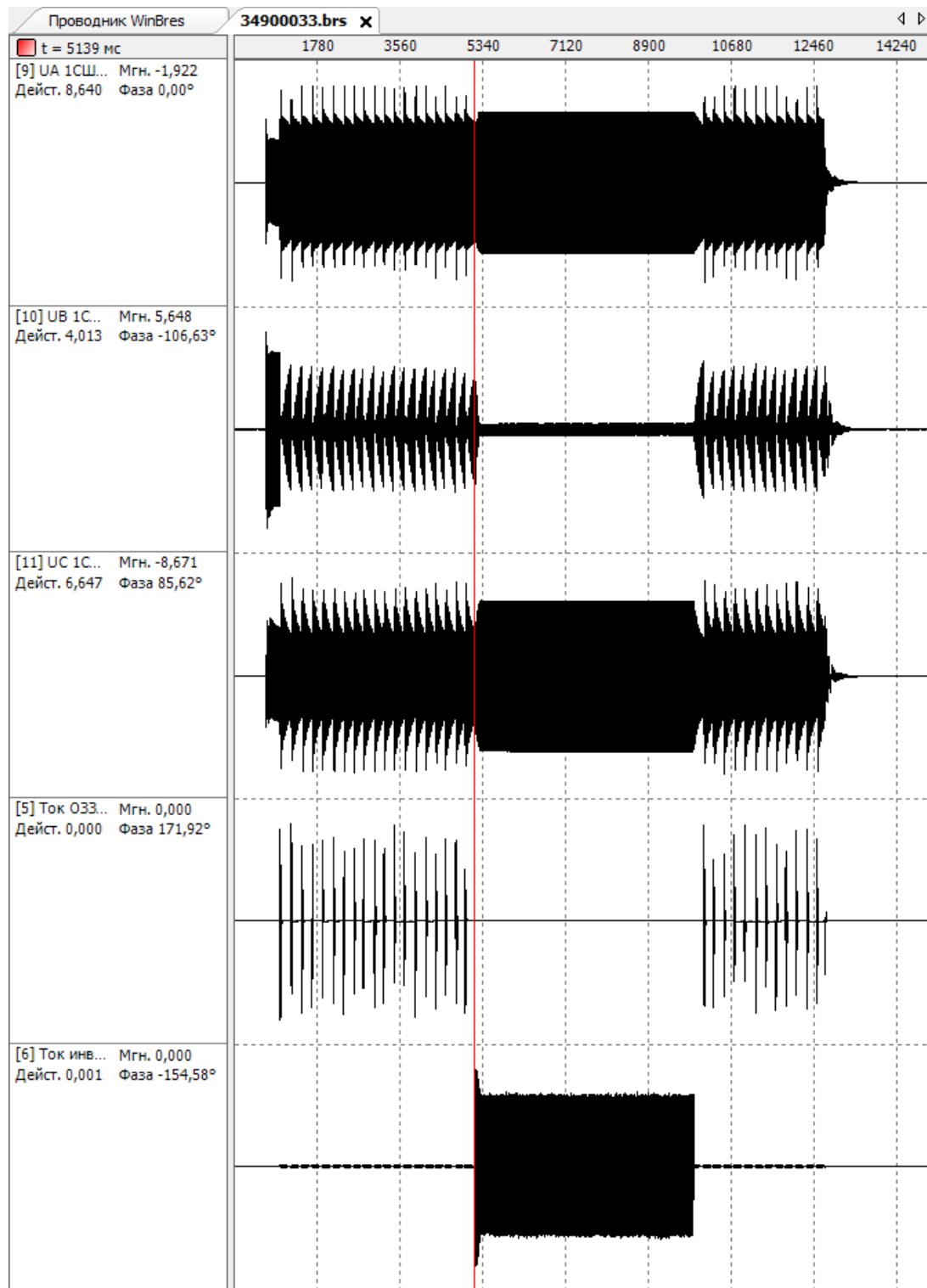


Рисунок П1.3 – Осциллограмма дугового ОЗЗ с компенсацией полного тока. Мелкий масштаб

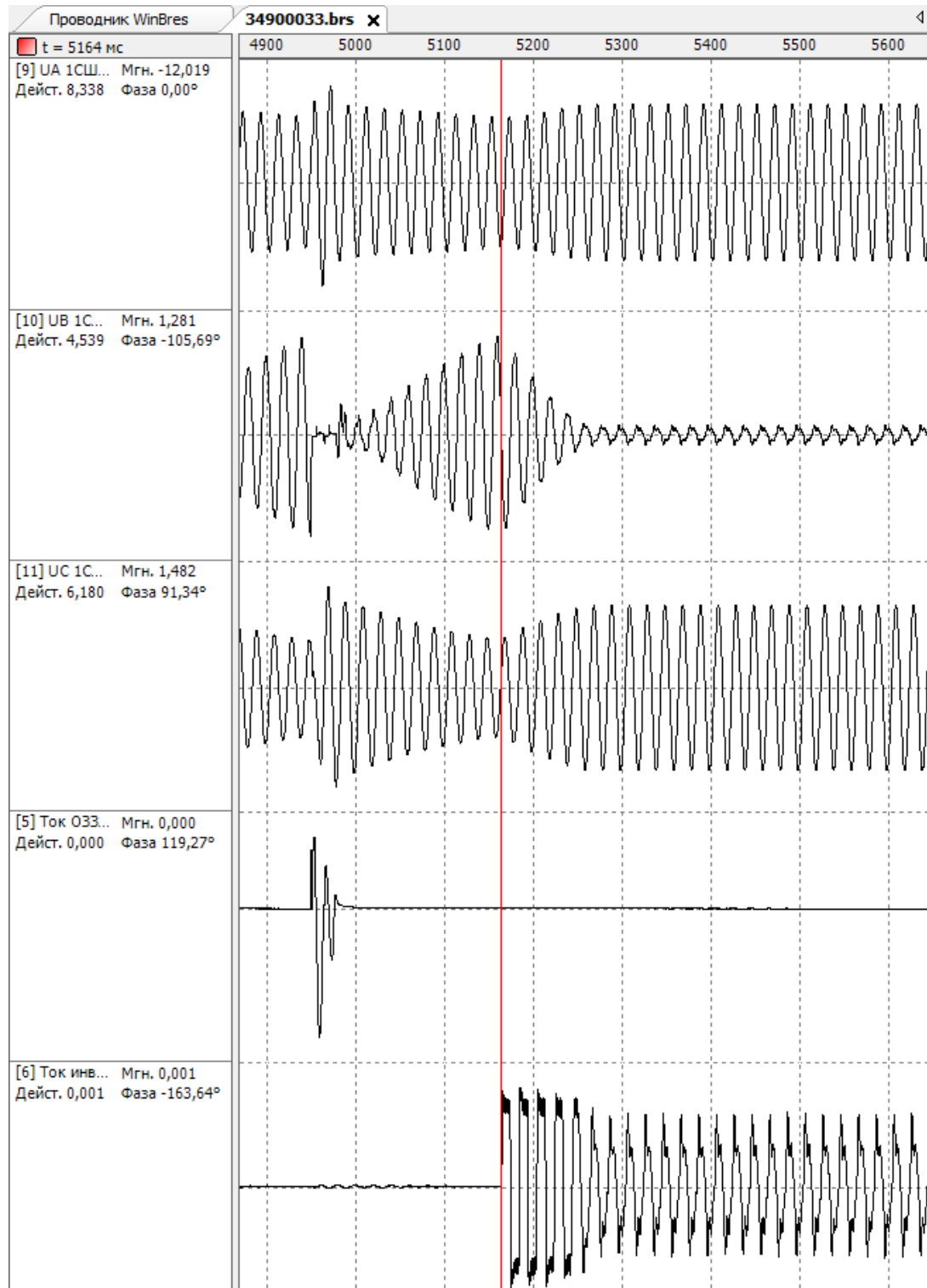


Рисунок П1.4 – Осциллограмма дугового ОЗЗ с компенсацией полного тока. Крупный масштаб

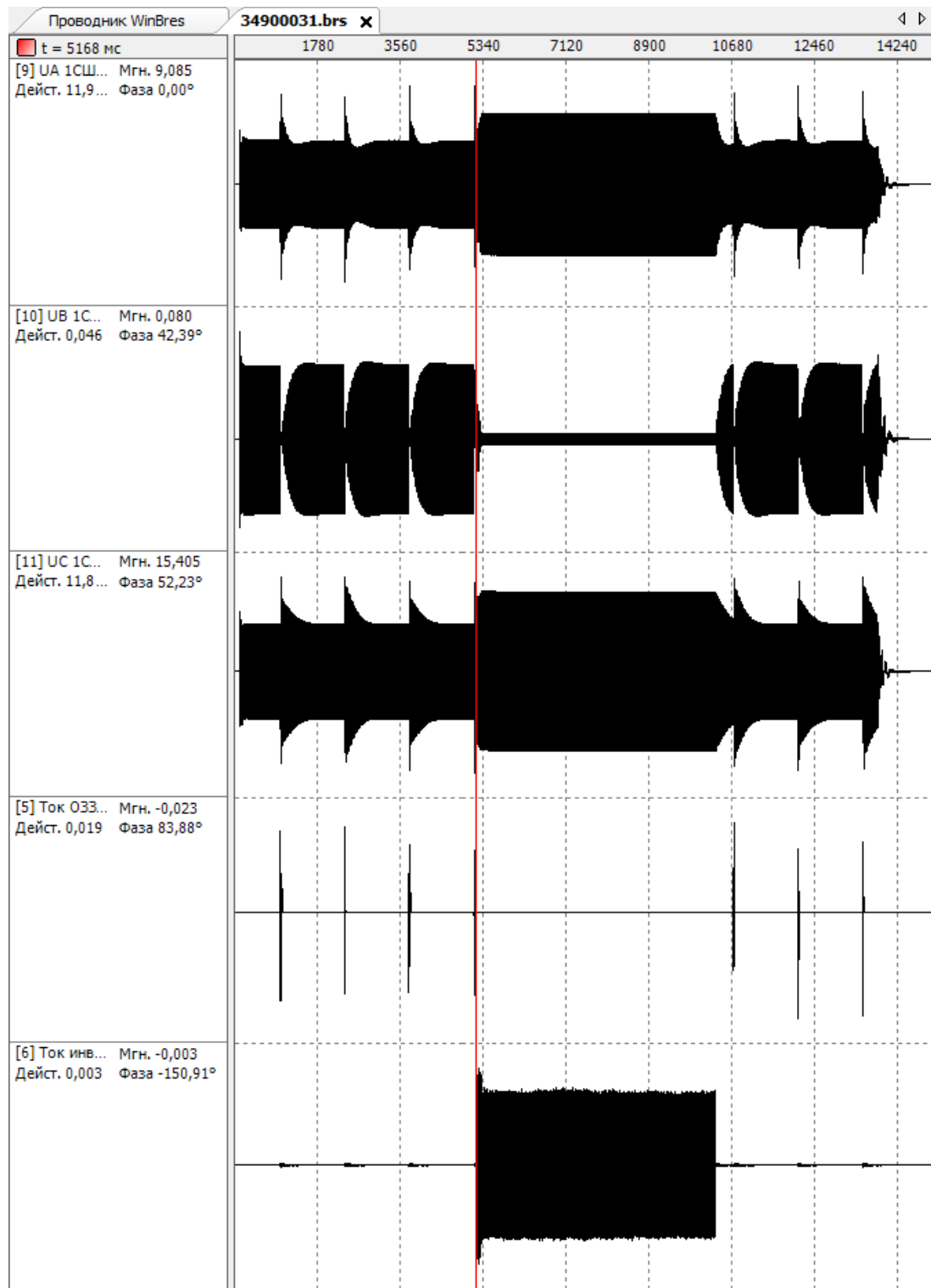


Рисунок П1.5 – Осциллограмма дугового ОЗЗ с компенсацией полного тока. Мелкий масштаб

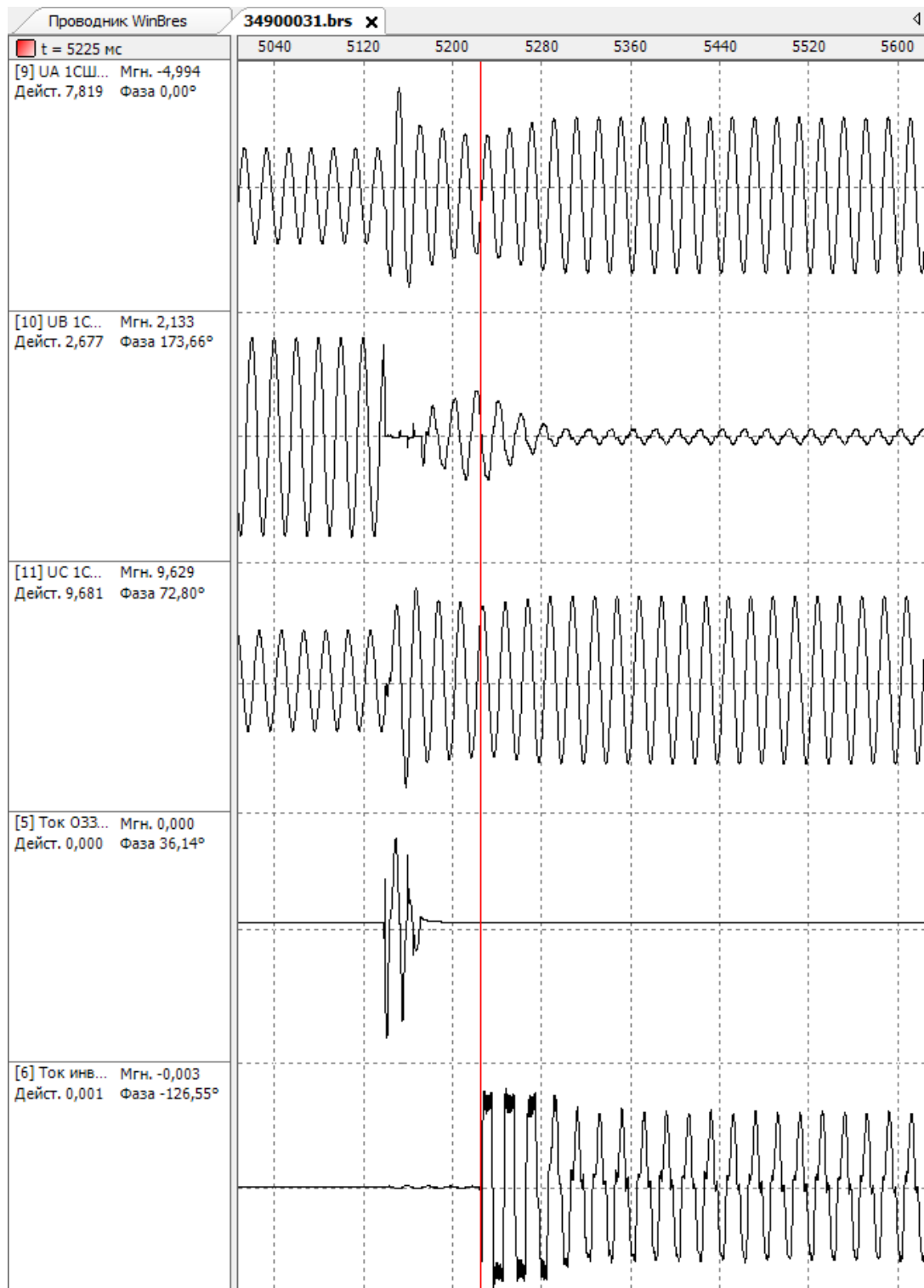


Рисунок П1.6 – Осциллограмма дугового ОЗЗ с компенсацией полного тока. Крупный масштаб

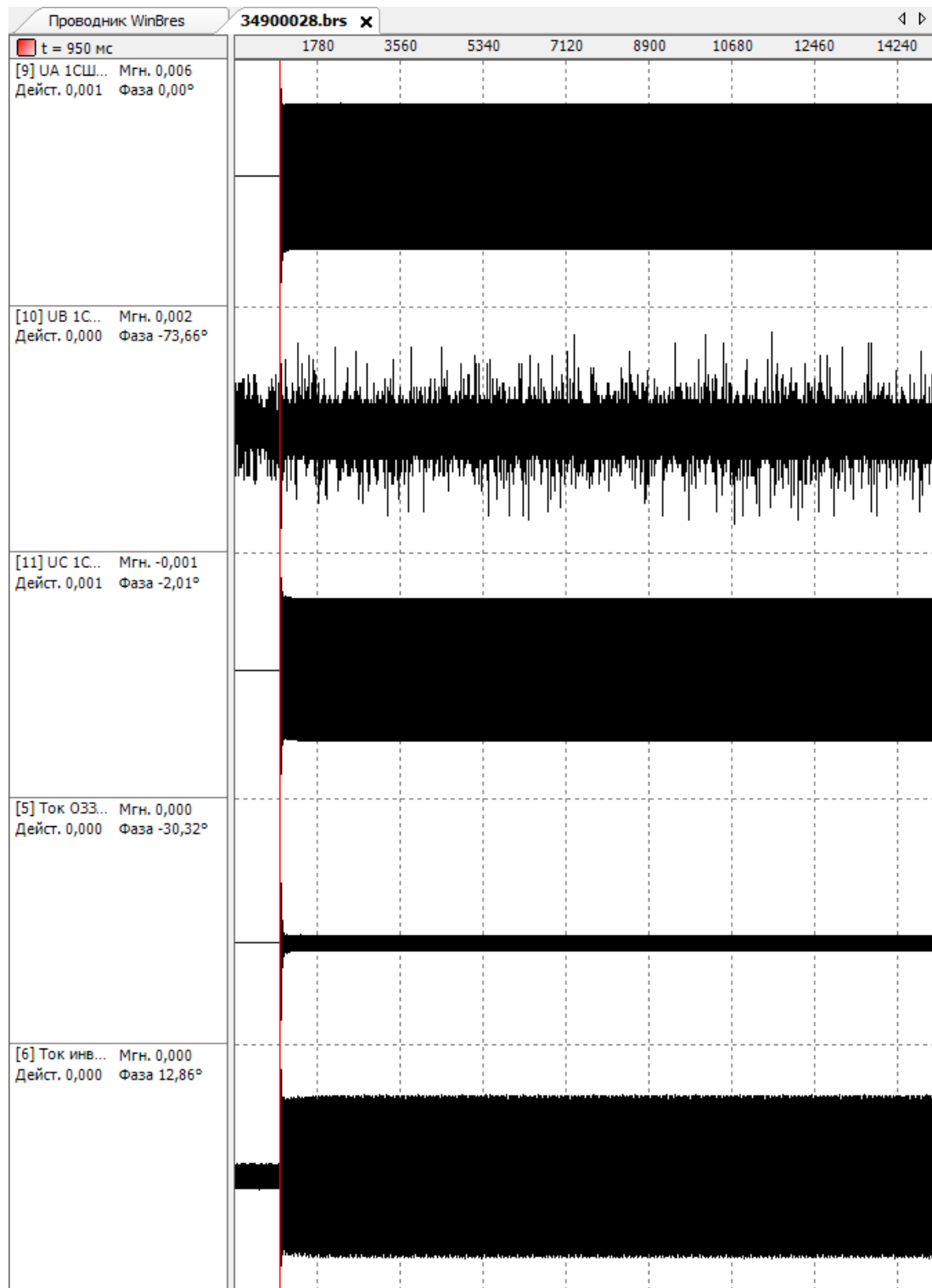


Рисунок П1.7 – Осциллограмма устойчивого ОЗЗ во время подачи питания с компенсацией полного тока. Мелкий масштаб

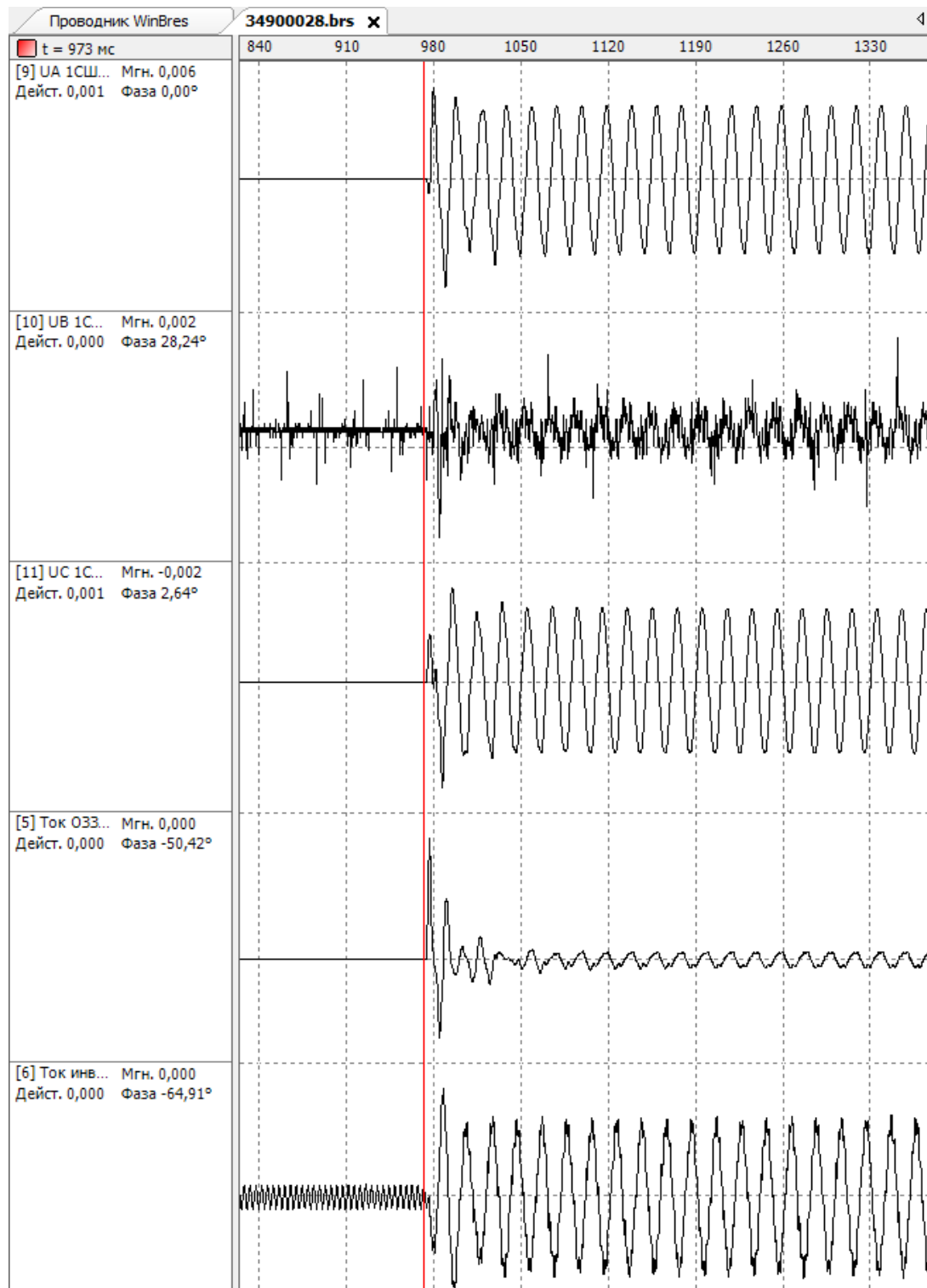


Рисунок П1.8 – Осциллограмма устойчивого ОЗЗ во время подачи питания с компенсацией полного тока. Крупный масштаб

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ



Негосударственное образовательное учреждение
дополнительного профессионального образования

**«Институт повышения квалификации
специалистов релейной защиты и
автоматики»**

(НОУ ДПО «ИПК РЗА»)

Чувашская Республика,
428018, г. Чебоксары, ул. Афанасьева, д. 13.
Тел. тел. (8352) 45-91-91, 45-95-96

СПРАВКА**об использовании результатов диссертационной работы**

Результаты научных исследований, представленные в кандидатской диссертации Ю.А.Дементия «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях», нашедшие отражение в его публикациях научного и научно-методического характера, используются на лекционных, практических и семинарских занятиях в учебном процессе НОУ ДПО «ИПК РЗА» при повышении квалификации специалистов электроэнергетических систем России и ближнего зарубежья.

Директор, д.т.н., профессор

19.02.2018



А.В.Булычев

Общество с ограниченной ответственностью
«НПП Бреслер»

428018, г.Чебоксары, ул. Афанасьева, д.13; т/ф. (8352) 459191, 459596; 459488
E-mail: info@bresler.ru; WWW: <http://www.bresler.ru>; ИНН 2129053901; КПП 213001001; ОКПО 71026440; ОКВЭД
73.10, 72.20; ОГРН 1042129004906; Р/сч.40702810775020161729 в Отделении №8613 Сбербанка России
г.Чебоксары;
К/сч. 3010181030000000609; БИК 049706609

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор

Н.С.Ефимов

«21» января 2017 г.

М.П.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Мы, нижеподписавшиеся, соискатель Дементий Юрий Анатольевич, с одной стороны, и представитель предприятия ООО «НПП Бреслер» в лице главного конструктора Козлова Владимира Николаевича, с другой стороны, составили настоящий акт в том, что результаты научных исследований, отраженные в кандидатской диссертации Ю.А.Дементия «Методы и средства компенсации полного тока однофазного замыкания на землю в распределительных сетях» и опубликованные в открытой печати, использованы при выполнении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) «Разработка и исследование системы заземления нейтрали распределительной сети с компенсацией полного тока замыкания на «землю» и активным принудительным гашением дуги в месте повреждения» по договору №3566/1630-002252 от 10 мая 2016 г. между ООО «НПП Бреслер и филиала ПАО «МРСК Волги» - «Оренбургэнерго».

Ю.А.Дементий

В.Н.Козлов

