

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

На правах рукописи



ФИЛАТОВА ГАЛИНА АНДРЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ И АЛГОРИТМОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ
НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-10 кВ
ПО ПАРАМЕТРАМ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА**

Специальность: 05.14.02 – «Электрические станции
и электроэнергетические системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Шуин В.А.

Иваново – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
<i>Глава 1</i> ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ.....	18
1.1 Особенности определения места повреждения при замыканиях на землю на кабельных линиях 6–10 кВ.....	18
1.2 Характеристики распределительных кабельных сетей 6–10 кВ как объекта исследования	23
1.3 Сравнительный анализ известных способов дистанционного определения места замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.....	40
1.4 Общая оценка методов дистанционного определения зоны замыкания на землю на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением. Обоснование и задач исследования.....	61
1.5 Выводы по главе 1.....	67
<i>Глава 2</i> ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ 6 – 10 кВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ.....	69
2.1 Задачи и методы исследования переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.....	69
2.2 Анализ информационных параметров электрических величин переходного процесса с использованием аналитической модели кабельной сети 6–10 кВ.....	71
2.3 Нормирование электрических величин переходного процесса.....	91
2.4 Общая оценка возможностей использования электрических величин переходного процесса для решения задачи определения места повреждения при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ....	93
2.5 Выводы по главе 2.....	95

<i>Глава 3</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ.....	97
3.1 Постановка задач и обоснование методов исследования	97
3.2 Экспериментальный анализ частотных характеристик электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, применяемых при определении места замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ..	100
3.3 Анализ диапазона частот свободных составляющих переходных токов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.....	108
3.4 Разработка моделей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности.....	114
3.4.1 Обоснование подхода к моделированию трансформаторов тока....	114
3.4.2 Методика экспериментального определения характеристик намагничивания кабельных ТТП.....	117
3.4.3 Математическая модель трансформатора тока нулевой последовательности на основе ОКН.....	122
3.4.4 Математическая модель трансформатора тока нулевой последовательности на основе средней кривой намагничивания...	132
3.4.5 Математическая модель трансформатора тока нулевой последовательности на основе уравнения динамического перемагничивания магнитопроводов.....	138
3.4.6 Исследования достоверности и оценка точности разработанных моделей трансформаторов тока в переходных режимах.....	142
3.5 Математическая модель трансформатора напряжения контроля изоляции.....	146
3.6 Выводы по главе 3.....	148
<i>Глава 4</i> РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕ-	150

ТЯХ 6 – 10 кВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....

4.1	Способы и алгоритмы дистанционного определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.....	150
4.2	Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования погрешностей способов ДОМЗЗ.....	159
4.3	Исследование погрешностей способа дистанционного определения места замыкания на землю, основанного на измерении параметров аварийного переходного режима.....	163
4.4	Исследование погрешностей способа дистанционного определения места замыкания на землю, основанного на использовании алгоритмической модели объекта.....	186
4.5	Выводы по главе 4.....	195
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	197
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	200
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	228

ВВЕДЕНИЕ

В.1 Актуальность темы. В системах городского и промышленного электроснабжения ввиду ограниченности территории и требований безопасности распределение электроэнергии осуществляется кабельными линиями (КЛ) электропередачи. Через электрические кабельные сети среднего напряжения 6–20 кВ распределяется около половины вырабатываемой в стране электроэнергии (например, только коммунально-бытовая сфера потребляет до 20 % электроэнергии, в т.ч. население 10-12 %) [1]. Внедрение современных технологий в таких отраслях промышленности, как черная и цветная металлургия, нефтеперерабатывающая и нефтехимическая, целлюлозно-бумажная, автомобилестроение, и ряде других, а также рост электропотребления населения и в сфере услуг ведут к увеличению протяженности распределительных кабельных сетей среднего напряжения. В настоящее время общая протяженность кабельных сетей 6-20 кВ в системах электроснабжения городского и промышленного электроснабжения составляет более 240 тысяч километров [2]. Более 99% суммарной протяженности кабельных сетей среднего напряжения составляют сети 6–10 кВ [3].

Аварии в распределительных кабельных сетях 6-10 кВ, составляющие около 70% всех нарушений электроснабжения промышленных и бытовых потребителей, как правило, сопровождаются значительным экономическим ущербом. Одной из главных причин аварий является моральный и физический износ электрооборудования. В [4] отмечается, что от 60 до 80 % основных фондов в энергетике выработали свой ресурс, причем такое положение характерно не только для России, но и для многих других стран. По данным [5] кабельные сети 6-10 кВ состоят приблизительно на 95 % из кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Моральный и физический износ КЛ 6-10 кВ в системах электроснабжения составляет 40-95% [2, 3, 6–8.]. В указанных кабельных сетях происходит в среднем 26 отключений в год в расчете на 100 км КЛ, что обуславливает до 5-6 отключений потребителей в год, в то время как в технически

развитых зарубежных странах до 1-2 [4]. Анализ статистики отказов КЛ различных напряжений и степени их влияния на возникающие убытки, приведенный в [3], показал, что наибольшие убытки возникают при отказах КЛ 6-10 кВ, на которые приходится более 70% всех нарушений электроснабжения потребителей. Поэтому повышение уровня эксплуатационной надежности распределительных кабельных сетей 6–10 кВ является одним из ключевых факторов повышения надежности электроснабжения потребителей.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в кабельных сетях 6–10 кВ (на 100 км кабельных линий, включая оборудование подстанций, в среднем происходит 4,9 ОЗЗ в год [9]). По данным [10–16] значительная часть ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ (до 80% и более), прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции в КЛ и электрических машинах, имеет дуговой прерывистый характер. Наиболее опасной разновидностью дуговых прерывистых ОЗЗ являются дуговые перемежающиеся замыкания (ДПОЗЗ), характеризующиеся небольшими интервалами времени Δt между гашениями и повторными зажиганиями заземляющей дуги от 10–20 мс (в соответствии с теориями W. Petersen и J. Peters и J. Slepian [17, 18]) до ~50 – 70 мс [19, 20] и сопровождающиеся опасными перенапряжениями на неповрежденных фазах всей электрически связанной сети. Возникновение дуговых прерывистых ОЗЗ, сопровождающихся опасными перенапряжениями, возможно также и в компенсированных сетях при больших расстройках компенсации [21]. Перенапряжения, возникающие при ДПОЗЗ, часто обуславливают переходы последних в двойные и многоместные замыкания на землю и многофазные короткие замыкания (КЗ) в месте повреждения и являются одной из основных причин аварий в кабельных сетях 6–10 кВ, приводящих к значительному экономическому ущербу для потребителей [10, 14, 15, 19, 22–24]. Быстрое определение поврежденной КЛ при устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ) и ДПОЗЗ и места повреждения (зоны повреждения с точностью до участка КЛ, который без нарушения электроснабжения потребителей можно отключить для проведения высоковольтных испытаний поврежденного кабеля и точного определения места пробоя изоляции) являются главными усло-

виями скорейшей ликвидации повреждения и восстановления нормального режима работы электрической сети.

Большая часть ОЗЗ (до 70% и более) в рассматриваемых сетях имеет кратковременный самоустраняющийся характер ("мгновенные земли", "клевки земли") [10, 12, 14, 16, 23, 24–26]. Известно, однако, что пробой в элементах с твердой или комбинированной изоляцией не являются преходящими и, возникнув, впоследствии неуклонно развиваются до полного пробоя (устойчивого или перемежающегося ОЗЗ или междуфазного КЗ). Поэтому селективную фиксацию кратковременных самоустраняющихся ОЗЗ (КрОЗЗ) в кабелях и электрических машинах можно использовать в целях диагностики состояния изоляции элементов сети и предотвращения аварийного отключения присоединений релейной защитой от КЗ [16, 23–30]. По данным [16, 23, 24, 26] фиксацией КрОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и использованием информации о них для проведения высоковольтных испытаний поврежденного элемента сети можно предотвратить до 50% внезапных отключений КЛ и более 30% внезапных отключений электродвигателей. Как правило, для определения места кратковременного пробоя изоляции требуется проведение высоковольтных испытаний поврежденного элемента или участка сети [23, 24]. Поэтому использование информации о КрОЗЗ в целях диагностирования состояния изоляции КЛ возможно при условии, что определено не только поврежденное присоединение, но и место (зона) пробоя изоляции.

Таким образом, определение места (зоны) пробоя изоляции при всех разновидностях ОЗЗ на КЛ 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, – актуальная задача, решение которой позволяет не только сократить затраты времени на ликвидацию повреждения и восстановление нормального режима работы сети, но и, что более важно, значительно снизить вероятность перехода повреждения в КЗ, отключаемое штатным действием релейной защиты, и уменьшить число кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) потребителей. Следует отметить, что совершенствование существующих и создание новых промышленных технологий, как правило, приводит к увеличению их чувствительности к КНЭ [31].

Отметим также, что решение задачи дистанционного определения места ОЗЗ (ДОМЗЗ) в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ является одной из важных задач, связанных с реализацией концепции создания интеллектуальных активно-адаптивных электрических сетей (Smart Grid) [32], обладающих новыми свойствами, в частности, такими, как самодиагностика, самовосстановление, способность выявлять "слабые" участки сети и изменять режим ее работы для предотвращения возникновения технологических нарушений и др.

В.2 Степень разработанности темы исследований. Решению задачи дистанционного определения места повреждения (ОМП) на высоковольтных воздушных и кабельных линиях электропередачи большое внимание уделяется как в России, так и в других странах, однако большая часть исследований и разработок посвящена определению места короткого замыкания (ОМКЗ). Внедрение устройств, предназначенных для ОМКЗ, началось в СССР в конце 50-х – начале 60-х годов, в США и некоторых других развитых странах – в конце 30-х – начале 40-х годов. Существенный вклад в разработку и исследование методов и устройств ОМКЗ на высоковольтных ЛЭП внесли советские и российские – Айзенфельд А.И., Аржанников Е.А., Арцишевский Я.Л., Борухман В.А., Кудрявцев А.А., Кузнецов А.П., Куликов А.Л., Лямец Ю.А., Мисриханов М.Ш., Розенкоп М.П., Саухатас А.С., Шалыт Г.М. и др. [33–50], а также зарубежные ученые и специалисты – Agarval R.A., Blackburn J.L., Christopoulos C., Gilbert J.G., Gigris A. A., Kohlas J., Rockfeller G.D., Wright A. и др. [51–57].

Отметим, что в силу специфики электромагнитных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения по сравнению с электромагнитными процессами при КЗ, обусловленной прежде всего применяемыми в них режимами заземления нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), различные варианты резистивного заземления нейтрали и др.), различием видов ОЗЗ (устойчивые, дуговые прерывистые, кратковременные самоустраняющиеся пробой изоляции и др.), особенностями конфигурации сетей, наличием, кроме центров питания (ЦП), других объектов – распределительных и трансформаторных подстанций (РП и ТП) – с различными требованиями и техническими возможностями в части оснащения отходящих линий и участков ЛЭП

устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА), большинство методов дистанционного ОМКЗ не может быть использовано для решения задачи дистанционного определения места ОЗЗ (ДОМЗЗ). В кабельных сетях 6–10 кВ существенной особенностью, значительно затрудняющей решение задачи ОМЗЗ, является также небольшая протяженность КЛ или их участков между смежными объектами.

Методам и устройствам, ориентированным непосредственно на решение задачи ДОМЗЗ на линиях, находящихся под рабочим напряжением, в электрических сетях среднего напряжения и, прежде всего, в кабельных сетях 6–10 кВ, как показывает анализ различных источников информации, уделяется значительно меньшее внимание. Большая часть работ в данной области посвящена методам и приборам локализации места повреждения на отключенных ЛЭП. Теоретические и экспериментальные основы определения мест повреждения на отключенных от сети кабельных и воздушных линиях рассмотрены в работах Шалыта Г.М., Спиридонова В.К., Дементьева В.С., Платонова В.В. Особо следует отметить работы Шалыта Г.М., с чьим именем связано развитие у нас в стране импульсных методов определения места повреждения (методов импульсной рефлектометрии), основанных на активном зондировании ЛЭП [58–62].

Разработки методов ДОМЗЗ на ЛЭП 6–35 кВ, находящихся под рабочим напряжением, в России практически появились в конце 90-х – начале 2000-х годов, причем большая часть разработок (Байбурин Э.Р., Куликов А.Л., Петрухин А.А., Закамский Е.В., Латипов А.Г., Шалин А.И.) относится к воздушным сетям 6–35 кВ [63–68], а меньшая (Качесов Е.В. и др.) – к кабельным сетям 6–10 кВ [21–24, 69–72]. Однако эффективность разработанных для распределительных КЛ напряжением 6–10 кВ методов и устройств ДОМЗЗ не подтверждена опытом их внедрения и эксплуатации. Поэтому дальнейшие исследования и разработки в данном направлении являются актуальными.

В.3 Цель работы – разработка и исследование способов и алгоритмов дистанционного определения места однофазного замыкания на землю на кабельных линиях распределительных сетей 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, основанных на использовании электрических величин переходного процесса.

В.4 Задачи, решаемые в работе:

1 Анализ особенностей распределительных кабельных сетей 6–10 кВ различного назначения для определения области применения устройств ДОМЗЗ и основных требований к ним.

2 Сравнительный анализ известных способов ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением.

3 Исследование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с применением аналитической и математических имитационных моделей в целях выбора информационных параметров для решения задачи ДОМЗЗ.

4 Исследование частотных характеристик и разработка математических моделей первичных преобразователей тока и напряжения, применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ для подключения устройств ДОМЗЗ.

5 Разработка способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, обеспечивающих устойчивость к влиянию факторов, искажающих замер.

6 Анализ факторов, влияющих на точность определения места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходного процесса при ОЗЗ.

В.5 Объект и предмет исследований. Объектом исследований являются распределительные кабельные сети напряжением 6–10 кВ городского и промышленного электроснабжения. Предмет исследований – способы и алгоритмы ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, основанные на использовании электрических величин переходного процесса.

В.6 Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» (технические науки).

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 в диссертационной работе объектом исследований являются распределительные электрические кабельные сети среднего напряже-

ния, предметом исследований – способы дистанционного определения места наиболее частого вида повреждений – однофазных замыканий на землю.

Соответствие диссертации области исследования специальности: представленные в диссертации результаты соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 соответствуют разработка математических имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для исследования электрических величин переходного процесса, позволяющих определить расстояние до места ОЗЗ, и математических моделей первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности для исследования влияния их частотных характеристик на точность разработанных способов ДОМЗЗ;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработки способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, обеспечивающих устойчивость замера в условиях влияния искажающих факторов.

В.7 Методы научных исследований. Для решения поставленных задач в работе использовались методы теории электрических цепей, электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС), математического и физико-математического моделирования электрических цепей.

В.8 Научную новизну работы представляют:

1 Результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в целях выбора информационных параметров, обеспечивающих уменьшение влияния изменений суммарного емкостного тока контролируемой сети и переходного сопротивления в месте повреждения на точность замера устройств ДОМЗЗ.

2 Математические модели кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности для исследования влияния их частотных характеристик на точность ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходных процессов.

3 Способ и алгоритм ДОМЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса, обеспечивающие повышение точности замера расстояния до места повреждения в online-режиме при возможных в условиях эксплуатации изменениях суммарного емкостного тока контролируемой сети и переходного сопротивления в месте повреждения.

4 Способ и алгоритм ДОМЗЗ, основанный на использовании имитационной алгоритмической модели контролируемой кабельной линии, обеспечивающий повышение точности замера расстояния до места повреждения в online-режиме в условиях влияния различных факторов.

5 Методика компенсации суммарной погрешности определения места повреждения при ОЗЗ, обусловленной влиянием нескольких различных факторов, при использовании способов ДОМЗЗ на основе электрических величин переходного процесса.

В.9 Практическая ценность результатов работы заключается в следующих основных положениях:

1 Результаты анализа особенностей кабельных сетей 6-10 кВ промышленного и городского электроснабжения, позволяющие обосновать методы локализации всех разновидностей ОЗЗ в сетях различного назначения, могут быть использованы проектными организациями при выборе принципов выполнения селективной защиты и сигнализации ОЗЗ на различных объектах кабельных сетей 6–10 кВ и обосновании целесообразности применения устройств ДОМЗЗ.

2 Результаты анализа информационных параметров электрических величин переходного процесса в кабельных сетях 6–10 кВ и факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения, могут быть использованы разработчиками способов и устройств ДОМЗЗ.

3 Математические модели кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) могут быть использованы разработчиками для исследования динамических режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ и анализа влияния частотных характеристик ТТНП на точность ДОМЗЗ по параметрам электрических величин переходного процесса.

4 Разработанные способы и алгоритмы ДОМЗЗ на основе переходных процессов позволяют сократить временные и финансовые затраты на поиск места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, систем городского электроснабжения.

5 Разработанные имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, способы ДОМЗЗ по параметрам переходных процессов, модели ТТП могут быть использованы в научно-исследовательской работе аспирантов по специальности 05.14.02, а также в учебном процессе подготовки магистров и бакалавров по профилю "Релейная защита и автоматизация ЭЭС".

В.10 Достоверность и обоснованность полученных результатов определяются корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в ЭЭС, сходимостью результатов, полученных аналитическими методами, с данными исследований на математических моделях и с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках, а также с данными экспериментальных исследований.

В.11 Основные положения, выносимые на защиту:

1 Результаты анализа особенностей кабельных сетей 6-10 кВ, обосновывающие методы локализации всех разновидностей ОЗЗ в сетях различного назначения и область применения устройств ДОМЗЗ.

2 Результаты исследований переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и выбора информационных параметров переходных токов и напряжений, обеспечивающих повышение устойчивости способов ДОМЗЗ к влиянию изменений суммарного емкостного тока контролируемой сети и переходного сопротивления в месте повреждения.

3 Математические модели кабельных ТТП, основанные на использовании уравнения динамического перематгничивания и усредненной кривой намагничивания сердечника трансформатора тока.

4 Способы и алгоритмы ДОМЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса и использовании имитационной алгоритмической модели контролируемой КЛ,

обеспечивающие повышение точности замера расстояния до места повреждения в online-режиме и сокращение временных и финансовых затрат на поиск места повреждения, прежде всего, в кабельных сетях 6–10 кВ систем городского электроснабжения.

В.12 Диссертационные исследования и разработки выполнены при финансовой поддержке:

1 Министерства образования и науки РФ в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы” при выполнении прикладных научно-исследовательских и экспериментальных работ (ПНИЭР) по темам:

– “Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ” (соглашение № 14.577.21.0215 о предоставлении субсидии от 3 октября 2016 года, 2016–2018 гг., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215);

– «Разработка и исследование цифровых трансформаторов напряжения 110 кВ, основанных на фундаментальных физических законах с оптоэлектронным интерфейсом для учета электроэнергии в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью» (соглашение № 14.574.21.0072 о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 года, 2014–2016 гг., уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57414X0072) (приложение А).

2 Программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор №6192ГУ/2015 от 23.06.2015 г.

В.13 Внедрение результатов исследований.

1 Результаты работы – математические модели первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности – использованы при разработке и исследованиях принципов выполнения защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ (договор № 56/13/245.ОТМ с ООО НПП “ЭКРА” на выполнение НИР на тему

«Исследование и разработка защит от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6-10 кВ», 2013-2015 гг.).

2 Результаты разработок и исследований в части способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ планируются к внедрению Индустриальным партнером ИГЭУ по соглашению № 14.577.21.0215 о предоставлении субсидии от 3 октября 2016 года ООО НПП "ЭКРА" по завершению исследований и разработок в 2018 г.

3 Результаты диссертационных исследований и разработок используются в учебном процессе Ивановского государственного энергетического университета при подготовке магистров по направлению "Электроэнергетика и электротехника" (приложение Б).

В.14 Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, сборе и обработке статистической информации по кабельным сетям 6–10 кВ систем городского электроснабжения, получении аналитических решений отдельных задач, разработке имитационных математических моделей кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ в целях выбора информационных параметров для дистанционного ОМЗЗ, разработке принципов построения математических моделей и экспериментальных исследованиях первичных преобразователей тока и напряжения, разработке и исследовании способов и алгоритмов ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ на основе переходных процессов, анализе факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения, оценке полученных результатов.

В.15 Апробация результатов исследований. Результаты исследований докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии» («XIX Бенардосовские чтения») (Иваново, 2017 г.), XI Международной молодежной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2016 г.), на X Международной молодежной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2015 г.), на VI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Иваново, 2015 г.), на Международной научно-технической конференции

«Состояние и перспективы развития электро и теплотехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения») (Иваново, 2015 г.), на X Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015» (Иваново, 2015 г.), на Двадцать первой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в Московском энергетическом институте (Москва, 2015 г.), на IX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014» (Иваново, 2014 г.), на IV Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Новочеркасск, 2013 г.), на Девятнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в Московском энергетическом институте (Москва, 2013 г.), на XX Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013» (Иваново, 2013 г.), на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения») (Иваново, 2013 г.), на V Международной научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Харьков, Украина, 2011 г.), на Региональной научно-технической конференции в филиале ТУ (МЭИ) (Смоленск, 2011 г.).

В составе коллективов авторов результаты работы отмечены медалями и дипломами международных выставок:

- 45-й Международный Салон «Salon International des Inventions», Золотая медаль (Женева, Швейцария, апрель 2017 года);
- 65-й Всемирный салон "Брюссель Иннова/Эврика 2016" «Eureka!», Золотая медаль (Брюссель, Бельгия, ноябрь 2016 года);
- 43-й Международный Салон «Salon International des Inventions», Золотая медаль (Женева, Швейцария, апрель 2015 года);
- 63-й Всемирный салон "Брюссель Иннова/Эврика 2014" «Eureka!», Золотая медаль (Брюссель, Бельгия, ноябрь 2014 года).

В.15 Публикации. Результаты исследований опубликованы в 33 печатных работах [73–104, 106], из них 3 статьи – в изданиях по перечню ВАК [85, 103, 106], а также 3 работы – в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS [88, 89, 97].

В.16 Основное содержание работы. Работа, кроме введения, включает 4 главы, заключение, библиографический список и приложения.

В главе 1 дана классификация кабельных сетей 6-10 кВ, области применения устройств определения места однофазного замыкания и сравнительный анализ методов ДОМЗЗ на кабельных линиях, находящихся под рабочим напряжением.

В главе 2 приведены результаты анализа переходных процессов при ОЗЗ на основе аналитического решения и исследования на имитационных моделях. Выявлены параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, которые могут быть использованы для определения места повреждения и рассмотрено влияние основных факторов (наличие переходного сопротивления в месте ОЗЗ и изменение суммарного емкостного тока сети), искажающих замер, на указанные информационные параметры

В главе 3 исследованы подходы к построению математических моделей ТТНП, даны результаты экспериментальных исследований работы ТТНП и ТНКИ в переходных и установившихся режимах и исследование на их моделях, приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

В главе 4 разработаны способы ДОМЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, и исследованы погрешности способов при влиянии различных искажающих замер факторов. Дана общая оценка точности способов и области их применения.

Библиографический список содержит 239 источников. Общий объем диссертации составляет 239 страниц, из них основной текст – 199 страницы, список литературы – 28 страниц, приложения – 12 страниц.

Глава 1 **ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТА ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ**

**1.1 Особенности определения места повреждения при замыканиях
на землю на кабельных линиях 6–10 кВ**

1.1.1 Методика определения места повреждения на КЛ. В отличие от КЛ конструкция воздушных ЛЭП позволяет использовать для определения места повреждения на ВЛ визуальный осмотр при обходах, объездах, облетах на вертолете после ее отключения и вывода в ремонт [107]. Поэтому основной целью применения устройств дистанционного ОМП на ВЛ является сокращение затрат времени на проведение указанных мероприятий. При такой методике определения конкретного места повреждения для устройств дистанционного ОМП на ВЛ допускается погрешность в расчете расстояния до 5 % [37, 38].

Кабельные линии в электроустановках и электрических сетях относятся к силовым токопроводным коммуникациям закрытого исполнения, что существенно затрудняет определение места их повреждения как при КЗ, так и при ОЗЗ и повышает требования к точности. Особенно важным является точное определение места повреждения КЛ на трассе. Это наиболее актуально в условиях города, территории промышленного предприятия или в зимнее время, так как позволяет значительно сократить размеры вскрываемого асфальтового покрытия или мерзлого грунта. В этих условиях место повреждения на КЛ должно определяться с точностью до нескольких метров. Обеспечить такую точность методы дистанционного ОМП на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, как правило, не позволяют. Поэтому точное определение места повреждения на КЛ осуществляется специальными методами после их отключения и вывода в ремонт.

На методику поиска места повреждения в КЛ существенное влияние оказывают также особенности пробоя кабеля с БПИ. При пробое кабеля в канале разря-

да за счет тепловой энергии происходит разложение маслоканифольной массы с образованием газов, способствующих повышению давления, деионизации разрядного промежутка и погасанию дуги. После пробоя давление снижается и полость начинает заполняться пропитывающим составом. Последнее приводит к затеканию в разрядный канал разогретой под действием электрической дуги кабельной массы и восстановлению электрической прочности. Такой вид повреждения называется "заплывающей пробой". Повторный пробой изоляции по сравнению с первым происходит обычно при несколько меньшем напряжении. Многократное повторение пробоев приводит к образованию более или менее устойчивого разрядного канала, т.е. переходу дугового прерывистого ОЗЗ в устойчивое дуговое замыкание или в УОЗЗ через переходное сопротивление.

При заплывающих пробоях переходное сопротивление в месте повреждения может иметь большое значение, что вносит значительные погрешности в определение места повреждения. Поэтому в комплексе противоаварийных мероприятий по диагностированию силовых кабелей обязательным условием для применения таких эффективных методов определения зоны и места повреждения как петлевой, импульсный и индукционный является снижение переходного сопротивления в месте повреждения до единиц или десятков Ом. Кроме того, для более эффективного применения индукционного метода весьма желательно "перевести" однофазное повреждение в двухфазное. Все это достигается путем прожигания изоляции в дефектном месте на отключенном от сети кабеле с помощью специальных высоковольтных установок прожигателя.

Таким образом, мероприятия по точному ОМП на отключенной от сети КЛ включают в себя профилактические испытания повышенным напряжением, обработку (при необходимости) места повреждения для получения устойчивых диагностических параметров, дистанционное определение зоны повреждения путем измерения расстояния до места повреждения от конца кабельной линии, и непосредственное указание точного места повреждения на трассе диагностируемого объекта. Методы проведения указанных мероприятий определяются "Нормами испы-

таний электрооборудования", государственными стандартами и инструкциями по определению мест повреждения силовых кабельных линий [107–113]

Для выполнения указанных мероприятий по ОМП на отключенных КЛ в предварительно должны быть решены задачи, связанные с определением присоединения (направления) с ОЗЗ и зоны повреждения – участка, который можно отключить без нарушений электроснабжения и (или) технологических процессов потребителей. Поврежденное присоединение (направление) с ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, с компенсацией емкостного тока или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, определяется с помощью устройств селективной защиты от ОЗЗ (УЗЗ), действующих на сигнал или на отключение. Локализации зоны повреждения на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, с точностью до участка, который можно отключить для проведения мероприятий по ОМП, если нет специальных приборов, указывающих, на какой линии (участке) имеется повреждение, при устойчивых ОЗЗ, производится, как правило, методом последовательного деления сети на участки (методом оперативных переключений в сети) без нарушения электроснабжения потребителей. Однако этот метод не всегда эффективен при ДПОЗЗ и его нельзя применить при КрОЗЗ. Поэтому для локализации зоны повреждения на КЛ, находящейся под рабочим напряжением, более эффективно применение методов ДОМЗЗ, обеспечивающих решение данной задачи при всех разновидностях ОЗЗ.

С учетом изложенного методика определения места ОЗЗ в кабельных сетях можно представить в виде, приведенном в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Задачи ОМЗЗ на кабельных линиях и методы и средства их решения

№ п/п	Задача	Метод	Средства
1	Определение поврежденного присоединения при всех разновидностях ОЗЗ	Методы, основанные на контроле электрических величин переходного процесса при ОЗЗ	Устройства селективной сигнализации всех разновидностей ОЗЗ, установленные на объектах кабельных сетей

2	Определение (локализация) зоны повреждения на КЛ, находящейся по рабочим напряжением, при всех разновидностях ОЗЗ	Метод деления сети (оперативных переключений в сети) при УОЗЗ	Оперативная выездная бригада
		Методы ДОМЗЗ при всех разновидностях ОЗЗ	Устройства ДОМЗЗ, установленные на ЦП и РП кабельных сетей
3	Предварительная обработка места повреждения (воздействием с одного конца кабеля, отключенного от сети)	Преобразование высокоомного повреждения в низкоомное (прожиг)	Высоковольтное устройство прожига изоляции
4	Определение зоны места повреждения дистанционным методом (измерениями с одного конца кабеля, отключенного от сети)	Локационный (импульсный) метод (при небольших значениях переходного сопротивления в месте повреждения)	Измеритель неоднородности линий, рефлектометр
		Волновой (импульсно-волновой) метод (при больших значениях переходного сопротивления в месте повреждения)	Высоковольтная испытательная установка, измеритель расстояния до места повреждения
		Метод колебательного разряда (при запыляющих пробоях)	Высоковольтная испытательная установка, измеритель расстояния до места повреждения
5	Отыскание трассы поврежденной кабельной линии на местности	Индукционный метод. По известным топографическим привязкам из документации.	Индукционный трассоискатель
6	Точное определение места повреждения на трассе кабельной линии, отключенной от сети	Индукционный метод	Индукционный трассоискатель
		Акустический метод	1. Высоковольтная установка 2. Индукционно-акустические приемники

В связи с большой протяженностью и непрерывным развитием кабельных сетей систем городского и промышленного электроснабжения работы, связанные с выявлением и ликвидацией повреждений носят массовый характер и требуют значительных экономических затрат. По данным [113, 114] в России на восстановление работоспособности кабельной линии 6-10 кВ требуется до 10 тыс. и более рублей, при этом затраты непосредственно на ОМП составляют до 50 %. Поэтому сокращение затрат времени на проведение мероприятий по ОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, как на КЛ, отключенной от сети, так и находящейся под рабочим напряжением, представляет собой весьма актуальную задачу.

1.1.2 Задачи дистанционного ОМЗЗ на КЛ, находящейся под рабочим напряжением. Из таблицы 1.1 можно видеть, что большая часть задач, связанных с ОМЗЗ, должна выполняться на линиях, отключенных от сети. К задачам ОМЗЗ, выполняемых на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, относятся:

- 1) селективная сигнализация всех разновидностей ОЗЗ;
- 2) дистанционное определение зоны всех разновидностей ОЗЗ с точностью до участка, который можно отключить от сети, для проведения мероприятий по пп. 3–6 таблицы 1.1.

Последнюю задачу называют также задачей локализации места (зоны) ОЗЗ на КЛ, находящейся под рабочим напряжением. В отличие от методов ОМП на отключенных от сети линиях (кабельных или воздушных), когда у эксплуатационного персонала имеется достаточно много времени для анализа и обработки (например, с помощью специальных методик, программ, моделей) результатов измерений фиксирующих приборов или осциллограмм аварийных токов и напряжений и расчета расстояния до места КЗ для последующего обхода, объезда или облета поврежденной и отключенной ВЛ с целью выявления точного места повреждения, а на КЛ – для проведения ряда мероприятий с использованием специальной аппаратуры (см. табл. 1.1) для точного определения места повреждения, также требующих значительных затрат времени, локализация зоны ОЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением должна осуществляться за минимальное время, так как существует опасность, особенно при ДПОЗЗ, перехода замыкания на землю в двойные или многоместные замыкания на землю или КЗ в месте по-

вреждения, приводящие к аварийным отключениям КЛ. Поэтому устройства ДОМЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, должны обладать достаточно высоким быстродействием, позволяющим определять зону повреждения в режиме реального времени в темпе процессов, протекающих при ОЗЗ. С учетом этого для решения данной задачи в кабельных сетях не всегда эффективны методы, требующие фиксации аварийных токов и напряжений для последующих расчетов расстояния на их основе до места ОЗЗ с использованием специальных программ и моделей контролируемой сети.

1.2 Характеристики распределительных кабельных сетей 6–10 кВ как объекта исследования

1.2.1 Классификация кабельных сетей 6–10 кВ по назначению. По назначению принято различать кабельные сети *промышленного и городского* электропитания. Назначение определяет особенности схем (конфигурации) кабельных сетей, режимы их работы, длины и сечения КЛ, состав и особенности объектов сети, возможность или, наоборот, отсутствие возможности применения на них устройств ДОМЗЗ. Особенности схем и объектов распределительных кабельных сетей 6–10 кВ определяют принципы решения задачи ДОМЗЗ. Параметры КЛ оказывают существенное влияние на характер и параметры электрических величин в переходных режимах ОЗЗ, используемых для решения задачи ДОМЗЗ.

1.2.2 Режимы заземления нейтрали распределительных кабельных сетей 6–10 кВ. Параметры электрических величин в установившихся и переходных режимах ОЗЗ, которые могут быть использованы для решения задачи ДОМЗЗ, в значительной мере зависят от режима заземления нейтрали сети. Все режимы заземления нейтрали, применяемые в кабельных сетях 6–10 кВ можно разделить на две группы:

– режимы, допускающие работу сети и поврежденного элемента с ОЗЗ в течение ограниченного времени и действие защиты от замыканий на землю на сигнал;

– режимы, требующие немедленного отключения поврежденного элемента защитой от ОЗЗ.

Первый подход к режиму заземления нейтрали и способу действия защиты от ОЗЗ позволяет предотвратить внезапность нарушения электроснабжения или технологических процессов потребителей и получил поэтому наиболее широкое применение в распределительных кабельных сетях среднего напряжения в России и других странах. К режимам заземления нейтрали, обеспечивающим возможность работы сети с ОЗЗ в течение ограниченного времени и действия защиты от данного вида повреждений на сигнал и применяемым в настоящее время в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ в России, относятся [115–126]:

- изолированная нейтраль (при ограниченных значениях суммарного емкостного тока сети [115]);
- резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР);
- высокоомное заземление нейтрали через резистор (при ограниченных значениях полного активно-емкостного тока ОЗЗ);
- комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор.

В соответствии с требованиями ПУЭ [115] *изолированная нейтраль* может применяться в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях (ВЛ), с $U_{ном} = 3-6$ кВ при $I_{с\Sigma} \leq 30$ А, с $U_{ном} = 10$ кВ при $I_{с\Sigma} \leq 20$ А, с $U_{ном} = 15-0$ кВ при $I_{с\Sigma} \leq 15$ А. В сетях с номинальным напряжением $U_{ном} = 3-20$ кВ, имеющих ВЛ на железобетонных и (или) металлических опорах, и во всех сетях с $U_{ном} = 35$ кВ изолированная нейтраль может применяться при суммарном емкостном токе сети $I_{с\Sigma} < 10$ А. Недостатками этого режима заземления нейтрали являются высокая вероятность возникновения ДПОЗЗ, сопровождающихся опасными для сети перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения, возможность возникновения многоместных повреждений из-за пробоев изоляции на других присоединениях, связанных с дуговыми перенапряжениями, с возможностью выхода из строя нескольких кабелей или электродвигателей, возможность длительного воздействия на изоля-

цию дуговых перенапряжений, ведущего к накоплению в ней дефектов и снижению срока службы, сложность обнаружения места повреждения при ДПОЗЗ, опасность электропоражения персонала и посторонних лиц при длительном существовании замыкания на землю в сети, сложность обеспечения динамической устойчивости функционирования устройств защиты от ОЗЗ при дуговых прерывистых замыканиях. Именно по этим причинам многие специалисты предлагают полностью отказаться от применения режима изолированной нейтрали в кабельных сетях среднего напряжения [например, 116]. В настоящее время из промышленно развитых стран режим изолированной нейтрали применяют только Италия, Япония и Финляндия, причем в Италии сейчас рассматривается возможность перехода к работе с заземлением через дугогасящий реактор, а в Японии – с заземлением через резистор [125].

Однако решение проблемы изолированной нейтрали в кабельных распределительных сетях связано со значительными капитальными затратами на оборудование сетей устройствами заземления нейтрали и, главное, на замену всех устройств защиты от ОЗЗ. Поэтому задача дистанционного определения места (зоны) при всех разновидностях ОЗЗ для кабельных сетей 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, в России еще в течение многих лет будет оставаться актуальной.

При значениях суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, превышающих указанные выше значения, в соответствии с требованиями ПУЭ [115], должно применяться *резонансное заземление нейтрали* через ДГР (компенсация емкостного тока ОЗЗ). Резонансное заземление нейтрали, по мнению многих специалистов является одним из самых эффективных средств борьбы с негативными последствиями ОЗЗ без немедленного отключения поврежденного элемента [10, 11, 116, 120–126]. Преимуществами резонансного заземления по сравнению с изолированной нейтралью являются уменьшение тока в месте повреждения, значительное снижение скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги тока ОЗЗ, малая вероятность возникновения ДПОЗЗ, уменьшение перенапряжений на неповрежден-

ных фазах в переходных режимах ОЗЗ. В сетях с резонансным заземлением исключается также возможность возникновения феррорезонансных процессов в сети.

Основными недостатками компенсированных сетей являются большие значения остаточного тока в месте ОЗЗ при больших (сотни ампер) значениях $I_{c\Sigma}$ из-за влияния некомпенсируемых ДГР активной составляющей и высших гармоник, снижающие эффективность компенсации, а также проблем с выполнением селективной защиты от ОЗЗ. При значительных расстройках компенсации, возможных в реальных условиях эксплуатации, в компенсированных сетях возможно возникновение дуговых прерывистых ОЗЗ, сопровождаемых опасными перенапряжениями [21].

К недостаткам резонансно-заземленных сетей следует отнести также их свойство накапливать скрытые дефекты изоляции после КрОЗЗ, которые рано или поздно перейдут в устойчивые повреждения. Поэтому в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ особенно актуальной становится задача дистанционного определения места (зоны) не только при устойчивых и дуговых прерывистых ОЗЗ, но и при кратковременных самоустраняющихся пробоях изоляции.

Большая часть кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения в России работает с резонансным заземлением нейтрали через ДГР (с компенсацией емкостных токов ОЗЗ). Незначительная часть (порядка 10%) кабельных сетей 6–10 кВ в системах промышленного электроснабжения имеет значения $I_{c\Sigma}$, не превышающие 10 А, и работает с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор.

Главной целью *высокоомного резистивного заземления нейтрали* сети является ограничение дуговых перенапряжений и исключение феррорезонансных явлений при одновременном обеспечении возможности длительной работы сети с ОЗЗ на время поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом. Ограничение перенапряжений при дуговом прерывистом ОЗЗ достигается за счет уменьшения постоянной времени разряда емкости неповрежденных фаз на интервале времени между гашением и последующем зажиганием заземляющей дуги с помощью включенного в нейтраль сети резистора R_N . Для обеспечения практически

полного разряда емкостей фаз за время минимальной бестоковой паузы, равное при ДПОЗЗ по теории W. Petersen $\sim T_{50}/2 = 0,010\text{с}$, сопротивление резистора выбирают из условия [116, 120, 126]:

$$R_N = X_{c\Sigma} = 3\omega C_{0\Sigma} U_{\phi.\text{ном}} = \frac{U_{\phi.\text{ном}}}{I_{c\Sigma}}, \quad (1.1)$$

где $X_{c\Sigma}$ – суммарное емкостное сопротивление сети по отношению к земле; $C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фазы сети на землю; $U_{\phi.\text{ном}}$ – номинальное фазное напряжение сети.

Заземление нейтрали через высокоомный резистор $R_N \approx X_{c\Sigma}$ приводит к увеличению тока в месте ОЗЗ примерно в $\sqrt{2}$ раз, что ограничивает область применения данного режима заземления нейтрали. В [10] показано, что свободно горящие и закрытые заземляющие дуги становятся безопасными, если ток замыкания на землю не превышает 10 А. С учетом этого целесообразно, чтобы при использовании высокоомного заземления нейтрали суммарный емкостный ток сети не превышал значения $10/\sqrt{2} \approx 7$ А. Большинство специалистов рекомендует применять высокоомное заземление нейтрали в кабельных сетях 6–10 кВ при значениях $I_{c\Sigma}$, не превышающих 5...7 А [116, 121, 125, 126]. К таким сетям относятся неразветвленные кабельные сети 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения, содержащие КЛ небольшой протяженности.

Небольшие значения тока ОЗЗ в сетях с высокоомным заземлением нейтрали недостаточны для полного прожигания изоляции в месте повреждения и перехода замыкания в устойчивое. Поэтому в рассматриваемых сетях, как и в сетях с изолированной нейтралью, возможно возникновение дуговых прерывистых ОЗЗ и КрОЗЗ, и задача дистанционного определения места (зоны) повреждения при всех разновидностях ОЗЗ сохраняет актуальность.

Как уже отмечалось выше, при значительных расстройках компенсации до 25–30 % в компенсированных сетях могут возникать дуговые прерывистые ОЗЗ, сопровождаемые опасными перенапряжениями [21]. Кратности дуговых перенапряжений в таких режимах могут достигать значений $K_n = 2,8-3,0$ [120], что с

точки зрения ограничения перенапряжений делает применение ДГР неэффективным. Для снижения перенапряжений при больших расстройках компенсации в [120, 121] предложено применять комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор. Сопротивление R_N заземляющего резистора, подключаемого параллельно ДГР, в этом случае выбирается из условия [120, 121, 126]:

$$R_N = \frac{U_{\text{ф.ном}}}{\Delta I} = \frac{U_{\text{ф.ном}}}{|I_{C\Sigma} - I_L|}, \quad (1.2)$$

где ΔI - ток расстройки компенсации; I_L - ток ДГР.

Анализ опыта применения комбинированного заземления нейтрали подтверждает, что подключение высокоомного резистора параллельно ДГР позволяет уменьшить уровень дуговых перенапряжений и время горения дуги, длительность воздействия перенапряжений на электрооборудование и вероятность перехода ОЗЗ в двойное или многоместное замыкание на землю [127].

Высокоомный резистор, подключенный параллельно ДГР, в основном влияет на процессы, протекающие в месте повреждения после гашения заземляющей дуги и практически не оказывает влияния на переходный процесс в момент пробоя изоляции и установившийся режим ОЗЗ. Следовательно, сети с комбинированным режимом заземления нейтрали в аспекте решения задачи ДОМЗЗ практически аналогичны обычным компенсированным сетям.

При *низкоомном заземлении нейтрали через резистор* минимальное значение тока ОЗЗ в месте повреждения ограничивается несколькими условиями:

- исключения возможности возникновения наиболее опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ (за счет прожигания изоляции током ОЗЗ);
- обеспечения устойчивости функционирования простых токовых защит нулевой последовательности от ОЗЗ во всех режимах работы сети;
- обеспечения термической стойкости опор ВЛ, оболочек и экранов кабелей к протеканию тока ОЗЗ и др.

При *низкоомном заземлении нейтрали* используется резистор, создающий ток от нескольких десятков до 1000-2000 А. Например, во Франции в Electricite

de France низкоомный резистор выбирается таким образом, чтобы ток однофазного замыкания в воздушных сетях не превышал 300 А, а в кабельных 1000 А [31], согласно бельгийским нормам ток однофазного замыкания ограничивается величиной не более 500 А, в США – величиной 400 А, в том числе и для сетей с высоковольтными электродвигателями [119], в России в кабельных сетях напряжением 20 кВ, выполненных КЛ из сшитого полиэтилена (СПЭ), – 1000 А. В некоторых странах при наличии в сети высоковольтных электродвигателей величина тока ОЗЗ ограничивается в целях исключения возможности выплавления стали статора электродвигателя. Например, Electricite de France ограничивает ток в месте замыкания величиной 20 А (в случае необходимости допускается увеличение до 50 А). Похожие ограничения для сетей с высоковольтными электродвигателями были приняты при разработке устройств резистивного заземления нейтрали и в России – 35–38 А [128–131].

Основным недостатком низкоомного заземления нейтрали является возможность существенного увеличения числа отключений элементов сети из-за переходов кратковременных самоустраняющихся (при других режимах заземления нейтрали) пробоев изоляции в устойчивые повреждения [132, 133]. Поэтому применение низкоомного заземления нейтрали целесообразно только в тех сетях, где допустимо (с учетом уровня электрического и технологического резервирования, степени автоматизации распределительных сетей и технологических процессов) отключение любого элемента сети.

В России режим низкоомного заземления нейтрали используется очень редко, только в некоторых сетях собственных нужд блочных электростанций, в сетях газоперекачивающих компрессорных станций, а также в кабельных сетях напряжением 20 кВ, выполненных КЛ из СПЭ. Поскольку КрОЗЗ и ДПОЗЗ в таких сетях практически исключены, а при УОЗЗ защита от данного вида повреждений действует на отключение, необходимости в применении устройств ДОМЗЗ на КЛ, находящейся под рабочим напряжением, в кабельных сетях с низкоомным заземлением нейтрали не возникает – для определения места ОЗЗ используются известные методы ОМП на КЛ, отключенных от сети.

Выше отмечалось, что примерно 95% кабельных сетей 6–10 кВ в России выполнено КЛ с БПИ, однако масштабы применения современных кабелей с изоляцией из СПЭ постоянно расширяются. Известно, что полимерная изоляция из СПЭ крайне чувствительна к высокочастотным перенапряжениям, возникающим при ОЗЗ и коммутациях высоковольтными выключателями, особенно вакуумными. В отличие от БПИ, СПЭ изоляция не является самовосстанавливающейся, что говорит о необходимости минимизации времени поиска поврежденного фидера при всех разновидностях ОЗЗ, включая КрОЗЗ, в таких сетях. Поэтому проблема ДОМЗЗ в кабельных сетях, выполненных КЛ с изоляцией из СПЭ и работающих с режимами заземления нейтрали, допускающими работу сети с ОЗЗ и действие защиты от ОЗЗ на сигнал, является еще более актуальной, чем для кабельных сетей, выполненных КЛ с БПИ. Следует отметить, что в связи с развитием сетей с кабелями с изоляцией из СПЭ все чаще звучат предложения режим ОЗЗ считать аварийным и отключать поврежденное присоединение (как это делается в большинстве сетей среднего класса напряжения в Беларуси) – мгновенно или с выдержкой времени [134]. Решение этой задачи упрощается при использовании в таких сетях низкоомного резистивного заземления нейтрали с действием защиты от замыканий на землю на отключение [135, 136].

1.2.3 Основные особенности и характеристики кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения. В состав распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения входят следующие основные объекты:

- распределительная подстанция (распределительный пункт – РП) – электроустановка, предназначенная для приема и распределения электрической энергии без преобразования и трансформации;
- трансформаторная подстанция (ТП) – электроустановка, предназначенная для приема и распределения электрической энергии, к шинам которой подключаются трансформаторы 6–10/0,4–0,22 кВ и (или) высоковольтные электродвигатели 6 – 10 кВ;

- распределительная трансформаторная подстанция (РТП) - электроустановка, в которой совмещены функции РП и ТП;
- кабельные линии напряжением 6–10 кВ.

Принципы решения задачи определения зоны всех разновидностей ОЗЗ с точностью до участка (элемента) сети, который можно выделить для проведения высоковольтных испытаний, в значительной мере определяются схемами соединений кабельными линиями центра питания (ЦП) – шин 6–10 кВ главных понизительных подстанций (ГПП) или ГРУ ТЭЦ – с РП (РТП) и ТП, а также составом электрооборудования и РЗА элементов указанных объектов.

В системах электроснабжения промышленных предприятий на напряжении 6–10 кВ в основном применяются радиальные схемы (рисунок 1.1, а и б), в некоторых случаях – смешанные радиально-магистральные схемы [137–142].

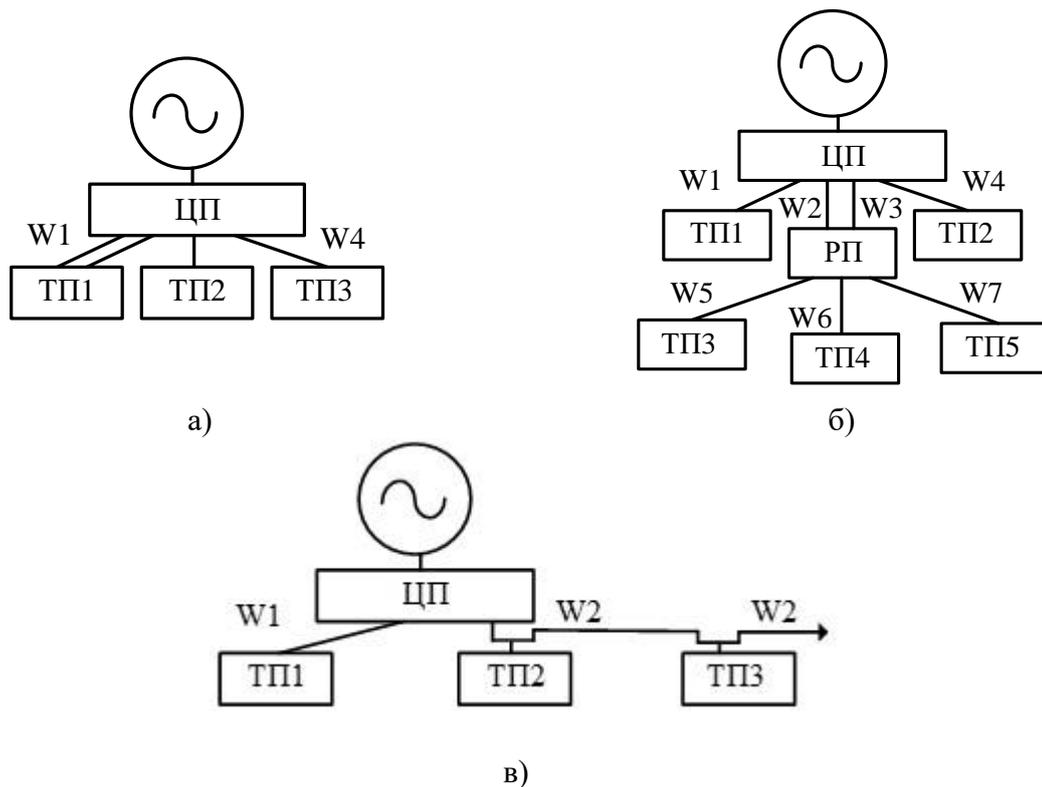


Рисунок 1.1 – Основные схемы кабельных сетей 6–10 кВ систем электроснабжения промышленных предприятий: а – радиальная одноступенчатая; б – радиальная двухступенчатая; в – смешанная радиально-магистральная

В таблице 1.2 даны примерные диапазоны изменения и средние значения основных параметров кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения,

полученные на основе анализа данных по системам электроснабжения предприятий различных отраслей промышленности в [20, 143, 144].

Таблица 1.2 – Значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения, питаемых от шин 6–10 кВ ГПП

Параметр		Значение параметра для объектов сети		
		Секция ЦП	Секция РП	Секция ТП
Суммарный емкостный ток сети $I_{сз}$, А	Диапазон значений	3 – 60 А	–	–
	Среднее значение	30 А	–	–
Число КЛ, подключенных к шинам объекта	Диапазон значений	4 – 16	4 – 20	2 – 6
	Среднее значение	8	8	3
Длина КЛ, подключенных к шинам объекта, км	Диапазон значений	0,1 – 3,0	0,01 – 1,5	0,01 – 0,35
	Среднее значение	~1,0	~0,6	~0,1
Сечение КЛ, подключенных к шинам объекта, мм ²	Диапазон значений	120 – 240	70 – 185	35 – 120
	Среднее значение	185	120	70

1.2.4 Особенности локализации зоны ОЗЗ в кабельных сетях промышленного электроснабжения. На рисунке 1.2, представляющем наиболее общий вариант схемы и состав присоединений объектов распределительной кабельной сети промышленного предприятия, можно выделить 3 группы КЛ; 1-я – питающие КЛ, связывающие ЦП с РП и РТП или непосредственно с ТП, 2-я – питающие КЛ, связывающие РП с ТП, 3-я – распределительные КЛ, связывающие трансформаторы 6–10/0,4 кВ и (или) ЭД с шинами ТП.

Особенностью систем электроснабжения промышленных предприятий является то, что на всех присоединениях 6–10 кВ всех объектов кабельной сети, включая ТП, в соответствии с требованиями ПУЭ должна предусматриваться установка устройств РЗА, в т.ч. стационарных устройств защиты от ОЗЗ (УЗЗ). Для этого на всех КЛ, кроме фазных трансформаторов тока (ТТ), предусматривается установка кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП), а на шинах каждой секции ЦП и РП – трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), обеспечивающих возможность измерения как всех фазных напряжений, так и напряжения нулевой последовательности $3U_0$. На ТП, как правило, предусматривается установка трансформаторов напряжения (ТН) для измерения только двух

междуфазных напряжения, необходимых для выполнения защиты минимального напряжения (ЗМН) высоковольтных электродвигателей (ЭД) и пусковых органов напряжения устройств АВР.

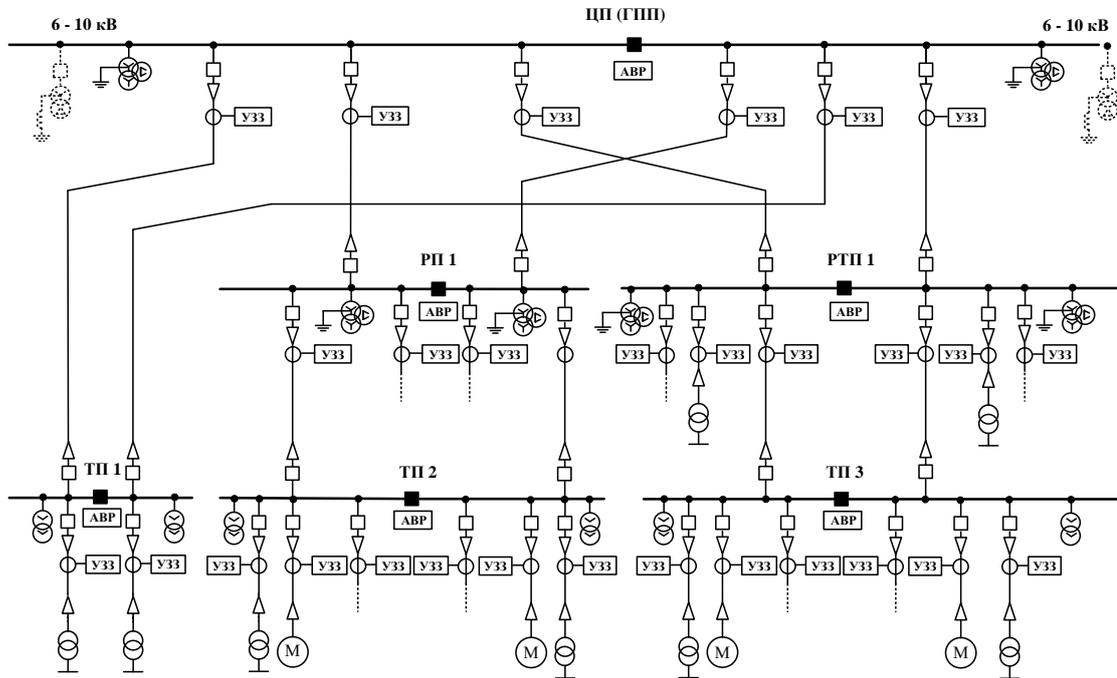


Рисунок 1.2 – Состав присоединений и объектов кабельной сети 6–10 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия, выполненной по радиальной одно- и двухступенчатой схеме

Таким образом, на объектах типа ТП измерение всех фазных напряжения и напряжения $3U_0$ для целей ДОМЗЗ возможно не всегда. Однако на КЛ, относящихся к зоне распределительных линий, подключаемых к шинам 6–10 кВ ТП, установка устройств ДОМЗЗ для определения участка с повреждением в общем случае не нужна, т.к. зона повреждения может быть определена с помощью УЗЗ, установленных на присоединениях ТП. Таким образом, в рассматриваемых сетях необходимость в применении устройств ДОМЗЗ для локализации зоны ОЗЗ может возникнуть только на ЦП и РП.

Из рисунка 1.2 можно видеть, что для присоединений, подключенных к шинам 6–10 кВ ЦП и РП (РТП) характерна "древовидная" структура, что существенно усложняет решение задачи локализации зоны ОЗЗ при использовании устройств ДОМЗЗ. Однако при ОЗЗ на питающих КЛ данная задача, как и при

ОЗЗ на распределительных КЛ на ТП, достаточно просто решается на основе показаний УЗЗ, установленных на ЦП, РП и ТП.

Проблема заключается в том, что в настоящее время в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения основное применение в качестве УЗЗ, как с действием на сигнал, так и с действием на отключение, получили индивидуальные (на одно присоединение) устройства защиты от данного вида повреждений, основанные на использовании составляющих тока $3I_0$ установившегося режима ОЗЗ, не обладающие способностью фиксировать КрОЗЗ и не всегда обеспечивающие достаточную устойчивость функционирования при ДПОЗЗ. Так в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали в качестве УЗЗ, как правило, применяются токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП) или токовые направленные защиты нулевой последовательности, основанные на использовании составляющих рабочей частоты 50 Гц [145–148]. В компенсированных кабельных сетях для выполнения селективной защиты от ОЗЗ в основном используются максимальные токовые защиты, основанные на использовании высших гармоник тока $3I_0$ установившегося режима ОЗЗ [149–151]. Для решения задачи локализации зоны повреждения при всех разновидностях ОЗЗ необходимы устройства защиты, обладающие более высоким техническим совершенством (селективностью и устойчивостью функционирования [145]), способные фиксировать не только УОЗЗ, но и ДПОЗЗ и КрОЗЗ.

1.2.5 Основные особенности и характеристики кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения. В состав распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем городского электроснабжения входят следующие основные объекты: РП (РТП), ТП и КЛ напряжением 6–10 кВ.

Питающие электрические сети состоят из РП и КЛ, питающих эти пункты. Целесообразность сооружения РП определяется в каждом конкретном случае технико-экономическими расчетами. Применение РП, как правило, допускается при нагрузке на их шинах не менее 7 МВт при напряжении 10 кВ и не менее 4 МВт при напряжении 6 кВ [152]. Питание РП осуществляется по радиальным схемам (рисунок 1.3). Радиальные линии, питающие РП, называются питающими.

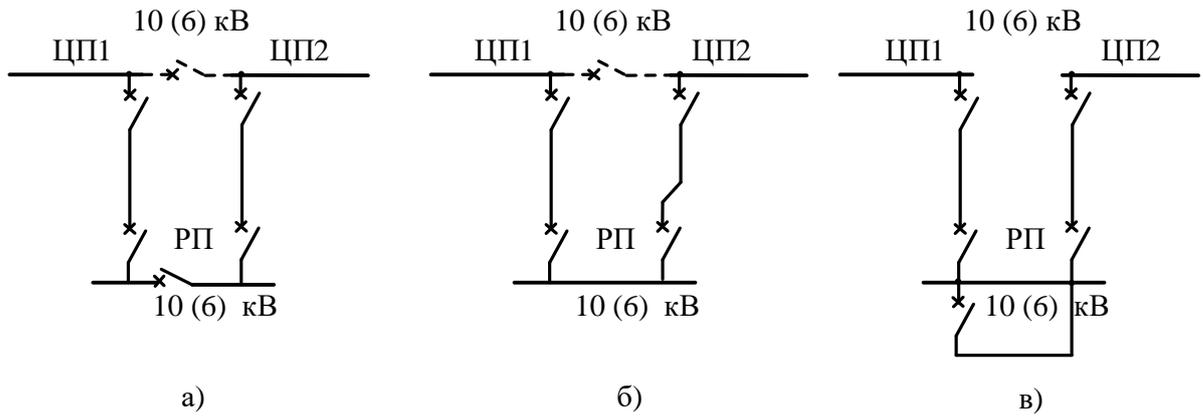


Рисунок 1.3 – Радиальные схемы питания РП 6–10 кВ: а – РП с секционированной системой шин; б – РП с несекционированной системой шин с резервной питающей линией; в – РП с несекционированной системой шин с резервированием по связям между ЦП

Схемы городских распределительных сетей (ГРС) зависят от категории надежности электроснабжения потребителей [152, 153]. Для электроснабжения электроприемников первой категории могут использоваться схемы с односторонним питанием (например, радиальная схема с резервированием или магистральная двухлучевая схема, рисунок 1.4) или с двусторонним питанием (например, магистральные двух- и трехлучевые схемы, рисунок 1.5). Для электроснабжения электроприемников второй категории применяются петлевые и кольцевые схемы питания, при этом на ТП устанавливается, как правило, один трансформатор (рисунок 1.6).

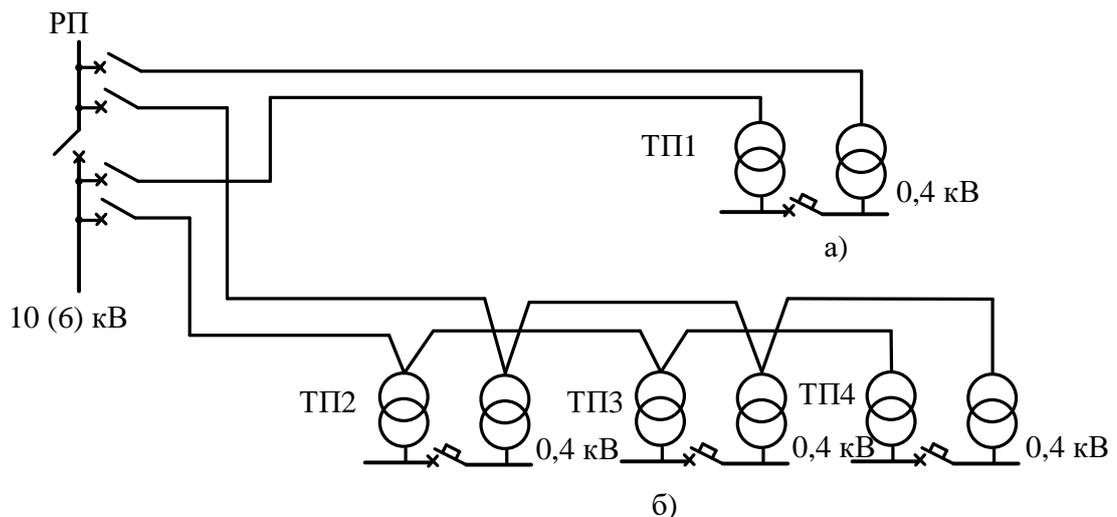


Рисунок 1.4 – Схемы питания ТП городских кабельных сетей с электроприемниками первой категории с односторонним питанием: а – радиальная с резервированием; б – магистральная двухлучевая

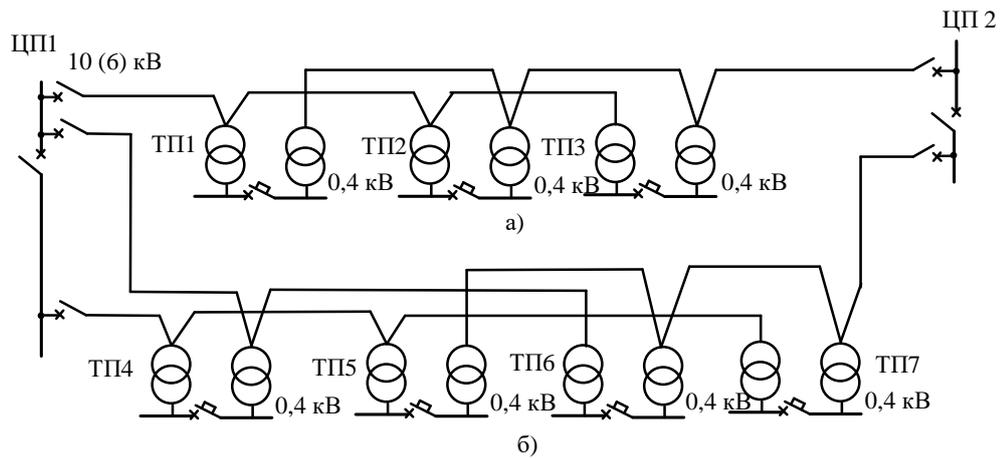


Рисунок 1.5 – Схемы питания ТП городских кабельных сетей с электроприемниками первой категории с двусторонним питанием: а – магистральная двухлучевая; б – магистральная трехлучевая

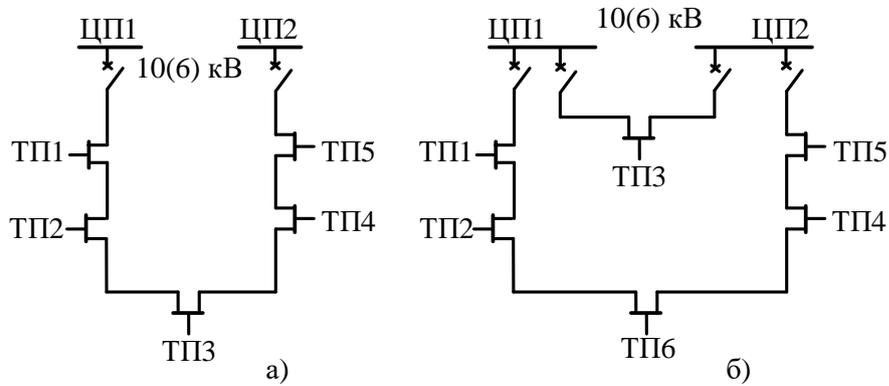


Рисунок 1.6 – Схемы питания ТП ГРС: а – петлевая; б – кольцевая

Для электроснабжения районов с электроприемниками первой и второй категорий рекомендуется применение комбинированной петлевой и одно- или двухлучевой магистральной схемы, для районов с электроприемниками третьей категории – петлевые схемы.

В ГРС радиальные линии, питающие ТП, называют питающими, в магистральных схемах линии, питающие ТП, называются магистральными.

В таблице 1.3 даны примерные диапазоны изменения и средние значения основных параметров кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения, полученные на основе анализа данных по системам электроснабжения некоторых городов Российской Федерации. Общая длина обследованных кабельных сетей, питаемых от шин ГПП, составляет более 1000 км. В состав обследованных сетей входят 20 ЦП, 76 РП и РТП (состоящих из 1 – 4 секций) и более 1300 ТП.

Таблица 1.3 – Значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения, питаемых от шин 6–10 кВ ГПП

Параметр		Значение параметра для объектов городской кабельной сети 6–10 кВ
Длина участка (отрезка) кабельной сети, м	Диапазон значений	16,7 – 7428
	Среднее значение	512
Длина питающей КЛ от ЦП до РП, м	Диапазон значений	90 – 3275
	Среднее значение	1710
Длина кабельного участка от ТП до ТП, м	Диапазон значений	25 – 1500
	Среднее значение	371,7
Число ТП в шлейфе, отходящем от ЦП или РП, шт.	Диапазон значений	2 – 13
	Среднее значение	3,8
Длина шлейфа, отходящего от РП, м	Диапазон значений	100 – 7428
	Среднее значение	1412

1.2.6 Особенности локализации зоны ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ городского электроснабжения. На рисунке 1.7 приведен пример схемы городской кабельной сети 6–10 кВ, содержащей основные типы объектов (ЦП, РП, РТП и ТП) и кабельных линий (питающих и магистральных).

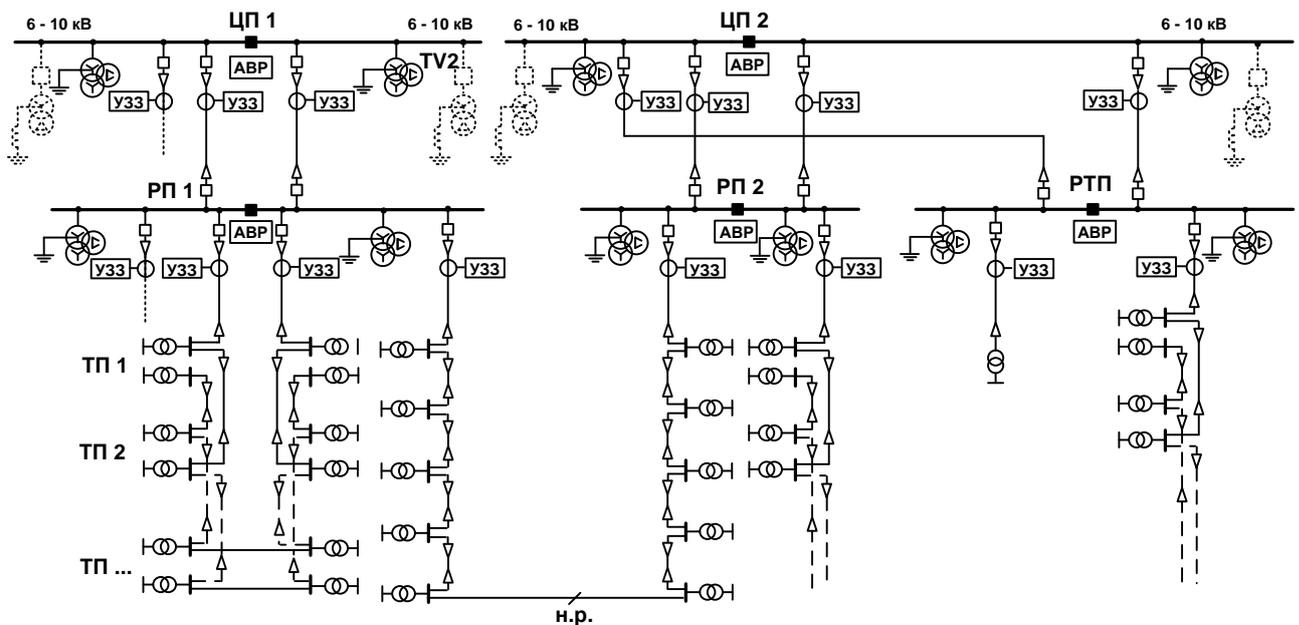


Рисунок 1.7 – Установка устройств защиты от ОЗЗ на объектах кабельной сети напряжением 6–10 кВ системы городского электроснабжения

Особенностью городских кабельных сетей является то, что, в отличие от ТП кабельных сетей промышленного электроснабжения, на ТП городских кабельных сетей установка стационарных устройств РЗА, в т.ч. УЗЗ, не предусматривается. Потому по показаниям УЗЗ, устанавливаемых на ЦП и РП (РТП), возможна локализация зоны ОЗЗ только на питающих КЛ, связывающих ЦП с РП, а также ЦП или РП с ТП, питаемыми по радиальной схеме. Для локализации кабельного участка с ОЗЗ между ТП магистральной КЛ (шлейфа) на ЦП и РП необходимы устройства ДОМЗЗ.

1.2.7 Обоснование подходов к решению задачи ДОМЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, в кабельных сетях 6–10 кВ. Изложенное выше (пп. 1.1.2 – 1.1.6) позволяет сделать следующие предварительные выводы.

Для решения задачи локализации зоны ОЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения в общем случае могут быть использованы два подхода:

- подход, основанный на использовании показаний устройств селективной защиты от ОЗЗ, установленных на объектах контролируемой кабельной сети;
- подход, основанный на использовании специальных устройств ДОМЗЗ, устанавливаемых на объектах сети.

В кабельных сетях систем электроснабжения промышленных предприятий применение первого подхода позволяет решить задачу локализации зоны ОЗЗ как на питающих, так и на распределительных КЛ при условии оснащения всех присоединений ЦП, РП (РТП) и ТП УЗЗ, обеспечивающими фиксацию всех разновидностей ОЗЗ, включая ДПОЗЗ и КрОЗЗ. В городских кабельных сетях применение первого подхода позволяет решить задачу только для питающих КЛ, связывающих ЦП и РП (РТП) и ЦП и РП (РТП) с ТП, получающими питание по радиальным схемам. Для этого на ЦП и РП (РТП) должны быть установлены УЗЗ, обеспечивающие фиксацию всех разновидностей ОЗЗ.

Однако в настоящее время возможности применения первого подхода в кабельных сетях 6–10 кВ систем как промышленного, так и городского электро-

снабжения ограничены техническим совершенством наиболее широко применяемых в настоящее время УЗЗ (ТЗНП или ТНЗНП в сетях с изолированной нейтралью и максимальные токовые защиты на основе высших гармоник тока $3I_0$ установившегося режима ОЗЗ в компенсированных сетях), не позволяющим обеспечить фиксацию КрОЗЗ и высокую устойчивость функционирования в переходных режимах при ДПОЗЗ.

Известно, что фиксацию всех разновидностей ОЗЗ, включая ДПОЗЗ и КрОЗЗ, т.е. решение 1-й из задач ОМЗЗ на кабельных линиях, находящихся под рабочим напряжением (таблица 1.1), позволяют осуществить только УЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю [10, 20, 154–176], а также комбинированные или комплексные многофункциональные УЗЗ, основанные на использовании электрических величин как установившегося, так и переходного режима ОЗЗ [например, 16, 20, 70, 167–169, 177–180]. Большой вклад в решение этой задачи внесли ЭНИН, ИГЭУ, ИЦ "Бреслер", НПП "Бреслер", ЮРГТУ (НПИ).

Однако применение первого подхода не позволяет решить задачу локализации зоны ОЗЗ на магистральных КЛ, питающих ТП, поэтому для решения данной задачи необходимо применение специальных устройств ДОМЗЗ, устанавливаемых на ЦП и РП (РТП) городских кабельных сетей. Очевидно также, что наиболее эффективное решение рассматриваемой задачи в городских кабельных сетях можно получить, применяя оба рассмотренных выше подхода. Такое решение технически наиболее просто реализовать в цифровых устройствах РЗА, выполненных на современной микропроцессорной базе, если функции селективной защиты от всех разновидностей ОЗЗ дополнить функцией ДОМЗЗ. В частности, такое решение предлагается использовать в разрабатываемой ООО НПП "ЭКРА" совместно с ИГЭУ комплексной многофункциональной защите от ОЗЗ в составе терминала РЗА для линий 6–35 кВ [20, 178–180]. Для повышения эффективности применения в городских кабельных сетях функцией ДОМЗЗ могут быть дополнены и другие известные исполнения комплексных многофункциональных устройств селективной защиты от ОЗЗ индивидуального исполнения, например,

микропроцессорное устройство типа ТОР-110-ИЗН, разработанное ИЦ "Бреслер" совместно с ЭНИН [72, 176, 177].

Необходимо, однако, учитывать, что полная замена всех установленных ранее на питающих объектах кабельных сетей (ЦП и РП) индивидуальных (на одно присоединение) устройств защиты от ОЗЗ на новые более совершенные индивидуальные устройства возможна не всегда. В таких случаях для решения задач селективной сигнализации всех разновидностей и решения задачи локализации места повреждения в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ систем городского электроснабжения более целесообразно использовать централизованные исполнения устройств, совмещающих функции селективной сигнализации ОЗЗ и ДОМЗЗ. Применение таких централизованных комбинированных устройств может оказаться эффективным и на ЦП и РП кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения, если установленные на них штатные индивидуальные устройства защиты от ОЗЗ не обеспечивают надежную фиксацию ДПОЗЗ и КрОЗЗ.

1.3 Сравнительный анализ известных способов дистанционного определения места замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

1.3.1 Основные требования к устройствам дистанционного определения места ОЗЗ на кабельных линиях, находящихся под рабочим напряжением. С учетом методики ОМП на кабельных линиях (таблица 1.1) и рассмотренных выше особенностей схем кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения устройства, предназначенные для локализации места ОЗЗ (устройства ДОМЗЗ), должны обеспечивать выполнение следующих основных требований:

1) устройства ДОМЗЗ должны быть предназначены для применения в кабельных сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, высокоомным заземлением нейтрали, с компенсацией емкостных токов;

2) устройства ДОМЗЗ должны обеспечивать определение места (зоны) повреждения на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, при всех разновидностях ОЗЗ (УОЗЗ, ДПОЗЗ, КрОЗЗ);

3) точность устройств ДОМЗЗ должна обеспечивать возможность локализации места повреждения для отключения его от сети без нарушения электроснабжения или технологий производства потребителей для проведения высоковольтных испытаний и мероприятий по точному ОМП на отключенной линии, а именно:

– на питающих КЛ кабельных сетей городского и промышленного электроснабжения – определение поврежденной линии;

– на магистральных КЛ городского электроснабжения – определение поврежденного участка между ТП ГРС;

4) устройства ДОМЗЗ должны обладать быстродействием, обеспечивающим определение места (зоны) повреждения на КЛ в режиме реального времени без дополнительных расчетов по расчетным программам или моделям контролируемой линии и сети;

5) для повышения надежности ДОМЗЗ желательно в одном устройстве (индивидуальном или централизованном) сочетание функций селективной сигнализации всех разновидностей ОЗЗ и ДОМЗЗ;

6) в целях упрощения для реализации комплекса функций "селективная защита от всех разновидностей ОЗЗ – ДОМЗЗ" целесообразно использовать одинаковые входные информационные величины (например, электрические величины переходного процесса, "наложенные токи" повышенной частоты и т.п.).

1.3.2 Классификация способов ДОМЗЗ на линиях, находящихся под напряжением, в электрических сетях среднего напряжения. Как уже отмечалось выше, проблемы с ОМЗЗ в электрических сетях среднего напряжения возникают только при работе последних с изолированной нейтралью, компенсацией емкостных токов ОЗЗ или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор, в которых значение установившегося тока ОЗЗ, как правило, на 1–2 порядка меньше тока нагрузки и практически не зависит от положения места ОЗЗ на повре-

жденной линии. Указанные особенности данного вида повреждений в электрических сетях среднего напряжения практически исключают возможность применения в них методов и средств ОМКЗ, используемых в сетях более высокого напряжения, работающих с глухозаземленной нейтралью. С учетом этого для решения данной задачи в электрических сетях среднего напряжения в основном применяются электрические величины не промышленной частоты.

Существующие методы ОМЗЗ на линиях, находящихся под рабочим напряжением, как и методы ОМКЗ, можно разделить на две основные группы – *топографические* и *дистанционные*.

Топографические методы ОМЗЗ подразумевают определение места повреждения непосредственно на трассе линии. Данная группа методов обеспечивает высокую точность, однако требует больших временных затрат на поиск места повреждения на трассе ЛЭП. Для уменьшения затрат времени место (зона) повреждения предварительно приближенно определяется с использованием дистанционных методов.

Дистанционные методы ОМП, в т.ч. и ОМЗЗ, принято делить на две основные группы [34, 37–39, 44, 58]: методы, основанные на контроле параметров электрических величин аварийного режима (*параметрические методы* или *методы ПАР*), и методы, основанные на контроле временных интервалов при распространении электромагнитных волн по линии электропередачи (*импульсные методы*). В последние годы были предложены также новые методы, основанные на использовании в устройствах РЗА имитационных моделей контролируемого объекта (ИМО). В [72, 181–183] предлагается делить модели контролируемых объектов, применяемых в устройствах РЗА, на две разновидности: собственно имитационные, воспроизводящие процессы, протекающие в реальном объекте, и алгоритмические (АМО), под которыми понимается преобразователь наблюдаемых величин, полученных на реальном объекте в месте установки устройства РЗА, в величины, прогнозируемые в каком-либо другом месте наблюдаемого объекта или электрической сети. Одним из вариантов применения АМО являются задачи ОМКЗ [181–183] или ОМЗЗ [72].

Таким образом, дистанционные методы ОМЗЗ можно разделить на 3 группы:

- методы ПАР;
- импульсные методы;
- методы, основанные на использовании алгоритмических моделей контролируемого объекта.

В зависимости от электрических величин, используемых для определения места (зоны) ОЗЗ, методы ПАР можно разделить на следующие группы:

- параметрические методы, основанные на использовании токов промышленной частоты 50 Гц;
- параметрические методы, основанные на использовании "наложенных" токов с частотой выше промышленной;
- параметрические методы, основанные на использовании электрических величин переходного процесса.

Импульсные методы принято делить на две группы:

- локационные методы;
- волновые методы.

Предлагаемая классификация методов ДОМЗЗ на ЛЭП, находящихся под рабочим напряжением, в электрических сетях среднего напряжения приведена на рисунке 1.8.

В зависимости от месторасположения устройств измерения электрических величин методы ПАР и импульсные методы делятся на одно- и двухсторонние. Односторонние методы ОМП позволяют определять расстояние до места повреждения без передачи информации с другого конца линии, что является их существенным преимуществом перед двусторонними методами. Основным недостатком этих методов является повышенная погрешность ОМП по сравнению с двусторонними методами.

В [72] также утверждается, что в настоящее время перспектива развития алгоритмов локации замыкания на землю в электрических сетях среднего напряжения связана с увеличением информационной базы, т.е. применением методов многостороннего замера. Однако такие методы актуальны в основном для воздушных сетей, ЛЭП которых имеют древовидную структуру.

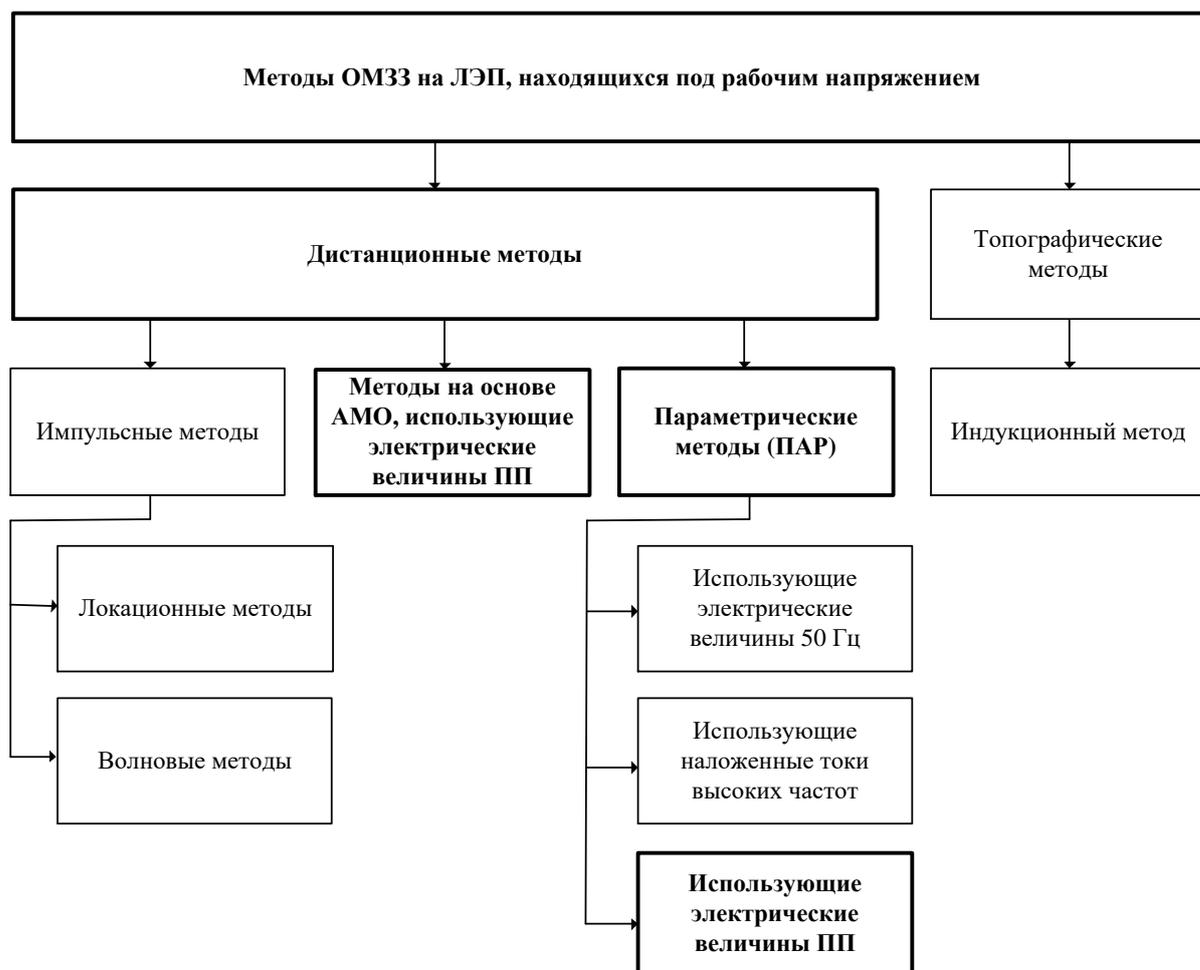


Рисунок 1.8 – Классификация методов ОМЗЗ на линиях, находящихся под рабочим напряжением

Методы двустороннего ДОМЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ практически можно применить только на питающих КЛ, связывающих ЦП и РП (РТП). На магистральных КЛ городских кабельных сетей возможности применения методов двустороннего замера ограничены отсутствием на ТП ГРС первичных измерительных преобразователей тока и напряжения для подключения устройств ДОМЗЗ и каналов связи между ТП и ЦП и РП для синхронизации измерений по концам контролируемой КЛ. С учетом этого приведенный ниже сравнительный анализ известных способов и исполнений устройств ДОМЗЗ дается только для методов, основанных на принципе одностороннего замера.

1.3.3 Топографические методы ДОМЗЗ. Из известных топографических методов (индукционный, акустический, потенциальный, электромеханический [110, 111, 113, 114]) для определения места ОЗЗ на ЛЭП, находящихся под рабо-

чим напряжением, практическое применение получил индукционный метод с использованием переносных приборов, основанных на измерении уровня или определения направления составляющих основной частоты 50 Гц или высших гармоник тока на различных участках поврежденной линии типа «Поиск-1», «Волна» и «Зонд» [112, 184]. Контроль тока $3I_0$ осуществляется путем измерения магнитного поля вблизи линии с помощью встроенных в переносный прибор магнитных датчиков. Контроль напряжения сети осуществляется путем измерения электрического поля линии с помощью штыревой антенны. Наиболее широкое применение получили приборы, использующие предложенный Союзтехэнерго способ определения места ОЗЗ путем измерения и сравнения уровней высших гармонических составляющих тока $3I_0$ на различных участках сети. Применение приборов, использующих составляющие основной частоты 50 Гц, встречает трудности из-за влияния магнитного поля токов нагрузки, напряженность которого сравнима с напряженностью магнитного поля тока замыкания на землю.

Указанные выше приборы на основе индукционного метода предназначены для применения только на ВЛ 6–35 кВ и не могут использоваться на силовых токопроводных коммуникациях закрытого исполнения, находящихся под рабочим напряжением. Недостатком метода является также невозможность его использования при дуговых прерывистых ОЗЗ.

1.3.4 Локационные методы ДОМЗЗ. Локационные методы [44, 45, 58, 60–62, 64, 65, 185] основаны на измерении интервала времени между моментом посылки зондирующего электрического импульса, как правило, прямоугольной формы, и моментом прихода к началу линии отраженного от места повреждения импульса. При локационном импульсном методе длительность импульсов, посылаемых в линию меньше, чем время прохождения импульсом возможного расстояния между неоднородностями линии. При локационном волновом методе длительность импульсов, посылаемых в линию, равна или превышает время прохождения импульсом возможного расстояния между неоднородностями линии.

Послав в линию импульс, измеряют интервал t_d – время двойного пробега этого импульса до места повреждения. Искомое расстояние до места повреждения определяется по выражению:

$$l = \frac{t_d}{2} v, \quad (1.3)$$

где v – скорость распространения импульса в линии.

В [44, 45, 185] показано, что разрешающую способность методов импульсного зондирования ЛЭП можно существенно повысить, используя для зондирования не простые, а сложные сигналы с внутримпульсной фазовой или частотной манипуляцией.

Хотя метод локационной импульсной рефлектометрии получил достаточно широкое применение в целях ОМКЗ на ЛЭП высокого напряжения, находящихся под напряжением, его применение для аналогичной задачи при всех разновидностях ОЗЗ на КЛ 6-10 кВ невозможно по следующим причинам:

1 Для решения задачи ОМП на линиях, находящихся под рабочим напряжением, локационные измерения должны осуществляться автоматически в момент возникновения повреждения. Для автоматического запуска локационных искателей, предназначенных для определения места КЗ, используется пуск от УРЗ, а фиксация искомого расстояния осуществляется за время, не превышающее 0,1 с. Такое время фиксации приемлемо для решения задачи определения места КЗ или УОЗЗ. При дуговых прерывистых ОЗЗ или КрОЗЗ измерения расстояния должны осуществляться в период горения дуги, который в кабельных сетях 6–10 кВ в начальной стадии развития повреждения может составлять единицы или даже доли миллисекунд. Поэтому запуск рефлектометра для фиксации места ОЗЗ при КрОЗЗ и ДПОЗЗ должен также осуществляться за десятые доли миллисекунды. Возврат рефлектометра в исходное состояние должен происходить автоматически после гашения заземляющей дуги при каждом повторном пробое изоляции. В соответствии с теориями ДПОЗЗ W. Petersen и Peters I.E., Slepian J. [17, 18] минимальные интервалы времени между повторными пробоями изоляции равны поло-

вине полупериода промышленной частоты $T_{50}/2 = 10$ мс. По мере увеличения объема повреждения и разогрева МПИ в месте ОЗЗ напряжения повторного зажигания заземляющей дуги уменьшаются и становятся возможными несколько пробоев изоляции за $T_{50}/2$ [например, 186]. Учитывая указанные особенности дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, применение в них автоматического локационного метода ДОМЗЗ требует применения быстродействующих пусковых органов, обеспечивающих быстрый пуск и возврат рефлектометра при обеспечении отстройки от помех и других режимов, не связанных с ОЗЗ, что представляет сложную техническую задачу.

2 При автоматической локации повреждений на ЛЭП, находящихся под рабочим напряжением, в качестве зондирующих используются низковольтные (с амплитудой до 1,5 В) импульсы с крутым фронтом. При характерной для кабельных сетей городского и промышленного электроснабжения конфигурации распространяющийся по КЛ зондирующий сигнал сильно искажается из-за многократных отражений от неповрежденных линий и мест (узлов) ветвления, накладывающихся на полезный сигнал, что при низком уровне зондирующего сигнала делает определение временного интервала времени пробега импульса до места ОЗЗ крайне затруднительным, а порой невозможным.

3 К линии, находящейся под напряжением, автоматический локационный искатель должен подсоединяться с помощью специального защитного фильтра, в качестве которого на ВЛ обычно используется фильтр присоединения ВЧ-обработки линии. На кабельных ЛЭП такое подключение невозможно, что создает дополнительные технические трудности для применения в кабельных сетях метода автоматической локации места ОЗЗ.

4 С учетом пп. 1–3 аппаратная реализация данного метода для дистанционного ОМЗЗ технически сложна и экономически вряд ли обоснована.

1.3.5 Волновые методы ДОМЗЗ. Волновой метод двусторонних измерений [64–66] основан на измерении времени между моментами достижения концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте пробоя изоляции

фазы линии на землю. При возникновении пробоя изоляции фазы на землю в некоторой точке линии общей длиной l_n , напряжение U в месте ОЗЗ резко снижается (при отсутствии переходного сопротивления в месте повреждения до нуля). В месте повреждения возникают электромагнитные волны напряжением $-U$, распространяющиеся в обе стороны со скоростью v . По истечении некоторого времени t_1 фронт одной из волн достигает одного конца линии, спустя интервал времени t_2 фронт второй волны достигает другого конца линии:

$$t_1 = \frac{l_1}{v}; \quad (1.4)$$

$$t_2 = \frac{l_n - l_1}{v}, \quad (1.5)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны в линии; l_n – общая длина линии; l_1 – расстояние от одного конца линии до места повреждения.

Из (1.4) и (1.5) при известных l_n и v получим

$$l_1 = \frac{l_n + (t_2 - t_1)v}{2}. \quad (1.6)$$

Основной проблемой, создающей сложности в применении данного метода, является синхронизация измерений по концам линии. В кабельных сетях 6-10 кВ волновой метод двусторонних измерений практически можно применить только для определения места ОЗЗ на питающих КЛ, что требует установки достаточно сложных устройств не только на ЦП, но также и на РП и ТП и организации между объектами кабельной сети каналов связи для синхронизации измерений по концам контролируемой КЛ. На магистральных КЛ городских кабельных сетей применить данный метод вообще невозможно, т.к. ТП ГРС не оснащаются ТНКИ, между ТП нет каналов связи, а на кабельных участках между ТП не предусмотрена установка фазных ТТ или ТТНП, т.е. отсутствуют технические возможности для контроля волн тока и напряжения, распространяющихся от места повреждения.

В [185, 187, 188] предложены волновые способы ДОМЗЗ для ЛЭП с ответвлениями (разветвленной ЛЭП). Для этого в начале и в конце каждого ответвления линии одновременно регистрируют время прохождения скачка фазного

напряжения в единой шкале времени, синхронизированной от спутниковых сигналов глобальной системы позиционирования. Для зафиксированных времен от каждой пары устройств контроля тока и напряжения разностно-дальномерным способом определяют поврежденное ответвление линии. Однако в кабельных сетях 6–10 кВ прежде всего, городских, по указанным выше причинам применение таких методов невозможно.

Волновой метод односторонних измерений используется как на включенных в сеть, так и на отключенных линиях [64–66]. Различают две разновидности данного метода.

Первая разновидность предполагает измерение времени между моментом прихода к началу линии фронта волны, возникшей в месте повреждения, например, на расстоянии l от начала линии, и моментом вторичного прихода фронта волны после двух отражений (в начале линии и месте повреждения). Указанный интервал определяется как $\Delta t = 2l/v$, откуда искомое расстояние $l = (\Delta t/2) \cdot v$. Для отключенных линий этот метод называется методом колебательного разряда. Использование этой разновидности волнового метода односторонних измерений на кабельных линиях, имеющих значительные неоднородности волнового сопротивления по длине линии, вызванные соединением кабелей различных типов и сечений, а также соединительными муфтами. Такие неоднородности, характерные прежде всего для магистральных КЛ ГРС, вызывают дополнительные отражения электромагнитных волн, что приводит к ложным измерениям. Для радиальных питающих сетей, когда от шин ЦП или РП отходит много линий, также имеют место многократные отражения от неповрежденных линий, накладывающиеся на полезный сигнал и искажающие его, что делает применение данного метода практически невозможным.

Вторая разновидность одностороннего волнового метода, основанная на использовании временных различий распространения волн в каналах «фаза-фаза» и «фаза-земля», фиксируемых в точках контроля, предложена в Китае и используется в основном для дальних передач постоянного тока [189]. При малых длинах КЛ и их участков в кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного и городского

электроснабжения (в среднем сотни метров, см. табл. 1.1 и 1.2) указанные временные различия достижения точек контроля электромагнитными волнами в каналах «фаза-фаза» и «фаза-земля» составят сотые доли микросекунды, что технически невозможно зафиксировать.

1.3.5 Методы ДОМЗЗ, основанные на контроле параметров электрических величин промышленной частоты. Методы основаны на кратковременном увеличении после возникновения ОЗЗ тока в месте повреждения и в поврежденной линии посредством кратковременного заземления нейтрали или неповрежденной фазы сети через токоограничивающее сопротивление или увеличения тока ДГР [например, 190–194]. При достаточной величине искусственно создаваемого дополнительного тока промышленной частоты метод позволяет использовать для выполнения устройств ОМЗЗ способы, используемые в целях ОМКЗ. Недостатком методов является необходимость хотя бы кратковременного увеличения тока в месте повреждения. Эти методы не позволяют также определить место КрОЗЗ.

Хотя указанные методы в СССР были достаточно подробно исследованы еще в конце 80-х годов, практического применения ни в кабельных, ни в воздушных сетях среднего напряжения они не получили.

1.3.6 Методы ДОМЗЗ, основанные на контроле параметров "наложенных" токов не промышленной частоты. Для реализации данной группы методов при возникновении ОЗЗ в контур нулевой последовательности сети автоматически включается специальный источник "наложенного" тока. Например, в [195] предложен способ определения расстояния до места ОЗЗ, основанный на подаче после возникновения ОЗЗ в контролируемой сети на шины распределительного устройства, питающего линии электропередачи, высокочастотного напряжения, измерении высокочастотного фазного напряжения и фазного тока и определении по их значениям и характеристикам линии электропередачи расстояния до места повреждения.

При использовании данных методов для повышения точности замера расстояния до места ОЗЗ требуется источник повышенной частоты, при которой сопро-

тивление поврежденной КЛ будет иметь индуктивный характер и напряжение в точке контроля (на шинах ЦП или РП) будет значение, достаточное для обеспечения требуемой точности измерений. Практически это будет иметь место при частотах наложенного тока до нескольких килогерц. При таких частотах "наложенного" тока для отстройки от влияния на замер высших гармоник в токе УОЗЗ величина накладываемого тока должна существенно превышать максимальный уровень гармоник в токе ОЗЗ. В [20, 196] показано, что максимальный уровень высших гармоник в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ может достигать значений до 65% от $I_{C\Sigma}$. По данным [197], полученным на основе измерений в реальных кабельных сетях 6–10 кВ, максимальный уровень высших гармоник в токе ОЗЗ может достигать значений 35–40% и более. При указанных уровнях высших гармоник в токе УОЗЗ для отстройки от их влияния на замер расстояния до места повреждения может потребоваться достаточно мощный источник "наложенного" тока повышенной частоты, что является недостатком данного метода, ограничивающим возможности его применения. Недостатками метода являются также возможное значительное увеличение тока в месте повреждения, необходимость в разработке схемы его подключения к контуру нулевой последовательности контролируемой сети, зависимости требуемой мощности от параметров сети, невозможность фиксации КрОЗЗ и устойчивого замера при ДПОЗЗ. Метод не получил практического применения в России.

1.3.7 Методы ДОМЗЗ, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса. В [198] предложен метод, основанный на определении максимума производной переходного напряжения поврежденной фазы $u(t)$, подробно рассматриваемый также в [27–30, 199, 200].

Для упрощения определения значения максимума производной напряжения на поврежденной фазе в начальный момент замыкания, полученная по результатам измерений зависимость $u(t)$ аппроксимируется полиномом второй степени, дифференцируя который можно найти значение максимума производной в начале участка аппроксимации (рисунок 1.9).

Для всех точек сети характерна своя скорость изменения напряжения на поврежденной фазе, поэтому для всех присоединений в конкретной схеме с учетом ее топологии и параметров линий предварительно определяются с помощью любого способа моделирования (математической или физической ИМО) расчетные зависимости нормированных максимальных значений производных от расстояния до места ОЗЗ для момента пробоя в максимуме напряжения ($\varphi = 90^\circ$).

Начальное напряжение на поврежденной фазе зависит от фазы пробоя φ , поэтому измеренные значения $u(t)$ предварительно нормируются по отношению к напряжению в момент, предшествующий пробую, $u(0) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$.

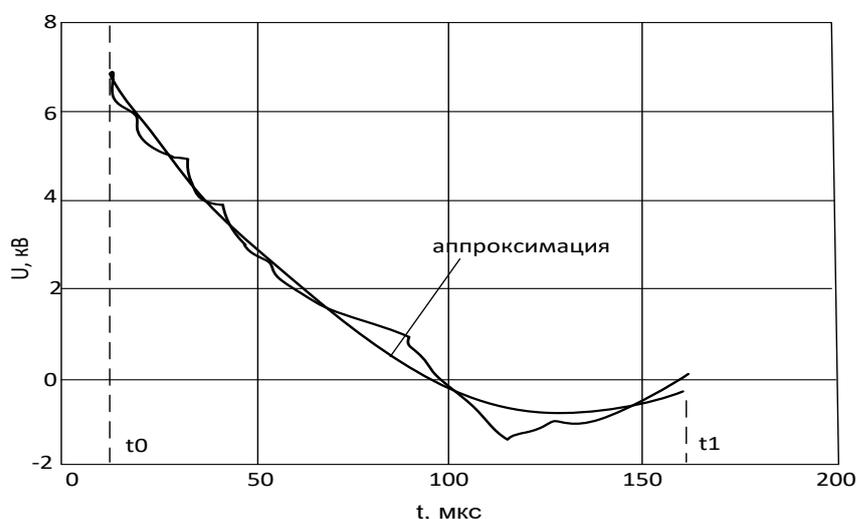


Рисунок 1.9 – Оциллограммы напряжения поврежденной фазы в начальный момент времени и аппроксимирующая ее кривая [199]

По значению максимума производной, полученного на основе реально зарегистрированного переходного напряжения, с использованием заранее полученных расчетных зависимостей определяется расстояние до места замыкания на конкретной линии в контролируемой сети.

ОЗЗ в кабельных сетях включая УОЗЗ, возникают, как правило, вследствие пробоя изоляции, который сопровождается переходным процессом. Поэтому рассмотренный метод может быть использован для определения места повреждения при всех разновидностях ОЗЗ: УОЗЗ, КрОЗЗ и ДПОЗЗ.

Недостатком метода является необходимость предварительного расчета для каждой линии контролируемой сети зависимости нормированного максимального

значения производной напряжения поврежденной фазы от расстояния до места ОЗЗ, что практически возможно в кабельных сетях с простой конфигурацией и неизменным режимом работы. В реальных сложных кабельных сетях 6–10 кВ городского и промышленного электроснабжения, при возможных в процессе эксплуатации отключениях питающих РП и ТП, конфигурация и параметры (например, суммарный емкостный ток $I_{C\Sigma}$) контролируемой сети и отдельных линий могут изменяться, что приводит к изменениям параметров переходных токов и напряжений. К изменениям параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ могут приводить также изменения внутреннего сопротивления источника питания при изменении режимов работы питающей системы или регулировании коэффициента трансформации трансформаторов ГПП с РПН. Все указанные изменения требуют корректировок имитационной модели (ИМО) контролируемой сети в соответствии с ее текущим состоянием и проведения новых расчетов. Поэтому быстрое действие рассматриваемого метода ДОМЗЗ, необходимое прежде всего при наиболее опасных для сети ДПОЗЗ, ограничено.

Известно [например, 10, 157, 158], что в переходном токе и напряжении поврежденной фазы при ОЗЗ содержатся две основные частотные составляющие: разрядная и зарядная (подзарядная), связанные соответственно с разрядом емкости поврежденной фазы и подзарядом емкостей неповрежденных фаз. От удаленности до места ОЗЗ в основном зависит частота и амплитуда разрядной составляющей. Частота и амплитуда зарядной составляющей в основном определяется индуктивностью источника питания. Поэтому существенное влияние на точность замера расстояния до места повреждения в кабельных сетях с различными параметрами будет оказывать рабочий частотный диапазон устройств ДОМЗЗ, не отраженный в работах [27–30, 199, 200]. Максимальное значение производной напряжения на поврежденной фазе существенно зависит от постоянных затухания разрядной и зарядной составляющих переходных токов, зависящие от активных потерь в контуре нулевой последовательности. Учесть в ИМО указанные потери достаточно точно с учетом переходного сопротивления в месте повреждения, зависимостей активных сопротивлений КЛ от частоты переходных токов и других

факторов, особенно при удаленных от шин ЦП ОЗЗ, практически трудно, что ограничивает точность и возможности применения данного метода.

В [63] предложен метод, основанный на использовании соотношений тока и напряжения переходного процесса для поврежденной фазы линии с ОЗЗ. Конечное выражение, полученное из схемы замещения (рисунок 1.10), для определения расстояния до места замыкания имеет вид:

$$l_k = \frac{1}{L_0} \cdot \frac{u - i \frac{U}{I_{m1}} \cdot \ln \frac{I_{m1}}{I_{m2}}}{\frac{di}{dt}}, \quad (1.7)$$

где L_0 – погонная индуктивность линии, Гн; u – мгновенное значение напряжения на поврежденной фазе, В; i – мгновенное значение тока в поврежденной фазе линии с ОЗЗ в момент повреждения, А; I_{m1} , I_{m2} – следующие друг за другом амплитудные значения переходного тока, А; U – напряжение на нейтрали, В.

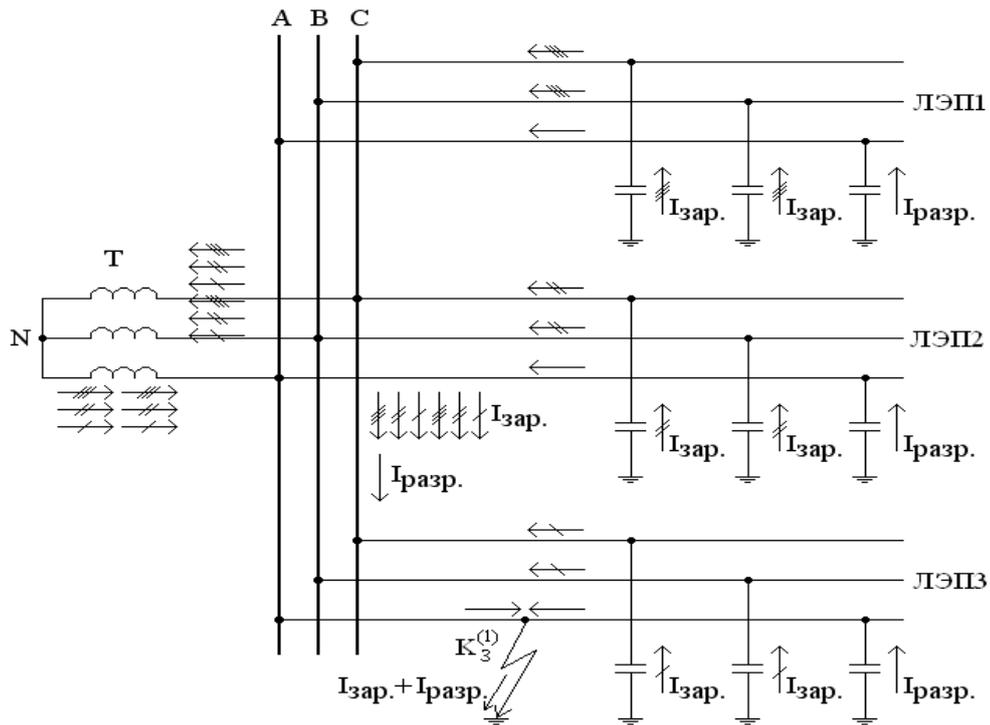


Рисунок 1.10 – Схема электрической сети при ОЗЗ, используемая в [57]

Из рисунка 1.10 можно видеть, что для обоснования расчетной формулы (1.7) в [63] используется весьма упрощенное представление о переходных процессах при ОЗЗ. Расчетное выражение получено в предположении, что свободные со-

ставляющие переходного тока при ОЗЗ (разрядная и зарядная) имеют колебательный характер. Однако в реальных сетях в зависимости от удаленности места пробоя изоляции от шин и величины переходного сопротивления в месте повреждения как разрядная, так и зарядная составляющая переходного тока могут иметь апериодический характер, при котором формула (1.7) использоваться не может [например, 10].

Схема замещения по рисунку 1.10 и выражение (1.7) не учитывают, что соотношение между током и напряжением переходного процесса для поврежденной фазы линии зависит как от индуктивности прямой, так и нулевой последовательности поврежденной линии.

В работе [63] не исследуется также влияние переходного сопротивления в месте повреждения и активных сопротивлений линий сети на точность замера расстояния до места замыкания на землю, отсутствуют рекомендации по определению расчетных значений погонной индуктивности линий L_0 с учетом влияния частоты переходного тока и др. Поэтому оценки погрешностей данного метода, приведенные в работе [63], – порядка единиц процентов – представляются необоснованными.

В [67, 201] предложен метод, основанный на оценке длительности переднего фронта переходного тока при ОЗЗ. Метод обоснован результатами натуральных экспериментов, проведенных в реальной воздушной сети напряжением 10 кВ, работающей с резистивным высокоомным заземлением нейтрал. В качестве наиболее информационного параметра, характеризующего удаленность места ОЗЗ, принято значение T_ϕ – время, пропорциональное длительности фронта переходной кривой тока через заземляющий высокоомный резистор I_{RE} , определяемое от начала переходного процесса до достижения первого максимального значения (рисунок 1.11).

По результатам обработки осциллограмм была получена зависимость $T_\phi = f(L_{33})$ (рисунок 1.12), которая используется эксплуатационным персоналом для определения расстояния до места ОЗЗ на обслуживаемой ВЛ.

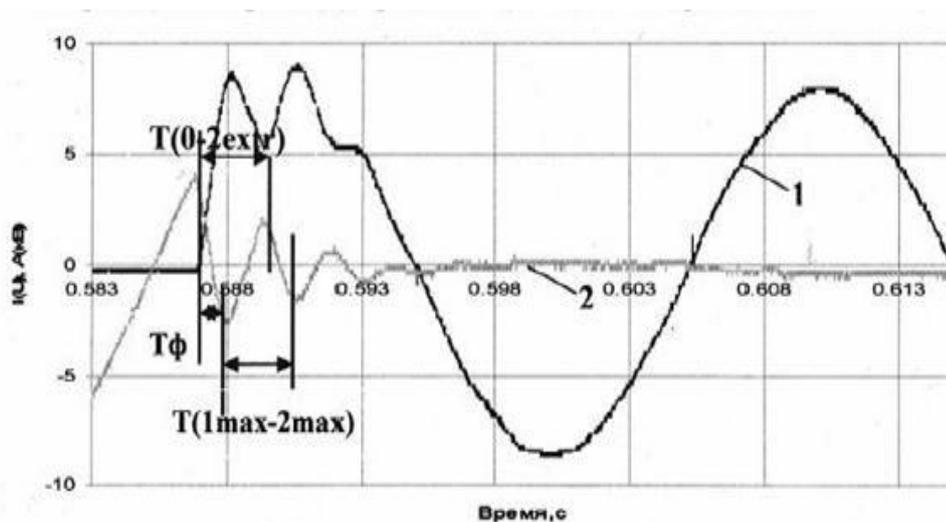


Рисунок 1.11 – Экспериментальные кривые тока через резистор (1) и напряжения поврежденной фазы (2) переходного процесса при ОЗЗ на 44 км трассы ВЛ 10 кВ [201]

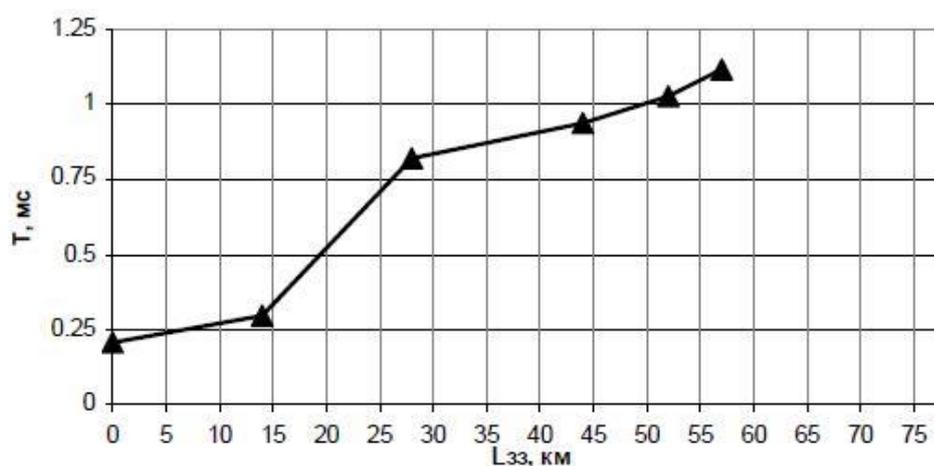


Рисунок 1.12 – Кривая $T_{\phi} = f(L_{33})$, построенная по результатам обработки осциллограмм токов I_R [201]

В [201] предлагается проведением на компьютере моделирования переходных процессов ОЗЗ в исследуемой сети выявить зависимости параметра T_{ϕ} от таких факторов как режим работы сети, переходное сопротивление в месте замыкания и другие. Применение данного метода, как и рассмотренного ранее метода, основанного на определении максимума производной переходного напряжения поврежденной фазы $u(t)$ [27–30, 198–200], требует создания ИМО контролируемой сети и расчетов с ее использованием.

Предложенный в [201] метод ориентирован на применение в воздушных сетях. Возможности применения метода в кабельных сетях 6–10 кВ ограничены

прежде всего тем, что разрядные составляющие переходного тока ОЗЗ в последних имеют значительно более высокие частоты, чем в воздушных сетях (от единиц до нескольких десятков килогерц [16, 26], что может существенно повлиять на точность замера значения T_{ϕ} . Недостатком метода также является то, что на значение T_{ϕ} существенное влияние будет оказывать значение суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ и переходного сопротивления в месте повреждения.

В [202] предложен способ определения места повреждения при ОЗЗ по параметрам переходного процесса. Сущность способа состоит в том, что измеряют максимальную амплитуду тока нулевой последовательности $I_{0 \max}$ на поврежденной линии после возникновения однофазного замыкания на землю, измеряют мгновенного напряжения U_c на поврежденной фазе в момент возникновения однофазного замыкания на землю. Определяют суммарную емкость C_0 нулевой последовательности всех линий, подключенных к шинам, погонное индуктивное сопротивление $L_{\text{погонное}}$ нулевой последовательности линии электропередачи, на которой возникло однофазное замыкание на землю, и в соответствии с выражением $D = U_{c2} * C_0 / (I_{0 \max}^2 * L_{\text{погонное}})$ вычисляют дальность (расстояние) до однофазного замыкания на землю. Недостатком данного способа является то, что расчетная величина расстояния до места замыкания зависит от значения суммарной емкости сети, которая может меняться в зависимости от режима работы сети, а также от переходного сопротивления в месте повреждения. В расчетной схеме замещения [202] и, соответственно, приведенном выше выражении для определения величины D не учитывается различие погонной индуктивности линии для составляющих нулевой и прямой последовательности, что может привести к значительным погрешностям в определении места ОЗЗ.

1.3.8 Методы ДОМЗЗ, основанные на использовании алгоритмических моделей контролируемого объекта. В рассмотренных выше методах ДОМЗЗ, основанных на использовании параметров электрических величин переходного процесса [27–30, 198–201], зафиксированный параметр переходного процесса

(начальное значение производной напряжения переходного процесса, момент времени, соответствующий максимуму переходного тока и др.) сравнивается с расчетным параметром, полученным заранее для каждого присоединения или после фиксации ОЗЗ с аналогичным параметром, полученным моделированием с использованием полной имитационной модели контролируемого объекта (ИМО), включающей как модель ЛЭП с повреждением, так и модель неповрежденной части сети. Такой подход, как было показано выше, не позволяет получить оценку расстояния до зоны повреждения в режиме реального времени.

Наиболее общий способ определения места повреждения основан на применении модели контролируемого объекта [203, 204], называемой в [72, 181–183] алгоритмической (АМО), под которой, как уже отмечалось выше, понимается преобразователь наблюдаемых величин, полученных на реальном объекте в месте установки устройства РЗА, в величины, прогнозируемые в каком-либо другом месте наблюдаемого объекта или электрической сети. Способ разработан для высоковольтных сетей и оперирует токами и напряжениями установившегося режима КЗ. Это обстоятельство препятствует его применению в распределительных сетях среднего напряжения с малыми токами ОЗЗ.

Для решения задачи ДОМЗЗ в электрических сетях с малыми токами ОЗЗ при применении АМО могут быть использованы только электрические величины переходного процесса при замыканиях на землю. Особенности применения метода АМО для целей ДОМЗЗ рассматриваются в [72].

На рисунке 1.13 А – имитационная модель неповрежденной части сети, $\Pi_{\text{ИМ}}$ – имитационная модель поврежденной ЛЭП, $\Pi_{\text{АМ}}$ – алгоритмическая модель поврежденной ЛЭП.

Метод ОМП и, в частности, ОМЗЗ, основанный на применении АМО, представляет собой локацию повреждения как поиск минимума целевой функции (функции невязки) [72].

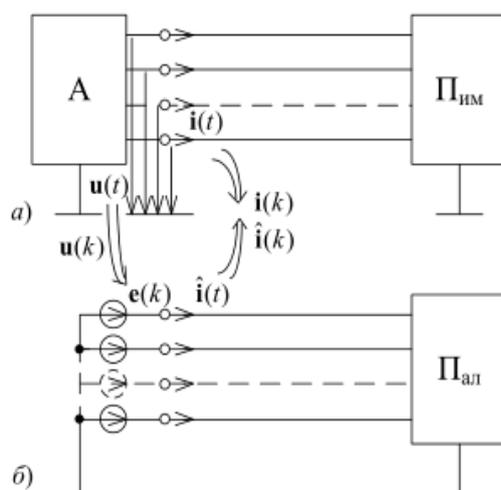


Рисунок 1.13 – Имитационная и алгоритмическая модели радиальной ЛЭП с одним источником питания: а – ИМО; б – АМО

В модель поврежденной ЛЭП Π_{AM} входят неизвестные аварийные параметры l_3 – расстояние до места предполагаемого ОЗЗ и R_{Π} – переходное сопротивление в месте предполагаемого замыкания. В момент времени t_0 моделируется возникновение ОЗЗ в АМО и определяется реакция модели в виде токов (например, тока поврежденной фазы, тока нулевой последовательности и др.), которые далее используются при построении функции невязки – зависимости невязки от аварийных параметров модели l_3 и R_{Π} .

Алгоритм поиска места ОЗЗ с использованием АМО в общем случае следующий (рисунок 1.13):

1. Регистрация значений наблюдаемых сигналов – токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$.
2. Расчет реакции модели $\hat{i}(t)$ с заданными аварийными параметрами l_3 и R_{Π} на воздействие функции $e(t)$.
3. Вычисление невязки сигналов $i(t)$ и $\hat{i}(t)$ при заданных аварийных параметрах.

Операции по пп. 1–3 повторяются до получения значений l_3 и R_{Π} , соответствующих минимуму невязки.

Вместо вычисления невязки наблюдаемых и модельных сигналов могут быть использованы и другие критерии повреждения, которые исходят из принципа

резистивности замыкания [72]. По характеру изменения мгновенной мощности делается вывод о наличии повреждения в проверяемом месте – при совпадении координаты l_3 модели и истинного места ОЗЗ мгновенная мощность ветви ОЗЗ положительна и не меняет знак.

Способ ДОМЗЗ, основанный на применении АМО и принципа резистивности повреждения при ОЗЗ предложен в [205].

Согласно способу [205] составляют модели двух частей фидера, первой – от места наблюдения до места предполагаемого ОЗЗ и второй – от места предполагаемого замыкания до конца фидера, первую часть фидера моделируют по прямой и по нулевой последовательности, а вторую – только по нулевой последовательности, преобразуют в модели прямой последовательности безнулевые составляющие зафиксированных тока и напряжения поврежденной фазы в безнулевую составляющую напряжения поврежденной фазы в месте предполагаемого замыкания, преобразуют в модели нулевой последовательности первой части фидера нулевые составляющие зафиксированных токов и напряжений в напряжение нулевой последовательности в месте предполагаемого замыкания и в ток нулевой последовательности до этого места, суммируют два упомянутых напряжения, формируя напряжение поврежденной фазы в месте предполагаемого замыкания. Подают напряжение нулевой последовательности в месте предполагаемого замыкания на вход модели нулевой последовательности второй части фидера и фиксируют ток на ее входе, который вычитают из тока нулевой последовательности до этого места, формируя ток предполагаемого замыкания, перемножают напряжение и ток в месте предполагаемого замыкания, формируя сигнал мгновенной мощности предполагаемого места замыкания, определяют знак этого сигнала и фиксируют реальное замыкание в том месте, где упомянутый сигнал в процессе своего изменения остается неотрицательным.

Из приведенного описания способа, предложенного в [205], можно видеть, что для определения места ОЗЗ с использованием АМО требуется иметь вектор наблюдений не только фазных напряжений, но и фазных токов (зарегистрированные значения токов и напряжений при ОЗЗ). В кабельных сетях

6–10 кВ релейная защита от междуфазных КЗ, как правило, выполняется в двухфазном исполнении, поэтому установка фазных ТТ в средней фазе на КЛ не предусматривается. Кроме того, измеренные в начале КЛ фазные токи не содержат собственного емкостного тока защищаемого присоединения, что при достаточно больших значениях последнего приведет к значительным погрешностям определения места ОЗЗ. Поэтому применение в кабельных сетях 6–10 кВ методов ДОМЗЗ, основанных на использовании АМО защищаемой ЛЭП, практически возможно, если применяемые модели линии не требуют измерения фазных токов.

1.4 Общая оценка методов дистанционного определения зоны замыкания на землю на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением. Обоснование и задач исследования

1.4.1 Общая оценка методов ДОМЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением. Сравнение основных свойств рассмотренных методов ОМЗЗ на ЛЭП, находящихся под рабочим напряжением, дано в таблице 1.4. Из приведенного выше аналитического обзора и данных таблицы 1.4 следует, что возможности эффективного применения для решения задачи ДОМЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, в распределительных сетях 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения топографических и импульсных методов, а также методов ПАР, основанных на использовании установившихся токов ОЗЗ промышленной частоты или "наложенных" токов повышенной частоты, ограничены рядом их недостатков, а именно:

– топографические методы (в частности, индукционный) не могут обеспечить требуемого быстродействия при наиболее опасных для сети и поврежденного элемента ДПОЗЗ и не могут быть использованы для определения зоны повреждения при КрОЗЗ

Таблица 1.4 – Сравнение методов ОМЗЗ на КЛ под рабочим напряжением

Методы ОМЗЗ	Возможность применения при всех режимах нейтрали	Необходимость в увеличении тока в месте ОЗЗ	Необходимость в специальном источнике (генераторе)	Возможность определения места КрОЗЗ	Возможность определения места ДПОЗЗ	Измеряемые электрические величины (ЭВ)	Возможность автоматизированных измерений	Возможность обеспечения быстрого действия (online режим)
1 Топографические методы								
1.1 Индукционный	X	-	X	-	-	ЭВ 50 Гц или ВГ	-	-
2 Методы ПАР								
2.1 Методы на основе контроля составляющих 50 Гц	X	X	-	-	-	ЭВ 50 Гц	X	-
2.2 Методы на основе контроля наложенных токов повышенных частот (ПЧ)	X	-	X	-	X	ЭВ повышенной частоты (ПЧ)	X	-
2.3 Методы на основе контроля величин переходных процессов	X	-	-	X	X	ЭВ переходного процесса (ПП)	X	X
3 Импульсные методы								
3.1 Локационные методы	X	-	X	-	-	ЭВ, создаваемые зондирующим импульсом	-	-
3.2 Волновые методы	X	-	-	X	X	ЭВ ПП	-	-
4 Методы на основе АМО	X	-	-	X	X	ЭВ 50 Гц или ПП	X	X

– применение импульсных локационных методов для определения зоны повреждения при всех разновидностях ОЗЗ, включая дуговые прерывистые ОЗЗ и КрОЗЗ, возможно только при автоматическом запуске и возврате импульсных локационных искателей при каждом повторном пробое изоляции в пределах каждые 10 мс (при ДПОЗЗ, развивающихся в соответствии с теорией W. Petersen), что представляет сложную техническую задачу; дополнительные ограничения связаны также с характерной для кабельных сетей городского и промышленного электропитания конфигурацией, обуславливающей сильные искажения распространяющегося по КЛ, находящейся под рабочим напряжением, зондирующего низковольтного сигнала, что делает определение временного интервала пробега импульса до места ОЗЗ крайне затруднительным или вообще невозможным;

– волновые импульсные методы двусторонних измерений нельзя применить для магистральных КЛ городских кабельных сетей из-за отсутствия на ТП ГРС технических возможностей (ТТ, ТТНП, ТНКИ, каналов связи для синхронизации измерений) подключения устройств ДОМЗЗ;

– возможности использования на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, волнового метода односторонних измерений в кабельных сетях сложной конфигурации ограничены многократными отражениями от неповрежденных линий и других неоднородностей (участки питающих и магистральных КЛ, выполненные кабелями различного сечения, соединительные муфты и др.), накладывающимися на полезный сигнал и искажающими его, что делает применение метода практически невозможным.

С учетом изложенного можно сделать предварительный вывод, что наиболее перспективными для решения задачи ДОМЗЗ представляются методы, основанные на односторонних измерениях параметров электрических величин переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции фазы КЛ на землю (методы ПАР), а также методы на основе АМО, использующие сравнение наблюдаемых электрических величин переходного процесса и электрических величин переходного процесса, полученных с использованием АМО.

1.4.2 Общая оценка методов ДОМЗЗ, основанных на контроле параметров переходных процессов при замыканиях на землю. Из приведенного в 1.3. аналитического обзора можно сделать выводы, что для известных способов и исполнений устройств ДОМЗЗ, основанных на использовании методов ПАР с контролем параметров электрических величин переходного процесса, в аспекте их применения на КЛ распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, характерны следующие основные недостатки:

1) зависимость параметров электрических величин переходного процесса и, соответственно, точности ДОМЗЗ от величины суммарного емкостного тока $I_{C\Sigma}$, который в распределительных кабельных сетях систем городского и промышленного электроснабжения может существенно изменяться в зависимости от режимов работы сети;

2) зависимость параметров электрических величин переходного процесса точности ДОМЗЗ от активных потерь в контуре нулевой последовательности поврежденной линии и, в частности, от переходного сопротивления в месте повреждения.

Следует отметить также, что в известных работах, посвященных вопросам разработки и применения методов ПАР для решения задачи ДОМЗЗ [например, 28, 29], не рассматриваются вопросы влияния на точность определения места (зоны) повреждения погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения, к которым подключаются устройства ДОМЗЗ, в переходных режимах ОЗЗ, погрешностей определения расчетных параметров КЛ, прежде всего, для составляющих нулевой последовательности, зависимости параметров КЛ от частоты и других факторов.

Поэтому возможность применения параметров электрических величин переходного процесса для решения рассматриваемой задачи связано с необходимостью разработки методов, эффективность которых не зависит от величины суммарного емкостного тока $I_{C\Sigma}$ контролируемой сети, активных потерь в контуре нулевой последовательности поврежденной линии, в частности, переходного сопротивления в месте повреждения, а также исследований влияния на точность ДОМЗЗ погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения, погрешностей

определения параметров нулевой последовательности КЛ, зависимости их от частоты и других факторов.

1.4.3 Общая оценка методов ДОМЗЗ, основанных на применении АМО.

Методы ДОМЗЗ на основе АМО привлекательны прежде всего тем, что точность определения места ОЗЗ не зависит от суммарного емкостного тока I_{CS} , текущей конфигурации и режима работы контролируемой сети, а такой фактор, как переходное сопротивление в месте повреждения, оказывает значительно меньшее влияние на точность ОМП, чем непосредственно на параметры электрических величин переходного процесса, используемые в методах ПАР.

Однако предложенный в [72, 205] подход применения АМО для решения задачи ДОМЗЗ предполагает использование полного набора электрических величин переходного процесса (фазных токов и напряжений), что практически не позволяет применить данное исполнение метода на КЛ напряжением 6–10 кВ из-за отсутствия на большинстве из них ТТ во всех фазах. В [72] отсутствуют также исследования влияния на эффективность предложенного способа ДОМЗЗ на основе АМО таких факторов, как погрешности ТТ и ТН в переходных режимах и погрешности определения параметров алгоритмической модели контролируемой КЛ.

Поэтому возможность применения методов на основе АМО связано с необходимостью разработки способов, не требующих измерения фазных токов. Такое решение для КЛ 6–10 кВ в принципе можно получить, используя для определения места ОЗЗ не фазные токи, а ток нулевой последовательности, измеряемый ТТНП. При этом, учитывая ограниченную точность современных исполнений кабельных ТТНП, для компенсации погрешностей определения тока нулевой последовательности модели, АМО должна включать не только модель контролируемой КЛ, но и ТТНП. Как и для способов ДОМЗЗ на основе ПАР, должно быть также исследовано влияние на точность определения места замыканий погрешностей определения параметров нулевой последовательности КЛ, зависимости их от частоты и других факторов.

1.4.4 Обоснование задач и методов исследований. Изложенное в пп. 1.4.1–1.4.3 позволяет сформулировать основные задачи исследований:

- 1) исследование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в целях выбора информационных параметров для решения задачи ДОМЗЗ;
- 2) исследование погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения и их влияния на точность методов ДОМЗЗ, основанных на использовании методов ПАР и методов на основе АМО;
- 3) разработка и исследование метода ДОМЗЗ, основанного на контроле параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, эффективность которого не зависит от величины суммарного емкостного тока $I_{C\Sigma}$ контролируемой сети и активных потерь в контуре нулевой последовательности поврежденной линии, в частности, переходного сопротивления в месте повреждения,
- 4) разработка и исследование метода ДОМЗЗ на основе АМО, не требующего измерений фазных токов;
- 5) разработка принципов выполнения и структуры комплексного устройства, обеспечивающего селективное определение поврежденного присоединения и зоны повреждения при всех разновидностях ОЗЗ.

Учитывая сложность переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, наиболее эффективным методом решения перечисленных задач является имитационное моделирование. В данной работе для разработки имитационных моделей кабельных сетей, первичных преобразователей тока и напряжения, исследуемых алгоритмов ДОМЗЗ использовались пакеты Simulink и SimPowerSystem программного комплекса Matlab.

Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно существенно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные влияющие факторы и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому наилучшим методом исследования электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой

задачи на основе упрощенных моделей электрической сети и метода имитационного моделирования на ЭВМ.

1.5 Выводы по главе 1

1.5.1 Сформулированы основные задачи ДОМЗЗ на КЛ 6–10 кВ под рабочим напряжением: селективное определение поврежденного присоединения и локализация зоны повреждения при всех разновидностях ОЗЗ с точностью до участка, который можно отключить для проведения работ по прожиганию изоляции и точному определению места повреждения на отключенной линии.

1.5.2 На основе анализа особенностей распределительных кабельных сетей различного назначения обоснованы подходы к решению задачи локализации зоны ОЗЗ на КЛ под рабочим напряжением:

– в кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения задачи с использованием устройств селективной сигнализации, обеспечивающих фиксацию всех разновидностей ОЗЗ, включая КрОЗЗ, на всех объектах электрически связанной сети (ЦП, РП и ТП);

– применение устройств ДОМЗЗ на ЦП и РП кабельных сетей 6-10 кВ промышленного электроснабжения может дать положительный эффект при отсутствии на ТП устройств защиты от ОЗЗ, обеспечивающих селективную сигнализацию КрОЗЗ;

– в кабельных сетях городского электроснабжения, на ТП которых применение стационарных устройств селективной сигнализации всех разновидностей ОЗЗ технически невозможно, с использованием специальных устройств ДОМЗЗ, установленных на ЦП и РП.

1.5.3 Сформулированы основные требования к устройствам ДОМЗЗ на КЛ 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением.

1.5.4 Разработана классификация способов ДОМЗЗ на КЛ под рабочим напряжением.

1.5.5 На основе сравнительного анализа известных способов выполнения устройств ДОМЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ показано, что наиболее перспективными для решения рассматриваемой задачи представляются методы, основанные на непосредственных измерениях параметров электрических величин переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции фазы КЛ на землю (методы ПАР), а также методы на основе АМО, использующие сравнение наблюдаемых электрических величин переходного процесса и электрических величин, полученных с использованием АМО.

1.5.6 Сравнительный анализ дистанционных параметрических методов ОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, а также методов на основе АМО, показал, что известные способы и предложения по выполнению устройств ОМЗЗ не учитывают в полной мере влияние на точность определения зоны повреждения таких факторов, как изменения суммарного емкостного тока контролируемой сети в различных режимах ее работы, активных потерь в контуре нулевой последовательности поврежденной линии и переходного сопротивления в месте повреждения, погрешностей первичных и вторичных преобразователей тока и напряжения, погрешностей определения параметров кабельных линий в переходных режимах ОЗЗ, их зависимость от частоты тока переходного процесса и нуждаются в совершенствовании.

1.5.7 Определены основные задачи, связанные с совершенствованием методов ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, и обоснованы методы их решения.

Основные результаты исследований данной главы отражены в публикациях [87, 91, 98, 100, 104].

**Глава 2 ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЗОНЫ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ НА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ
6 – 10 кВ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ**

**2.1 Задачи и методы исследования переходных процессов
при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ**

2.1.1 Задачи исследования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. В главе 1 было показано, что решение задачи ДОМЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, прежде всего актуально для распределительных кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения, а наиболее перспективными для решения указанной задачи при всех разновидностях ОЗЗ представляются методы, основанные на непосредственных измерениях параметров электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю (методы ПАР), а также методы на основе АМО, использующие сравнение наблюдаемых электрических величин переходного процесса и электрических величин, полученных с использованием алгоритмических моделей контролируемого объекта (методы на основе АМО).

Разработка и исследование указанных методов в целях выбора наиболее эффективных, т.е. обеспечивающих наиболее высокую точность определения места повреждения в условиях влияния различных факторов, требует решения следующих задач:

– разработки математических моделей для исследования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ;

– исследования переходных процессов при ОЗЗ в целях выбора информационных параметров, обеспечивающих наибольшую эффективность ДОМЗЗ на основе методов ПАР в городских кабельных сетях 6–10 кВ.

2.1.2 Обоснование и выбор методов исследования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в целях ДОМЗЗ. Наиболее мощным средством количественного анализа переходных процессов при ОЗЗ является имитационное моделирование на ЭВМ, позволяющее получить достаточно точные модели, учитывающие рассмотренные в главе 1 особенности схем городских кабельных сетей 6–10 кВ и параметры питающих и магистральных распределительных КЛ. В данной работе для решения сформулированных в п. 2.1.1 задач применялись пакеты расширения Simulink и SimPowerSystem программного моделирующего комплекса MATLAB [205–207].

Большое число факторов, влияющих на форму и значения информационных параметров электрических величин переходного процесса, и широкий диапазон изменения многих из них приводят к тому, что с применением метода имитационного моделирования можно проанализировать лишь ограниченную часть из значительного числа расчетных вариантов, соответствующих конкретным сочетаниям влияющих факторов. Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно существенно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные влияющие факторы и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому более эффективным методом исследования волновых и электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6-10 кВ и выявления информационных параметров, которые можно использовать для решения задачи ДОМЗЗ, представляется сочетание аналитических методов решения рассматриваемой задачи на основе упрощенных моделей электрической сети [16, 26, 100] и имитационного моделирования на ЭВМ

2.2 Анализ информационных параметров электрических величин переходного процесса с использованием аналитической модели кабельной сети 6–10 кВ

2.2.1 Аналитические решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. В переходном процессе при ОЗЗ в электрических сетях с малыми токами замыкания на землю условно выделяют две характерные стадии [10, 11, 26, 157, 158, 161]: стадию, в переходном токе которой преобладают высокочастотные составляющие, связанные с разрядом емкостей поврежденной фазы (разрядная или волновая стадия), и стадию, в переходном токе которой преобладают среднечастотные составляющие, связанные с дополнительным подзарядом емкостей неповрежденных фаз (зарядная стадия). Известные аналитические решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения обычно принято классифицировать по схеме замещения, применяемой для приближенного анализа переходных токов и напряжений. Большинство исследователей используют т.н. одночастотные схемы замещения, учитывающие только зарядную или разрядную стадии переходного процесса [например, 10, 19, 171, 209–213]. Такие схемы замещения чаще применяются при анализе перенапряжений, возникающих при дуговых перемежающихся ОЗЗ в сетях среднего напряжения.

В [16, 26, 214] показано, что применение одночастотных схем замещения сети приводит к существенным ошибкам в оценке значений как полных переходных токов и напряжений, так и их отдельных составляющих. Кроме того, частотное разделение разрядной и зарядной составляющих переходных токов в кабельных сетях 6–10 кВ возможно не всегда [например, 16, 26, 214]. Поэтому для решения задач, связанных с качественным и приближенным количественным анализом информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в целях решения задачи определения места повреждения, расчетная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ должна учитывать не только зарядную, но и разрядную ста-

дию. Такие схемы замещения можно назвать двухчастотными. Аналитические решения уравнений переходного процесса на основе двухчастотной схемы рассматриваются в работах Шуина В.А. [16, 26, 214, 215] и Качесова В.Е. [69–71]. В данной работе в целях качественного и приближенного количественного анализа информационных параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ использовано решение, предложенное Шуиным В.А. [214], адекватность и достоверность которого проверена сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными, полученным на физической модели и в реальных кабельных сетях 6–10 кВ.

2.2.2 Аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для двухчастотной схемы замещения, предложенное в [214]. Трехфазная схема замещения радиальной кабельной сети 6–10 кВ для расчета переходного процесса при ОЗЗ приведена на рисунке 2.1.

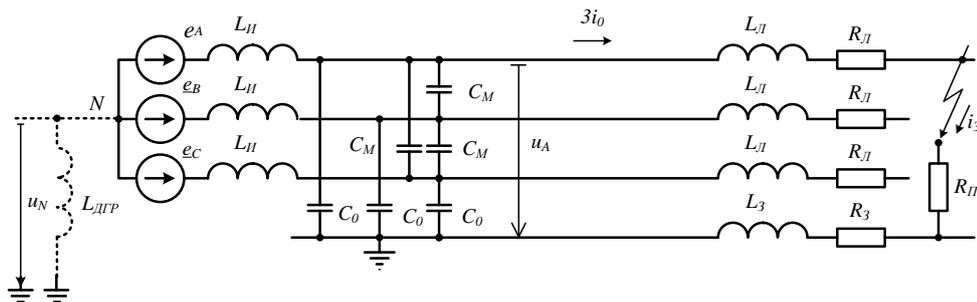


Рисунок 2.1 – Двухчастотная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ по [214]

На рисунке 2.1 $L_{ДГР}$ – индуктивность ДГР (при резонансном режиме заземления нейтрали); $L_{л}$ – эквивалентная индуктивность источника питания; e_A, e_B, e_C – фазные ЭДС источника питания; u_A – напряжение на поврежденной фазе на шинах источника питания; C_0 – суммарная емкость фазы сети на землю; C_M – суммарная междуфазная емкость сети; $L_{л}$ и $R_{л}$ – соответственно индуктивность и активное сопротивление поврежденной линии; $R_{л}$ – переходное сопротивление в месте повреждения; L_3 и R_3 – соответственно индуктивность и активное сопротивление контура обратного тока (земли); u_N – напряжение на нейтрали; $i_3 = 3i_0$ – ток ОЗЗ.

На рисунке 2.2 приведена комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих, соответствующая схеме по рисунку 2.1.

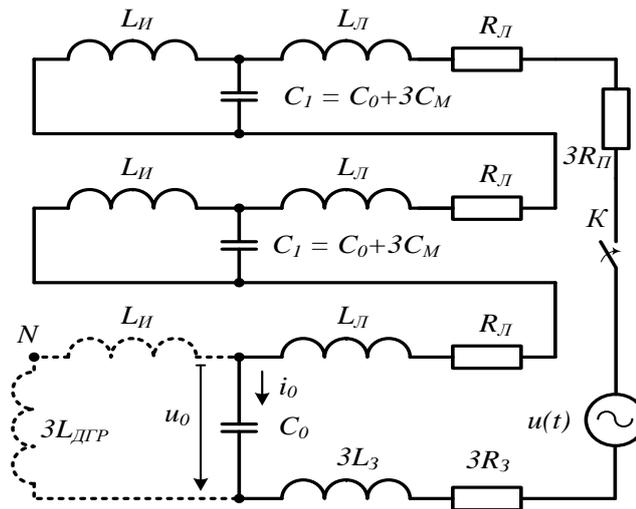


Рисунок 2.2 – Комплексная схема замещения по методу симметричных составляющих для расчета переходного процесса при ОЗЗ

В [214] по комплексной схеме замещения (рисунок 2.2) при $u(t) = -U_m \sin(\omega t + \varphi)$, для случая "малых потерь" в контуре нулевой последовательности для $u_0(t)$ получено следующее решение:

$$\begin{aligned}
 u_0(t) = u_N(t) = & U_m \sin(\omega t + \varphi) + \\
 & -U_m a_1 e^{-\delta_p t} \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin(\omega_p t + \varphi_p) + \\
 & -U_m a_2 e^{-\delta_3 t} \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \left[1 - \frac{u_N(0)}{U_m \sin \varphi} \right] \cdot \sin(\omega_3 t + \varphi_3),
 \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $u_N(0)$ – смещение нейтрали сети в момент пробоя; ω_p и ω_3 , δ_p и δ_3 – соответственно частоты и коэффициенты затухания разрядной и зарядной составляющих; $p_{1,2} = \delta_p \pm j\omega_p$, $p_{3,4} = \delta_3 \pm j\omega_3$ – корни характеристического уравнения

$$\Delta(p) = p^4 + \alpha p^3 + (k_c \omega_1^2 + \omega_2^2) p^2 + \omega_1^2 \omega_2^2, \quad (2.2)$$

где $\alpha = R_1 / L_1$; $\omega_1^2 = 1 / L_1 C_1$; $\omega_2^2 = 1 / L_2 C_2$; $k_c = 1 + C_1 / C_2$; $L_1 = 3L_{\text{Л}} + 3L_3$; $C_1 = C_0$; $L_2 =$

$$2L_{\text{И}}; C_2 = 0,5(C_0 + 3C); R_1 = 3R_{\text{Л}} + 3R_3 + 3R_{\text{Л}}; a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2}; a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2};$$

$$\omega_{p,3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 \pm \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4) \omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (2.3)$$

$$\delta_{p,3} = \alpha \frac{\omega_{p,3}^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_{p,3}^2 - \omega_2^2 - k_c \omega_1^2)}; \quad (2.4)$$

$$\varphi_{p,3} = \arctg\left(\frac{\omega_{p,3} \sin \varphi}{\omega \cos \varphi + \delta_{p,3} \sin \varphi}\right). \quad (2.5)$$

Из схемы замещения (рисунок 2.2) для тока $i_0(t)$ можно получить выражение

$$i_0(t) = C_0 \frac{du_0(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

Из комплексной схемы замещения по рисунку 2.2 с использованием уравнений (2.1) и (2.6) нетрудно также получить уравнение для напряжения на поврежденной фазе

$$u_\varphi(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_0(t), \quad (2.7)$$

где $u_0(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$ – соответственно переходные напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности.

В [10, 16, 210, 214] показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ заземление нейтрали сети через ДГР вследствие большой индуктивности последнего по сравнению с индуктивностями поврежденной линии и источника питания практически не оказывает влияния на свободные составляющие токов и напряжений переходного процесса при ОЗЗ.

Приведенные выражения (2.1)–(2.7) и комплексная схема замещения по рисунку 2.2 позволяют определить параметры электрических величин переходного процесса, которые могут быть использованы для решения задачи ДОМЗЗ.

2.2.3 Электрические величины переходного процесса при ОЗЗ, используемые для определения места повреждения на КЛ 6-10 кВ. Для решения задачи ДОМЗЗ с использованием методов, основанных на контроле ПАР или АМО, в кабельных сетях 6–10 кВ могут быть использованы электрические величины переходного процесса, которые технически могут быть измерены и параметры которых в достаточной степени зависят от удаленности места повреждения l_3 от шин контролируемого объекта.

В электрических сетях среднего напряжения с малыми токами замыкания на землю релейная защита от междуфазных КЗ, как правило, выполняется в двухфазном исполнении [115, 145–148], поэтому установка фазных ТТ на ЛЭП 6–10 кВ предусматривается только на фазах "А" и "С". Учитывая это, фазные токи, как правило, не могут быть использованы для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. На всех КЛ напряжением 6–10 кВ для выполнения селективной защиты от ОЗЗ предусматривается установка кабельных ТТНП обеспечивающих измерение тока $3i_0$. На ЦП кабельных сетей должна быть предусмотрена установка трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), обеспечивающих измерение всех фазных напряжений и напряжения $3u_0$. Установка ТНКИ, как правило, предусматривается также и РП кабельных сетей 6–10 кВ.

Таким образом, к электрическим величинам переходного процесса при ОЗЗ, которые в принципе технически могут быть измерены и использованы в методах ДОМЗЗ на основе ПАР или АМО, в кабельных сетях 6–10 кВ относятся:

- переходное напряжение нулевой последовательности;
- переходный ток нулевой последовательности;
- переходное напряжение поврежденной фазы.

Для решения задачи ДОМЗЗ, кроме полных токов и напряжений, могут быть использованы также их отдельные составляющие – разрядная и зарядная. Необходимо, однако, учитывать, что в кабельных сетях 6–10 кВ частотное разделение указанных составляющих возможно только при определенных параметрах сети и поврежденной линии [19, 26, 214], потому для решения рассматриваемой задачи в общем случае возможно использование только суммы свободных составляющих, которые могут быть выделены из полных токов и напряжений с помощью частотных фильтров.

Следует отметить также, что применение ТТНП и ТНКИ для измерения переходных токов и напряжений в требуемом, для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, частотном диапазоне нуждается в дополнительных исследованиях.

Расчетные осциллограммы, полученные по уравнениям (2.1) – (2.7), иллюстрируют зависимости указанных выше величин переходного процесса от удаленности места ОЗЗ от шин источника питания (рисунки 2.3 – 2.7).

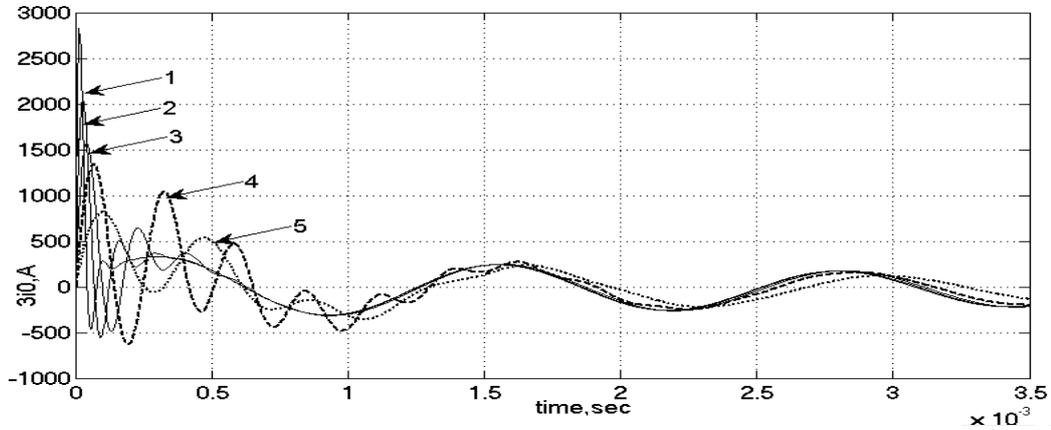


Рисунок 2.3 – Расчетные зависимости полного переходного тока $3i_0$ от удаленности l_3 до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $l_3 = 0,2$ км; 2 – $l_3 = 0,5$ км; 3 – $l_3 = 1$ км; 4 – $l_3 = 2$ км; 5 – $l_3 = 5$ км

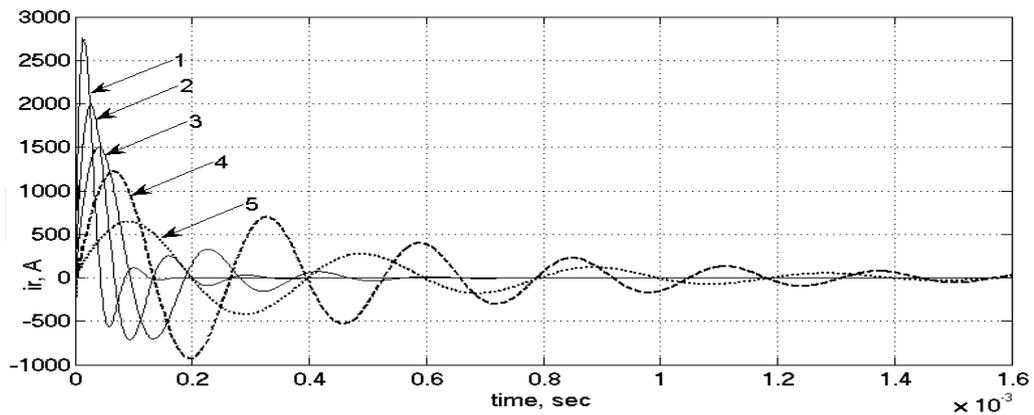


Рисунок 2.4 – Расчетные зависимости разрядной составляющей переходного тока $3i_0$ от удаленности l_3 до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – 5 то же, что и на рис. 2.3

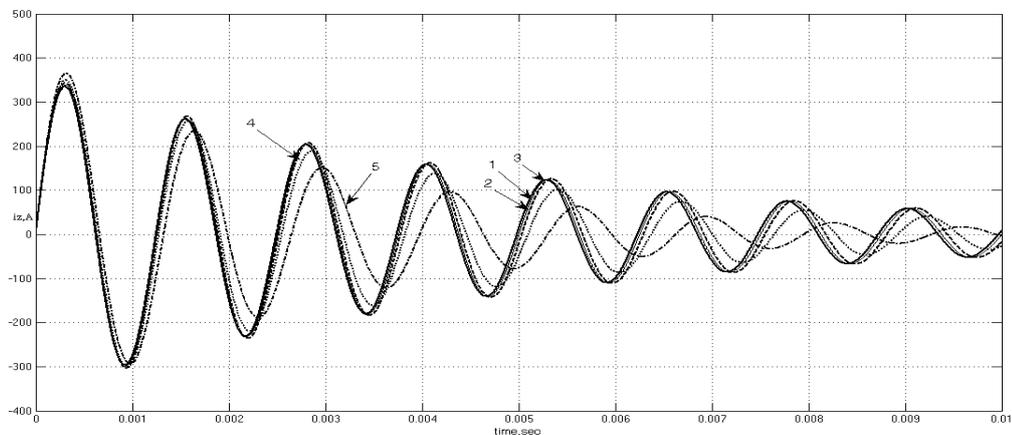


Рисунок 2.5 – Расчетные зависимости зарядной составляющей переходного тока $3i_0$ от удаленности l_3 до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – 5 то же, что и на рис. 2.3

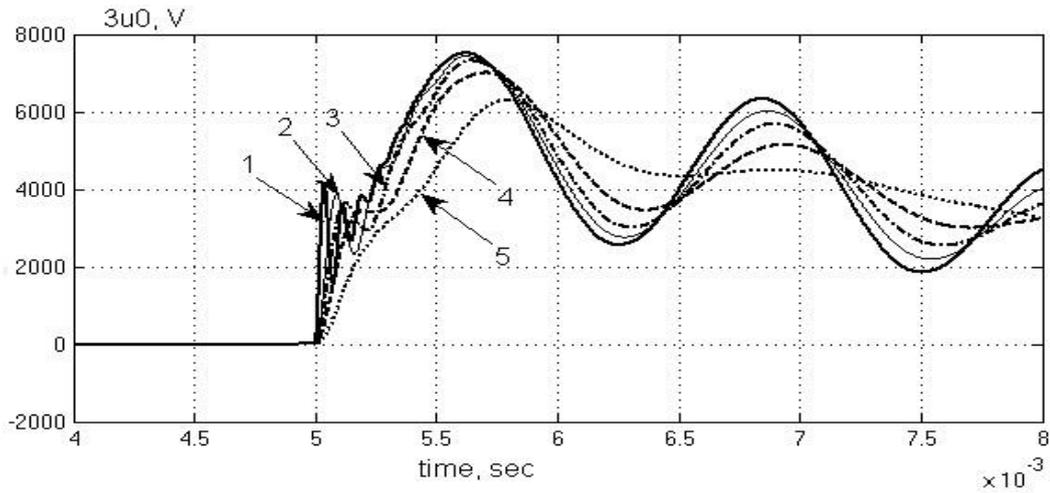


Рисунок 2.6 – Расчетные зависимости переходного напряжения нулевой последовательности от удаленности l_3 до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{с\Sigma} = 30$ А:

1 – 5 то же, что и на рис. 2.3

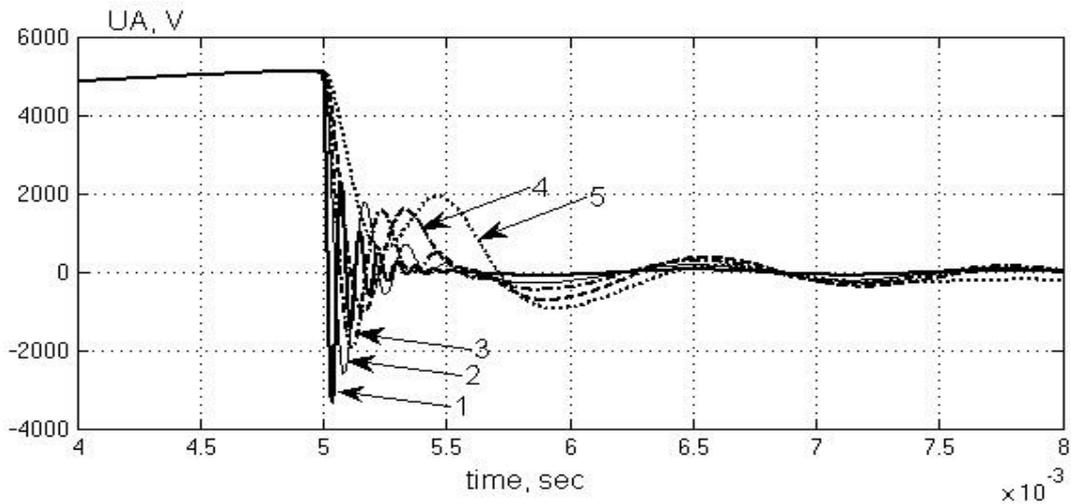


Рисунок 2.7 – Расчетные зависимости переходного напряжения на поврежденной фазе от удаленности l_3 до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{с\Sigma} = 30$ А:

1 – 5 то же, что и на рис. 2.3

Ниже оценивается возможность и рассматриваются особенности использования различных параметров переходных токов и напряжений для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

2.2.4 Использование параметров переходного напряжения $u_0(t)$ для определения места ОЗЗ. На рисунке 2.8 приведены построенные по уравнениям (2.1)–(2.4) расчетные зависимости переходного напряжения нулевой последовательности $u_0(t)$ и его составляющих для кабельной сети 6 кВ.

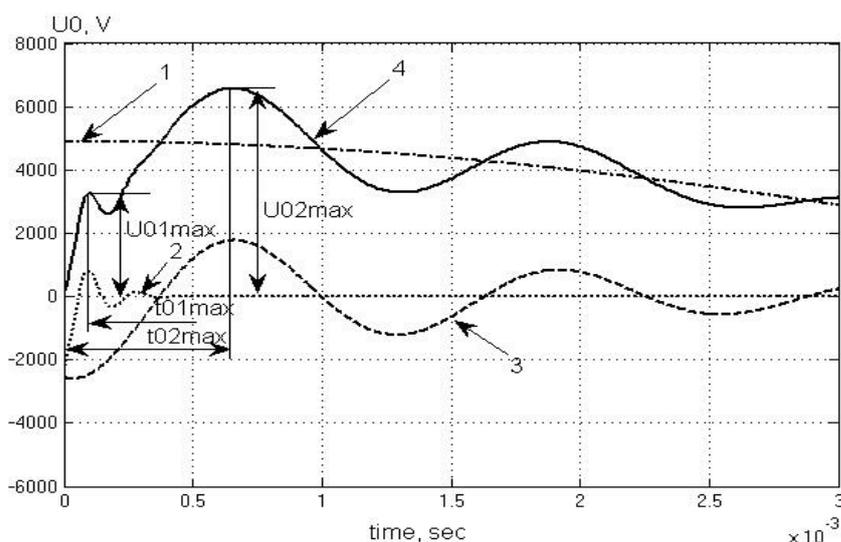


Рисунок 2.8 – Составляющие переходного напряжения $u_0(t)$ для кабельной сети с параметрами: $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{C\Sigma} = 30$ А, кабель ААБ63х120, удаленность ОЗЗ от шин $l_3 = 1$ км, $R_{л} = 1$ Ом: 1 – принужденная составляющая 50 Гц; 2 – разрядная составляющая; 3 – зарядная составляющая; 4 – полное напряжение $u_0(t)$

В кабельных сетях 6–10 кВ, содержащих КЛ малой и средней протяженности (от десятков метров до единиц километров, раздел 1.1), амплитуда $u_{02\max}$ и частота зарядной составляющей $u_{03}(t)$ в основном определяются индуктивностью источника питания $L_{л}$ и емкостью фазы сети на землю C_0 , т.е. суммарным емкостным током сети $I_{C\Sigma} = 3C_0\omega U_{\phi,ном}$, и практически не зависят от удаленности l_3 до точки ОЗЗ. Поэтому в качестве информационных параметров переходного напряжения $u_0(t)$ для решения задачи ДОМЗЗ могут использоваться только параметры, определяемые разрядной составляющей $u_p(t)$. Поскольку частотное разделение разрядной и зарядной составляющих в кабельных сетях 6–10 кВ, как уже отмечалось выше, возможно не всегда [16, 26, 214], для решения задачи ДОМЗЗ должны использоваться параметры полного переходного напряжения $u_0(t)$, зависящие от разрядной составляющей. Из рисунка 2.8 можно видеть, что к таким параметрам относятся значение первого максимума напряжения $u_{01\max}$ и соответствующий ему момент времени $t_{01\max}$.

Для кабельных сетей с КЛ малой и средней протяженности, как правило, для частоты зарядных и разрядных колебаний справедливы соотношения: $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$, $\omega_p^2 \gg \omega^2$. При указанных условиях значение

$$t_{01 \max} \approx T_p/4 = 1/4f_p = \pi/2\omega_p; \quad (2.8)$$

$$\omega_p \approx \sqrt{k_c} \omega_1 = \sqrt{k_c / L_1 C_1} = \sqrt{(C_1 + C_2) / L_1 C_1 C_2}. \quad (2.9)$$

Из (2.8) и (2.9) следует, что при "малых потерях" в контуре нулевой последовательности, когда разрядная составляющая имеет колебательный характер, $t_{01 \max}$ зависит не только от индуктивности L_l , т.е. от расстояния до места ОЗЗ l_3 , но и от емкостей сети, т.е. от $I_{c\Sigma}$. Практически частота разрядных колебаний будет существенно зависеть также от активного сопротивления контура R_l , включая переходное сопротивление в месте повреждения, а при достаточно больших потерях в контуре разрядная составляющая может иметь аperiodический характер, что приведет к значительным погрешностям при определении $t_{01 \max}$.

Оценим характер зависимости значения $u_{01 \max} = f(l_3)$. При углах φ , близких к $\pi/2$, что характерно для большинства случаев пробоя изоляции в кабельных сетях [9, 10, 216], и малых потерях в контуре тока ОЗЗ

$$\varphi_{p,3} \rightarrow \pi/2; \quad (2.10)$$

$$a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_3^2}{\omega_p^2 - \omega_3^2} \approx \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} = \frac{1}{k_C}; \quad (2.11)$$

$$a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_p^2}{\omega_3^2 - \omega_p^2} \approx 1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} = 1 - \frac{1}{k_C} = \frac{k_C - 1}{k_C}. \quad (2.12)$$

Из (2.1) с учетом (2.8) – (2.12) при отсутствии смещения нейтрали сети в момент пробоя изоляции ($u_N(0) = 0$) можно получить

$$u_{01 \max} = u_0(t_{01 \max}) \approx u_0(T_p / 4) = U_m \sin \varphi \left[1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} e^{-\delta_p T_p / 4} - \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2}\right) e^{-\delta_s T_p / 4} \right]. \quad (2.13)$$

Если пренебречь затуханием разрядной и зарядной составляющей на интервале времени $t = T_p/4$, из (2.13) получим

$$u_{01 \max} \approx U_m \sin \varphi \left[1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} - \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2}\right) \right] = U_m 2 \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} \sin \varphi = U_m \frac{2}{k_C} \sin \varphi, \quad (2.14)$$

т.е. значение $u_{01 \max}$ не зависит от расстояния до места ОЗЗ и определяется в основном начальной фазой пробоя изоляции φ .

В общем случае с учетом потерь, как следует из (2.13), значение $u_{01 \max}$ является сложной функцией l_3 , $I_{C\Sigma}$ и величины активных потерь в контуре нулевой последовательности.

Таким образом, использование в качестве информационных параметров для целей ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ значения первого максимума $u_{01 \max}$ переходного напряжения $u_0(t)$ или соответствующего ему момента времени $t_{01 \max}$ имеет следующие недостатки:

1) значение $t_{01 \max}$ существенно зависит от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$, т.е. от режима работы сети, и активных потерь в контуре тока ОЗЗ;

2) при апериодическом характере разрядной составляющей $t_{01 \max}$ не может быть использовано как параметр для определения места ОЗЗ;

3) значение $u_{01 \max}$ при очень малых активных потерях практически не зависит от расстояния до места повреждения, а при достаточно больших потерях является сложной функцией l_3 , $I_{C\Sigma}$ и активного сопротивления контура ОЗЗ, а также зависит от начальной фазы пробоя изоляции φ .

2.2.5 Использование для определения места ОЗЗ параметров производных переходного напряжения $u_0(t)$. Крутизна переднего фронта переходного напряжения нулевой последовательности $du_0(t)/dt$ определяется в основном скоростью нарастания разрядной составляющей, т.е. существенно зависит от удаленности l_3 места ОЗЗ от шин.

Примем, что имеют место соотношения $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$, $\omega_p^2 \gg \omega^2$. При углах $\varphi \rightarrow \pi/2$ и $u_N(0) = 0$ из (2.1) для производной напряжения $u_0(t)$ получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{du_0}{dt}(t) = & U_m \omega \cos(\omega t + \varphi) + U_m a_1 e^{-\delta_p t} (\delta_p \cos \omega_p t + \omega_p \sin \omega_p t) + \\ & + U_m a_2 e^{-\delta_3 t} (\delta_3 \cos \omega_3 t + U_m a_2 \omega_3 \sin \omega_3 t). \end{aligned} \quad (2.15)$$

На рисунке 2.9 приведены зависимости первой производной напряжения $u_0(t)$, полученные по (2.15), для одной и той же сети ($U_{ном} = 6$ кВ, $I_{C\Sigma} = 30$ А) при различных значениях удаленности l_3 места ОЗЗ от шин.

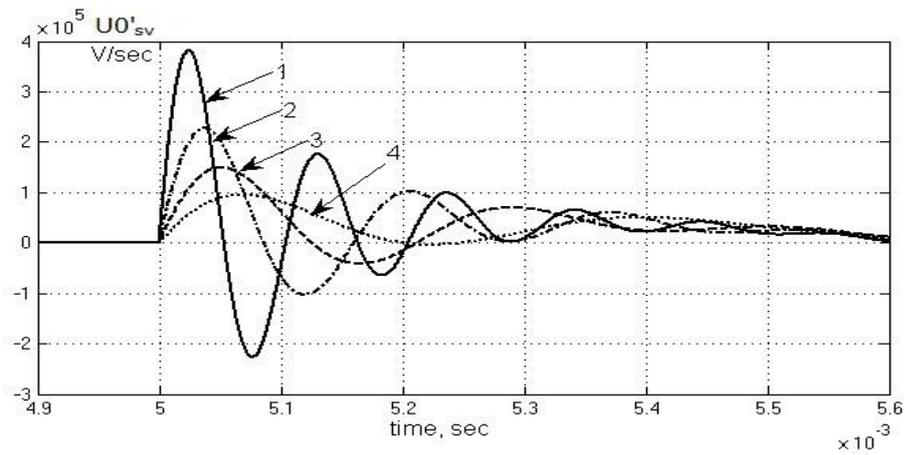


Рисунок 2.9 – Зависимости $du_0/dt(t)$ для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, $\varphi = 90^0$;

$R_{л} = 1$ Ом: а – $l_3 = 0,2$ км; б – $l_3 = 0,5$ км; в – $l_3 = 1$ км; г – $l_3 = 2$ км

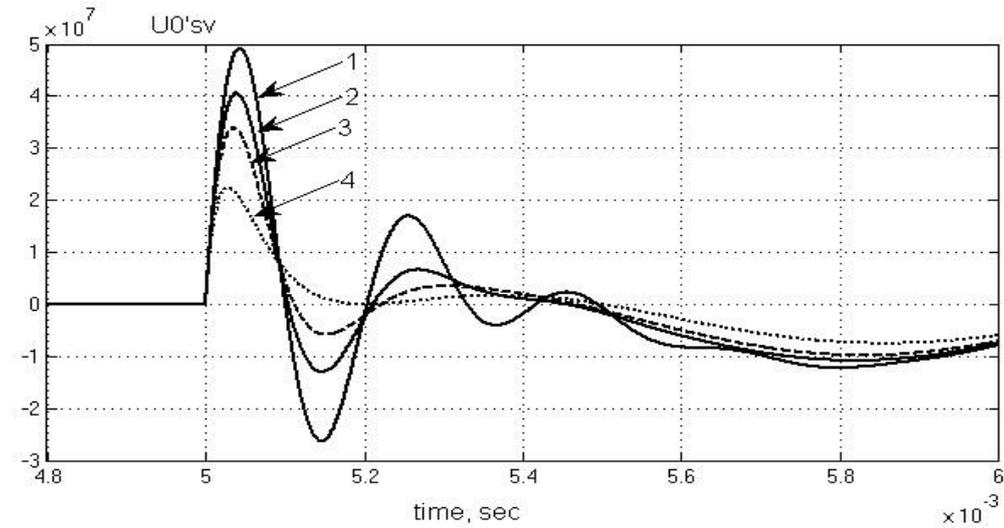
Из рисунка 2.9 можно видеть, что в качестве основных параметров производной напряжения $u_0(t)$, зависящих от расстояния до места ОЗЗ, могут быть использованы амплитуда U_{0lmax} и длительность 1-й полуволны разрядных колебаний $T_p/2$.

Выше были рассмотрены недостатки использования в качестве информационного параметра для решения задачи ДОМЗЗ длительности полуволны разрядных колебаний $T_p/2$. Оценим характер зависимости от l_3 параметра U_{0lmax} . Для этого рассмотрим предельный случай, когда затуханием разрядной составляющей за время $t = T_p/4$ можно пренебречь. Из (2.15) с учетом (2.11) и (2.12) получим

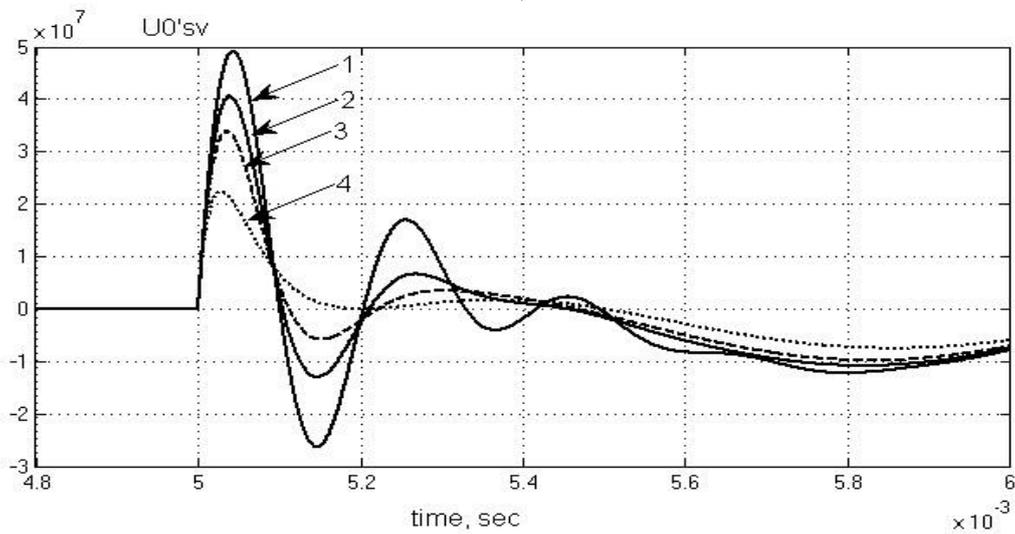
$$\frac{du_0}{dt}(T_p / 4) \approx U_m \sin \varphi \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} \omega_p \sin(\omega_p T_p / 4) \approx \frac{U_m \sin \varphi}{\sqrt{k_c L_1 C_1}}. \quad (2.16)$$

Из (2.16) можно видеть, что амплитуда 1-й полуволны разрядных колебаний производной напряжения нулевой последовательности U_{0lmax} зависит от емкости сети параметра $k_c C_1$, т.е. и от $I_{c\Sigma}$. В общем случае, как это следует из (2.15), U_{0lmax} будет зависеть также и от коэффициента затухания разрядных колебаний, т.е. от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, и начальной фазы пробоя изоляции φ . Следует отметить, что зависимость U_{0lmax} , как и ряда других рассматриваемых ниже параметров от значения φ можно устранить с помощью нормирования электрических величин переходного процесса (подраздел 2.3).

На рисунке 2.10 приведены зависимости, иллюстрирующие рассмотренные недостатки использования указанных параметров первой производной du_0/dt для определения места ОЗЗ.



а)



б)

Рисунок 2.10 – Зависимости первой производной свободных составляющих напряжения нулевой последовательности для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $L_3 = 1$ км при $\varphi = 90^\circ$:

а – от R_{II} при $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $R_{II} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{II} = 1$ Ом; 3 – $R_{II} = 2$ Ом; 4 – $R_{II} = 5$ Ом

б – от $I_{c\Sigma}$ при $R_{II} = 0,1$ Ом: 1 – $I_{c\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{c\Sigma} = 50$ А

Из (2.1) можно получить следующее выражение для второй производной напряжения нулевой последовательности $u_0(t)$:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 u_0}{dt^2}(t) = & -U_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) - U_m a_1 \delta_P^2 e^{-\delta_P t} \cos \omega_P t \sin \varphi - \\
 & - 2U_m a_1 \delta_P \omega_P e^{-\delta_P t} \sin \omega_P t \sin \varphi + U_m a_1 \omega_P^2 e^{-\delta_P t} \cos \omega_P t \sin \varphi + \\
 & - U_m a_2 \delta_3^2 e^{-\delta_3 t} \cos \omega_3 t \sin \varphi - 2U_m a_2 \delta_3 \omega_3 e^{-\delta_3 t} \sin \omega_3 t \sin \varphi + \\
 & + U_m a_2 \omega_3^2 e^{-\delta_3 t} \cos \omega_3 t \sin \varphi.
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

На рисунке 2.11 приведены зависимости второй производной напряжения $u_0(t)$, полученные по (2.17), для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{c\Sigma} = 30$ А при различных значениях удаленности l_3 места ОЗЗ от шин.

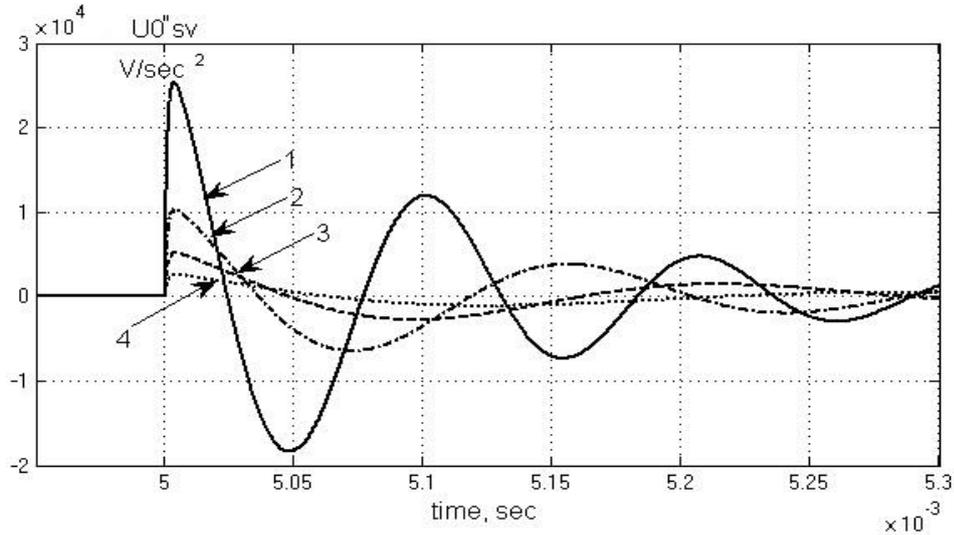


Рисунок 2.11 – Зависимости $d^2u_0/dt^2(t)$ для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, $\varphi = 90^\circ$;
 $R_{лл} = 1$ Ом: а – $l_3 = 0,2$ км; б – $l_3 = 0,5$ км; в – $l_3 = 1$ км; г – $l_3 = 2$ км

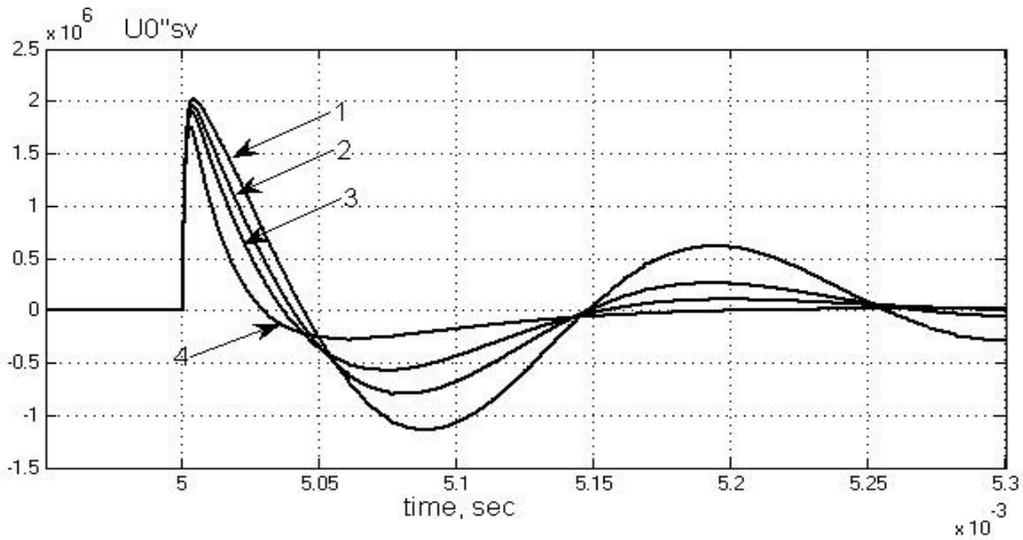
Из рисунка 2.11 можно видеть, что для второй, как и для первой производной напряжения $u_0(t)$ в качестве основных параметров, зависящих от расстояния до места ОЗЗ, в принципе могут быть использованы амплитуда U_{0lmax} и длительность 1-й полуволны разрядных колебаний $T_P/4$. Использование в качестве информационного параметра значения $T_P/4$ для решения задачи ДОМЗЗ по рассмотренным выше причинам нецелесообразно.

Оценим характер зависимости амплитуды первой полуволны $u''_0(t)$ от основных влияющих факторов – $I_{c\Sigma}$ и активных потерь в контуре тока ОЗЗ. Из рисунка 2.11 можно видеть, что $u''_0(t)$ имеет максимальное значение при $t \approx 0$.

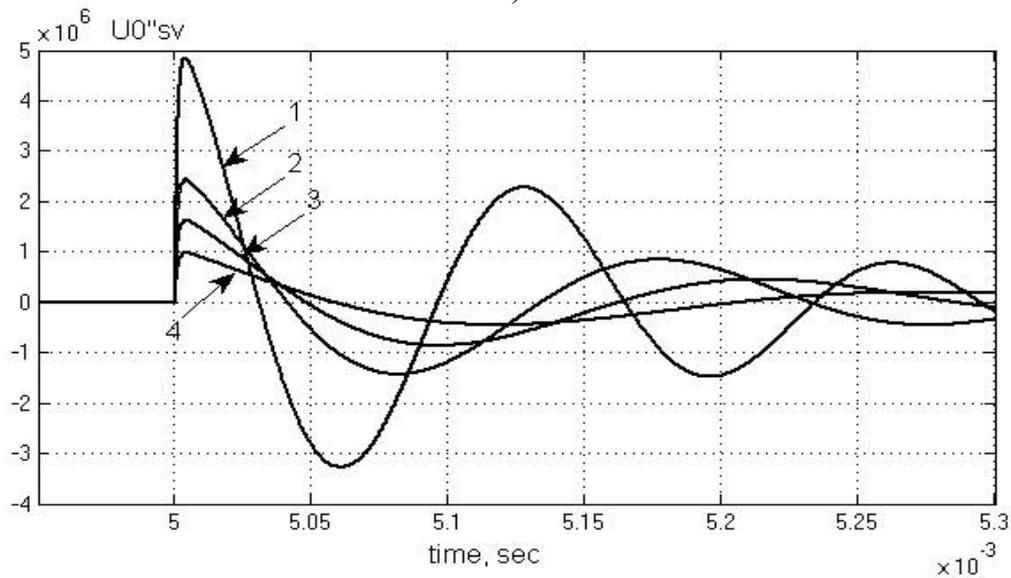
С учетом этого из (2.17) получим

$$\begin{aligned} \frac{d^2u_0}{dt^2}(0) &\approx -U_m \sin \varphi \cdot (\omega^2 - a_1 \delta_p^2 + a_1 \omega_p^2 + a_2 \omega_3^2 - a_2 \delta_3^2) \approx \\ &\approx U_m \sin \varphi \cdot a_1 (-\delta_p^2 + \omega_p^2) \approx U_m \sin \varphi \cdot a_1 \omega_p^2 \approx U_m \sin \varphi \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} \omega_p^2 = \frac{U_m \sin \varphi}{L_1 C_1}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Из (2.18) можно видеть, что максимальное значение $u''_0(t)_{макс} = u''_0(0)$ в момент пробоя практически не зависит от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, но зависит от суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ (рисунок 2.12).



а)



б)

Рисунок 2.12 – Зависимости второй производной свободных составляющих напряжения нулевой последовательности для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $L_3 = 1$ км при $\varphi = 90^\circ$:

а – от $R_{л}$ при $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $R_{л} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{л} = 1$ Ом; 3 – $R_{л} = 2$ Ом; 4 – $R_{л} = 5$ Ом

б – от $I_{c\Sigma}$ при $R_{л} = 0,1$ Ом: 1 – $I_{c\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{c\Sigma} = 50$ А

Таким образом, основным недостатком параметра $u''_o(0)$ в аспекте использования для ДОМЗЗ является зависимость от величины суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, т.е. и режимов работы контролируемой сети. Поэтому значение $u''_o(0)$ в качестве параметра для определения места ОЗЗ можно использовать только в сетях с достаточно стабильной величиной $I_{c\Sigma}$.

2.2.6 Использование для определения места ОЗЗ параметров переходного тока $i_o(t)$. Для переходного тока $i_o(t)$ из (2.1) и (2.6) получим:

$$\begin{aligned}
i_3 = 3i_0 = 3C_1 \frac{du_0}{dt} = 3C_0 \frac{du_0}{dt} \approx I_m \cos(\omega t + \varphi) + \\
+ I_{mp} \sin \varphi \cdot e^{-\delta_p t} (\omega_p \sin \omega_p t - \delta_p \cos \omega_p t) + \\
+ I_{m3} \sin \varphi \cdot e^{-\delta_3 t} (\omega_3 \sin \omega_3 t - \delta_3 \cos \omega_3 t),
\end{aligned} \tag{2.18}$$

где $I_m = 3C_1 \omega U_m = \sqrt{2} I_{c\mathcal{E}}$ – амплитуда принужденной составляющей тока ОЗЗ; $I_{c\mathcal{E}}$ – суммарный емкостный ток сети; I_{mp} , I_{m3} – амплитуды разрядной и зарядной составляющих тока переходного процесса.

$$I_{mp} = 3C_{1p} U_m a_1 \left(\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_p^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_p} \right) \sqrt{\delta_p^2 + \omega_p^2}; \tag{2.19}$$

$$I_{m3} = 3C_1 U_m a_2 \left(\frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2 \varphi + \omega_3^2 \sin^2 \varphi}}{\omega_3} \right) \sqrt{\delta_3^2 + \omega_3^2}. \tag{2.20}$$

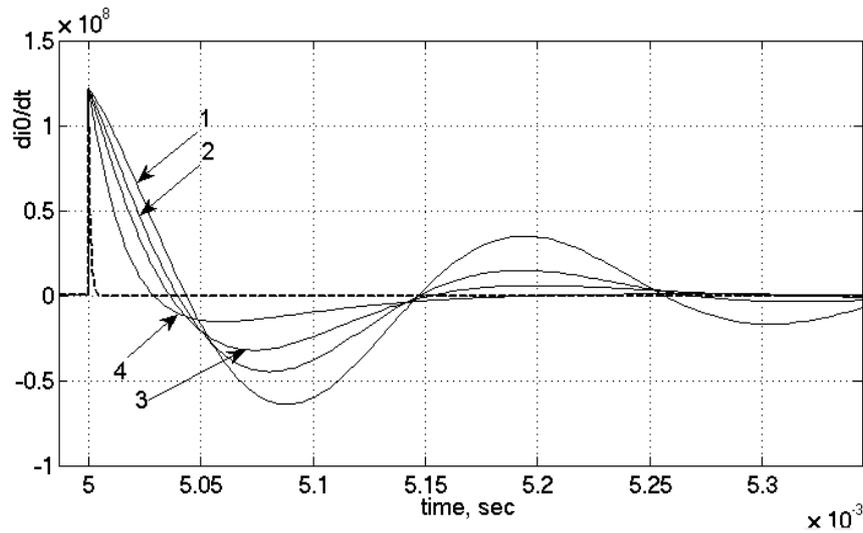
Так как частотное разделение разрядной $i_{0p}(t)$ и зарядной $i_{03}(t)$, как уже отмечалось выше, в общем случае невозможно, для целей ДОМЗЗ могут быть использованы только параметры полного переходного тока $i_0(t)$ или суммы его свободных составляющих $i_{0cb}(t) = i_{0p}(t) + i_{03}(t) \approx i_0(t)$.

Поскольку $i_0(t) = C_0 \frac{du_0}{dt}(t)$, можно сделать вывод, что значения таких параметров переходного тока $i_0(t)$, как амплитуда первой полуволны и соответствующий ей момент времени, так же как и для производной напряжения $u_0(t)$, являются сложными функциями множества переменных и зависят не только от удаленности места ОЗЗ от шин, но и от таких факторов, как суммарный емкостный ток сети $I_{c\mathcal{E}}$ и активные потери в контуре тока ОЗЗ.

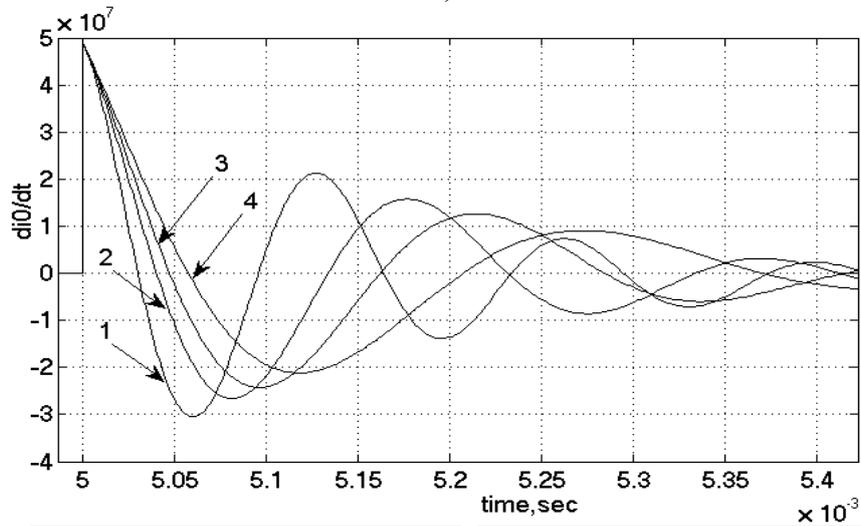
2.2.7 Использование для определения места ОЗЗ параметров производных переходного тока $i_0(t)$. Производная переходного тока $i_0(t)$ определяется практически производной суммы свободных составляющих, а ее начальное значение – его разрядной составляющей. С учетом этого из (2.18) для $di_0(0)/dt$ получим:

$$\frac{di_0(0)}{dt} = I_{0pm} \omega_p = C_0 U_m \sin \varphi \cdot a_1 \omega_p^2 \approx C_0 U_m \sin \varphi \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} \omega_p^2 = \frac{U_m \sin \varphi}{L_1}. \tag{2.21}$$

Расчетные зависимости производной тока $i_0(t)$ представлены на рисунке 2.13.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Зависимости производной свободных составляющих тока нулевой последовательности для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $l_3 = 1$ км при $\varphi = 90^\circ$:

а – от R_{II} при $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $R_{II} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{II} = 1$ Ом; 3 – $R_{II} = 2$ Ом; 4 – $R_{II} = 5$ Ом

б – от $I_{c\Sigma}$ при $R_{II} = 0,1$ Ом: 1 – $I_{c\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{c\Sigma} = 50$ А

Как видно из (2.21) и рисунка 2.13, начальное значение производной свободных составляющих тока нулевой последовательности является функцией удаленности места ОЗЗ и не зависит от переходного сопротивления и суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$. Однако для достаточно точной фиксации начального значения производной переходного тока $i_0(t)$ требуется быстродействующий пуск устройства ДОМЗЗ, что является недостатком использования данного параметра для решения задачи ДОМЗЗ. Значение $i'_0(0)$ зависит также от начальной фазы пробоя изоляции, однако указанную

зависимость можно устранить нормированием мгновенных значений переходного тока (подраздел 2.3).

2.2.8 Использование для определения места ОЗЗ параметров переходного напряжения $u_\phi(t)$. Из комплексной схемы замещения (рисунок 2.2) можно получить следующее выражение для переходного напряжения на поврежденной фазе (например, фазе "А")

$$u_\phi(t) = u_{0A}(t) + u_1(t) + u_2(t) = L_\Sigma \frac{di_0(t)}{dt} + R_1 i_0(t), \quad (2.22)$$

где $u_0(t)$, $u_1(t)$, $u_2(t)$ – соответственно переходное напряжение нулевой, прямой и обратной последовательностей для особой (поврежденной) фазы.

Полное выражение для $u(t)$ можно получить, подставляя в (2.22) выражение для $i_0(t)$ из (2.18). На рисунке 2.14 приведены зависимости переходного напряжения на поврежденной фазе $u_A(t)$, полученные по выражениям (2.22) и (2.18) при разных значениях удаленности места ОЗЗ от шин источника питания l_3 .

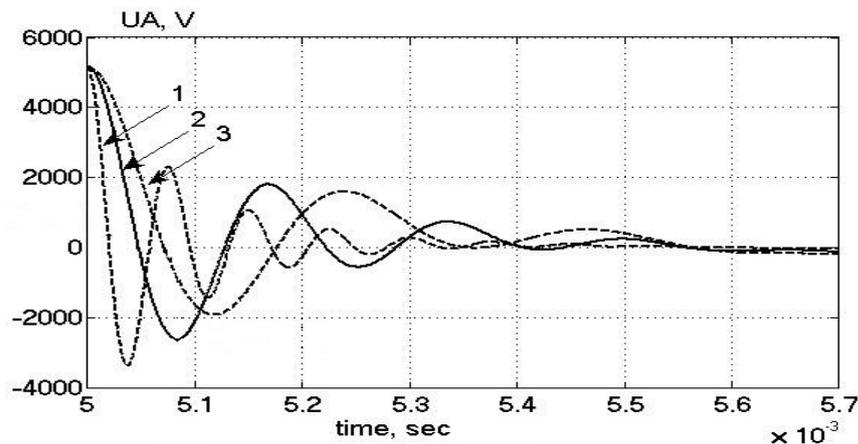


Рисунок 2.14 – Зависимости напряжения на поврежденной фазе от удаленности ОЗЗ

для кабельной сети $U_{НОМ} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, $R_{л} = 1$ Ом при $\varphi = 90^\circ$:

1 – $l_3 = 0,1$ км; 2 – $l_3 = 0,5$ км; 3 – $l_3 = 1$ км

Из рисунка 2.14 можно видеть, что параметрами переходного напряжения $u_A(t)$, зависящими от l_3 и удобными для измерений, являются длительность первой полуволны напряжения переходного напряжения $u_A(t)$, а также крутизна переднего фронта переходного напряжения $du_A(t)/dt$, определяемые, в основном, разрядной составляющей $u_{0p}(t)$.

Использование в качестве информационного параметра длительности первой полуволны переходного напряжения $u_A(t)$, при малых потерях в контуре ОЗЗ равной $T_p/4$ и зависящей как от суммарного емкостного тока сети, так и от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, по рассмотренным выше причинам неэффективно.

Из (2.22) можно видеть, что зависимость контролируемой величины от указанных параметров можно исключить, если измерения мгновенных значений переходного напряжения $u_A(t)$ осуществлять в моменты перехода тока $i_0(t)$ через нулевое значение. Для указанных моментов времени из (2.22) получим

$$u_A(t_{0i}) = L_\Sigma \frac{di_0}{dt}(t_{0i}), \quad (2.23)$$

где t_{0i} – моменты перехода тока $i_0(t)$ через нулевое значение ($i = 1, 2, \dots, n$).

Если для моментов времени t_{0i} определить также значения производной переходного тока $i_0(t)$, то из (2.23) получим

$$L_\Sigma(t_{0i}) = \frac{u_A(t_{0i})}{\frac{di_0}{dt}(t_{0i})}. \quad (2.24)$$

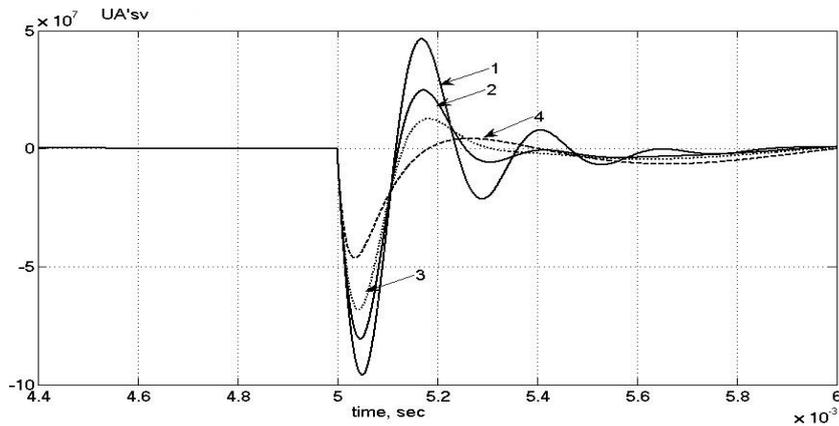
Значения L_Σ , определенные по (2.23), не зависят ни от суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, ни от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, т.е. и от R_L .

Таким образом, используя в качестве информационных параметров мгновенные значения переходного напряжения на поврежденной фазе $u_A(t)$ и производной переходного тока $i_0(t)$, измеренные в моменты перехода последнего через нулевое значение, в принципе можно обеспечить независимость измерений расстояния до места ОЗЗ от основных влияющих факторов – суммарного емкостного тока сети и активных потерь в контуре тока ОЗЗ.

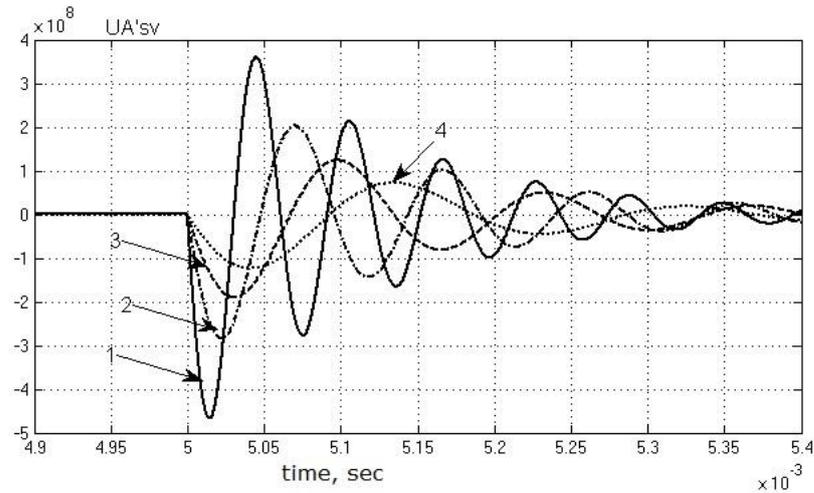
Отметим, что для реализации данного способа, кроме измерения переходного напряжения на поврежденной фазе требуется также измерение переходного тока нулевой последовательности $i_0(t)$. В кабельных сетях 6–10 кВ для измерения тока $3i_0$ могут быть использованы только кабельные ТТНП, погрешности которых в переходных режимах ОЗЗ не исследованы.

2.2.9 Использование для определения места ОЗЗ параметров производных переходного напряжения $u_\phi(t)$. Для первой производной напряжения $u_\phi(t)$ в каче-

стве основных параметров, зависящих от расстояния до места ОЗЗ, в принципе могут быть использованы амплитуда U_{Imax} и длительность 1-й полуволны разрядных колебаний $T_p/4$. Однако указанные параметры зависят от величины суммарного емкостного тока сети и активных потерь в контуре тока ОЗЗ, следовательно, и от переходного сопротивления в месте повреждения (рисунок 2.15).



а)



б)

Рисунок 2.15 – Зависимости производной свободных составляющих напряжения на поврежденной фазе для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $L_\Sigma = 1$ км при $\varphi = 90^\circ$:

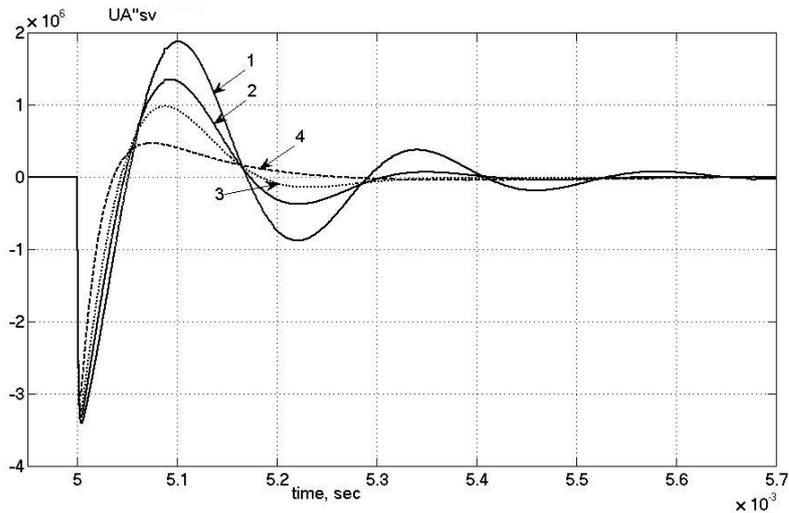
а – от R_{II} при $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $R_{II} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{II} = 1$ Ом; 3 – $R_{II} = 2$ Ом; 4 – $R_{II} = 5$ Ом

б – от $I_{c\Sigma}$ при $R_{II} = 0,1$ Ом: 1 – $I_{c\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{c\Sigma} = 50$ А

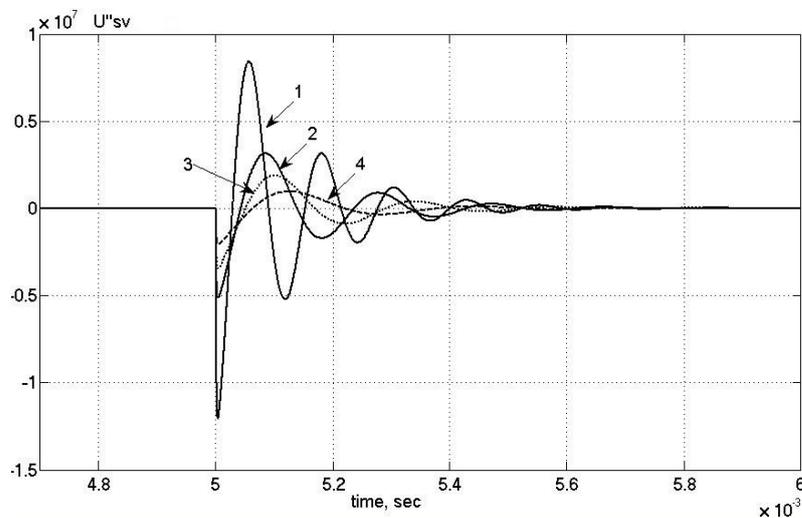
Из (2.22) с учетом (2.18) при $\omega_p^2 \gg \omega_3^2$, $\omega_3^2 \gg \omega^2$, $\omega_p^2 \gg \omega^2$ можно получить следующее выражение для начального значения второй производной переходного напряжения на поврежденной фазе:

$$\frac{d^2 u_A}{dt^2}(0) = -L_{\Sigma} C_0 U_m \sin \varphi \cdot a_1 \omega_p^4 \approx -L_{\Sigma} C_0 U_m \sin \varphi \frac{\omega_1^2}{\omega_p^2} \omega_p^4 \approx -U_m \sin \varphi \cdot \omega_p^2. \quad (2.25)$$

По выражению (2.25) можно видеть, что $u''_{\phi}(0)$ не зависит от переходного сопротивления, однако зависит от суммарного емкостного тока сети (рисунок 2.16), а также начальной фазы пробоя изоляции φ .



а)



б)

Рисунок 2.16 – Зависимости второй производной свободных составляющих напряжения

на поврежденной фазе для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $l_3 = 1$ км при $\varphi = 90^\circ$

а – от R_{II} при $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $R_{II} = 0,1$ Ом; 2 – $R_{II} = 1$ Ом; 3 – $R_{II} = 2$ Ом; 4 – $R_{II} = 5$ Ом

б – от $I_{c\Sigma}$ при $R_{II} = 0,1$ Ом: 1 – $I_{c\Sigma} = 10$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 20$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 4 – $I_{c\Sigma} = 50$ А

2.3 Нормирование электрических величин переходного процесса

Как уже отмечалось выше, значения таких параметров электрических величин переходного процесса, как амплитуды первых полуволн или первых максимумов переходных токов и напряжений, а также начальные значения производных переходных токов и напряжений, зависят от начальной фазы пробоя изоляции φ , что приводит к усложнению алгоритмов вычисления расстояния до места повреждения. Для исключения зависимости контролируемых параметров электрических величин переходного процесса от начальной фазы пробоя изоляции φ можно использовать "нормированные" значения тока и напряжения.

В разделе 2.2 показано, что амплитуды свободных составляющих переходного тока и напряжения при отсутствии смещения нейтрали сети в момент пробоя изоляции ($u_N(0) = 0$) пропорциональны значению напряжения на поврежденной фазе $u(0) = U_m \sin \varphi$. Измеряя и фиксируя напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции, определяют значение нормирующего коэффициента по выражению

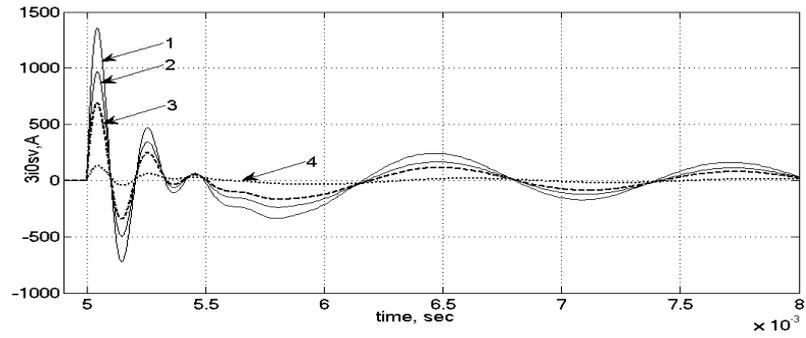
$$K_{\text{норм}} = \sin \varphi = \frac{u(0)}{U_m}. \quad (2.26)$$

Нормированные значения контролируемых величин определяются по выражению

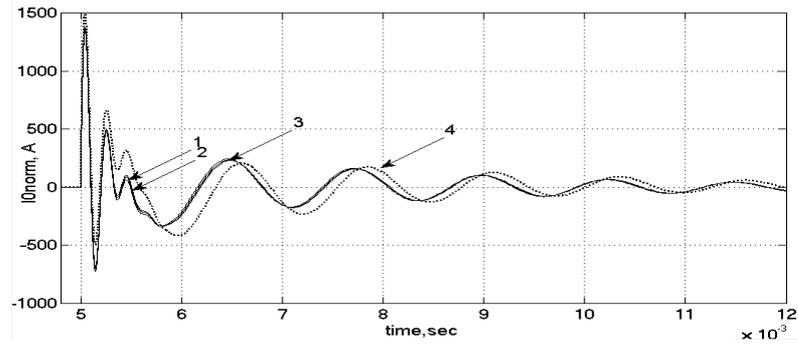
$$a(t)_{\text{норм}} = \frac{a(t)}{K_{\text{норм}}}. \quad (2.27)$$

Из (2.26) и (2.27) можно видеть, что нормирование означает перерасчет замеренных мгновенных значений контролируемых величин к значениям, которые они бы имели при пробое изоляции в момент максимума напряжения поврежденной фазы, т.е. при $\varphi = 90^\circ$.

На рисунках 2.17 и 2.18 приведены расчетные зависимости переходного тока $i_0(t)$ и переходного напряжения $u_0(t)$, иллюстрирующие применение рассмотренного способа нормирования.

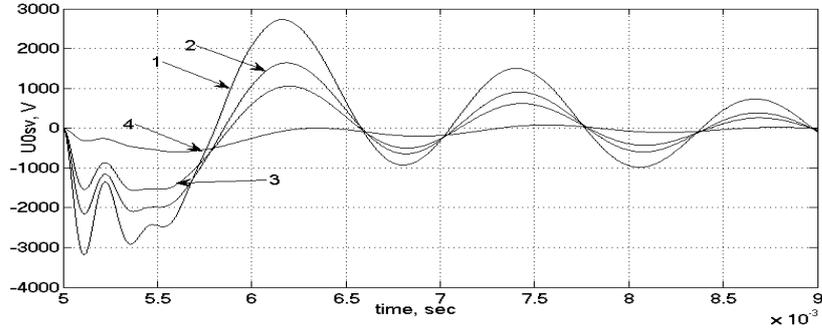


а)

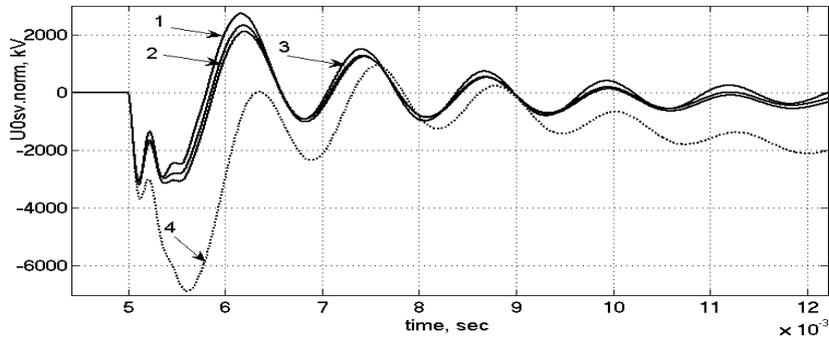


б)

Рисунок 2.17 – Зависимости ненормированной (а) и нормированной (б) свободной составляющей $3i_0$ от начальной фазы пробоя φ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, суммарным емкостным током $I_{c\Sigma} = 30$ А при удаленности ОЗЗ $l_3 = 0,8$ км при $l_3 = 0,8$ км: 1 – $\varphi = 90^\circ$; 2 – $\varphi = 45^\circ$; 3 – $\varphi = 30^\circ$; 4 – $\varphi = 5^\circ$



а)



б)

Рисунок 2.18 – Зависимости ненормированной (а) и нормированной (б) свободной составляющей $3u_0$ от начальной фазы пробоя φ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, суммарным емкостным током $I_{c\Sigma} = 30$ А: 1 – $\varphi = 90^\circ$; 2 – $\varphi = 45^\circ$; 3 – $\varphi = 30^\circ$; 4 – $\varphi = 5^\circ$

Из рисунков 2.17 и 2.18 можно видеть, что предложенный подход к нормированию измеренных значений электрических величин переходного процесса практически исключает зависимость информационных параметров от начальной фазы пробоя изоляции φ , однако дает существенные погрешности при малых углах пробоя порядка $5-10^0$. Учитывая, что подавляющая часть пробоев изоляции возникает при значениях угла φ , близких к $\pi/2$, указанные погрешности можно считать несущественными.

При дуговых перемежающихся ОЗЗ мгновенное значение напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции определяется не только углом φ , но и смещением нейтрали $u_N(t_{np})$. Поэтому в общем случае значение нормирующего коэффициента должно при каждом повторном пробое изоляции по выражению

$$K_{норм} = \frac{u(t_{np})}{U_m} = \frac{U_m \sin \varphi - u_N(t_{np})}{U_m}, \quad (2.28)$$

где t_{np} – момент пробоя изоляции.

2.4 Общая оценка возможностей использования электрических величин переходного процесса для решения задачи определения места повреждения при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

2.4.1 Общая оценка возможностей использования переходных токов и напряжений для решения задачи ДОМЗЗ на основе метода ПАР. Проведенный анализ информационных параметров электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы КЛ на землю, позволяет сделать следующие предварительные выводы:

1) для определения места (зоны) повреждения при ОЗЗ на основе способа одностороннего замера ПАР в принципе могут быть использованы такие параметры электрических величин переходного процесса, как начальные значения, амплитуды первых максимумов или первых полувольт, соответствующие им

моменты времени или длительности первых полуволн переходного напряжения нулевой последовательности, переходного тока нулевой последовательности, переходного напряжения поврежденной фазы или их производных, однако значения большей части перечисленных параметров зависят от величины суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, т.е. режимов ее работы, а также коэффициентов затухания свободных составляющих переходного тока и напряжений, определяемых активными потерями в контуре тока ОЗЗ;

2) наибольший интерес в аспекте использования для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ представляет начальное значение производной переходного тока нулевой последовательности $i'_0(0)$, которое не зависит от величины $I_{c\Sigma}$ и практически не зависит от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, однако фиксация того значения требует применения пусковых органов устройства ДОМЗЗ с очень высоким быстродействием;

3) более точную оценку расстояния до места ОЗЗ, на наш взгляд, можно получить на основе замера переходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в моменты времени, соответствующие переходу последнего через нулевые значения;

4) в кабельных сетях 6–10 кВ с достаточно стабильным составом присоединений и значением суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ для определения места (зоны) повреждения при ОЗЗ может быть использовано переходное напряжение нулевой последовательности $u_0(t)$ и переходное напряжение на поврежденной фазе, начальные значения вторых производных которых практически не зависят от активных потерь в контуре тока ОЗЗ;

5) зависимость параметров электрических величин переходного процесса от начальной фазы пробоя изоляции можно устранить, применяя нормирование мгновенных значений измеренных токов и напряжений;

6) на точность оценки расстояния до места замыкания на землю на основе методов ПАР существенное влияние может оказывать точность передачи переходных токов и напряжений первичными преобразователями тока и напряжения,

применяемыми в кабельных сетях 6–10 кВ для устройств РЗА (ТТНП и ТНКИ), что требует исследования их погрешностей в переходных режимах ОЗЗ.

2.4.2 Особенности использования электрических величин переходного процесса при решении задачи ДОМЗЗ на основе метода АМО. При решении задачи ДОМЗЗ с использованием метода АМО влияние погрешностей измерения переходных токов, вносимых первичными преобразователями тока – кабельными ТТНП, в принципе может быть скомпенсировано включением в модель контролируемого объекта модели ТТНП.

2.5 Выводы по главе 2

2.5.1 С учетом технических возможностей измерения электрических величин в переходных режимах ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для решения задачи ДОМЗЗ могут быть использованы ток и напряжение нулевой последовательности и фазные напряжения.

2.5.2 На значения электрических величин переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ наиболее существенное влияние оказывают суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$, активные потери в контуре тока ОЗЗ, а также начальная фаза напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции.

2.5.3 Влияние начальной фазы напряжения на значения контролируемых электрических величин переходного процесса при ОЗЗ практически можно исключить их нормированием по значению напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции.

2.5.4 С учетом пп. 2.5.2 и 2.5.3 для определения места (зоны) повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ на основе одностороннего замера целесообразно использовать параметры электрических величин переходного процесса, значения которых не зависят от $I_{c\Sigma}$ и коэффициентов затухания свободных составляющих пере-

ходных токов и напряжений, определяемых активными потерями в контуре тока ОЗЗ.

2.5.5 На основе исследований, выполненных с использованием аналитической модели переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, показано, что свойствами по п. 2.5.4 обладает начальное значение производной переходного тока нулевой последовательности $i'_o(0)$, которое не зависит от величины $I_{c\mathcal{L}}$ и практически не зависит от активных потерь в контуре тока ОЗЗ, однако фиксация значения $i'_o(0)$ требует применения пусковых органов устройства ДОМЗЗ с очень высоким быстродействием.

2.5.6 Более точную оценку расстояния до места ОЗЗ, на наш взгляд, можно получить на основе замера переходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_o(t)$ в моменты времени, соответствующие переходу последнего через нулевые значения.

2.5.7 На точность оценки расстояния до места замыкания на землю на основе методов ПАР существенное влияние может оказывать точность передачи переходных токов и напряжений первичными преобразователями тока и напряжения, применяемыми в кабельных сетях 6–10 кВ для устройств РЗА (ТТНП и ТНКИ), что требует исследования их погрешностей в переходных режимах ОЗЗ.

2.5.8 При решении задачи ДОМЗЗ с использованием метода АМО влияние погрешностей измерения переходных токов, вносимых первичными преобразователями тока – кабельными ТТНП, в принципе может быть скомпенсировано включением в модель контролируемого объекта модели ТТНП.

Основные результаты исследований данной главы отражены в публикациях [94, 96, 102, 106].

Глава 3 **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ**

3.1 Постановка задач и обоснование методов исследования

3.1.1 Состояние проблемы. С учетом технических возможностей измерения электрических величин в переходных режимах ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для решения задачи ДОМЗЗ, как было показано в главе 2, могут быть использованы ток и напряжение нулевой последовательности и фазные напряжения. Для измерения тока нулевой последовательности в целях ДОМЗЗ на КЛ 6–10 кВ могут быть использованы только кабельные ТТНП, предназначенные для подключения устройств защиты от ОЗЗ, для измерений напряжения нулевой последовательности и фазных напряжений – ТНКИ, предназначенные для подключения цепей напряжения устройств РЗА и измерительных приборов. Следует отметить также, что технически не представляется сложной установка на КЛ 6–10 кВ ТТ и в третьей фазе (фазе "В"), что позволяет использовать для целей ДОМЗЗ замер фазных токов.

Указанные первичные электромагнитные преобразователи тока и напряжения предназначены в основном для измерения электрических величин либо только на рабочей частоте 50 Гц, либо в ограниченном диапазоне частот, тогда как на точность оценки расстояния до места ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с применением рассматриваемых в данной работе методов значительное влияние может оказывать точность их работы в переходных режимах ОЗЗ. Точность работы электромагнитных преобразователей тока и напряжения в переходных режимах ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ определяется прежде всего их амплитудно- и фазочастотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ).

Частотные характеристики ТН 6–10 кВ нормированы в ограниченном диапазоне частот согласно требованиями РД 153-34.0-15.501-00 [217]. В частности, указано, что неравномерность АЧХ указанных ТН в полосе частот до 2 кГц не

должна превышать 2%. Экспериментальные исследования частотных характеристик ТН 6–10 кВ подтверждают, что в указанном диапазоне частот амплитудная погрешность трансформаторов напряжения не превышает 1%, а угловая погрешность 1° [например, 218]. Однако в переходных режимах ОЗЗ частоты разрядных составляющих токов и напряжений, наиболее существенно зависящих от расстояния до места ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, могут иметь большие, чем 2 кГц, значения.

Частотные характеристики электромагнитных ТТ и ТТНП в диапазоне частот, превышающих 50 Гц, не нормируются, однако их учет необходим при решении ряда задач, в частности, связанных с разработкой принципов выполнения релейной защиты и устройств ОМП на основе волновых методов [158, 161, 219]. Как показали исследования, проведенные в ЭНИН, электромагнитные ТТ имеют погрешность по АЧХ не более 5% и по ФЧХ не более 10° в частотном диапазоне до 500 кГц, что считается приемлемым для решения с требуемой точностью задачи ОМП при КЗ на ВЛ высокого напряжения [161, 219]. Указанные исследования показали также, что частотные характеристики электромагнитных ТН высокого напряжения 110–220 кВ обеспечивают приемлемую точность измерений в значительно более узкой полосе частот – до нескольких кГц, однако точная оценка данной полосы частот в [161, 219] не приводится.

Для электромагнитных ТН, ТТ и ТТНП, применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ, экспериментальные оценки их частотных характеристик в области повышенных частот, характерных для переходных токов и напряжений при ОЗЗ, в доступных источниках информации отсутствуют, потому получение таких оценок, как основы для разработки и проверки адекватности математических моделей, необходимых для комплексной оценки влияния различных факторов на точность решения задачи ДОМЗЗ, является актуальным.

3.1.2 О требованиях к точности первичных преобразователей тока и напряжения в переходных режимах ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. При решении задачи ОМП при КЗ на ВЛ высокого напряжения для электромагнитных ТТ и ТН в области частот, превышающих промышленную частоту 50 Гц, прием-

лемыми считаются погрешности по АЧХ до 5% и по ФЧХ не более 10^0 [161, 219]. В главе 1 показано, что к точности ОМП при ОЗЗ на КЛ 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, в общем случае предъявляются менее жесткие требования, чем к ОМП на ВЛ, так как основной задачей ДОМЗЗ в распределительных кабельных сетях среднего напряжения является определение поврежденного участка (зоны), а точное место повреждения определяется с использованием известных методов диагностирования КЛ после отключения ее от сети. Учитывая это, для задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в переходных режимах ОЗЗ, на наш взгляд, приемлемыми можно считать погрешности электромагнитных ТТ и ТН в рабочем частотном диапазоне по АЧХ в пределах до 10% и по ФЧХ не более 10^0 .

Указанные требования должны учитываться при экспериментальных оценках допустимого рабочего диапазона частот электромагнитных ТТ, ТТНП и ТН, применяемых в схемах устройств ДОМЗЗ, и при разработке их математических моделей.

3.1.3 Основные задачи исследований, решаемые в данной главе, и методы исследований. Экспериментальные методы позволяют исследовать частотные характеристики электромагнитных ТН, ТТ и ТТНП в ограниченном диапазоне первичных токов и напряжений. Поэтому исследование влияния погрешностей первичных электромагнитных преобразователей тока и напряжения при больших значениях токов и напряжений, характерных переходным процессам при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, возможно только с использованием их математических моделей.

Полученные на основе экспериментальных исследований и исследований на математических моделях оценки диапазонов частот, в которых первичные электромагнитные преобразователи тока и напряжения могут обеспечить требуемую для решения задачи ДОМЗЗ точность, должны быть сопоставлены с диапазоном частот основной частотной составляющей разрядного тока переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

С учетом изложенного, для исследования влияния погрешностей первичных электромагнитных преобразователей тока и напряжения на точность методов ДОМЗЗ, основанных на использовании параметров электрических величин переходного процесса, должны быть решены следующие основные задачи:

1) экспериментальные исследования частотных характеристик электромагнитных ТНКИ, ТТ и ТТНП, применяемых для подключения по цепям тока и напряжения устройств ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, для оценки диапазона частот, в котором может быть обеспечена требуемая точность измерений электрических величин переходного процесса;

2) анализ спектра переходных токов и напряжений при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для обоснования рабочего диапазона частот устройств ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходных процессов;

3) разработка имитационных моделей ТТНП, ТТ и ТНКИ для исследований влияния их погрешностей (в сочетании с другими влияющими факторами) на точность параметрических ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

3.2 Экспериментальный анализ частотных характеристик электромагнитных трансформаторов тока и напряжения, применяемых при определении места замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

3.2.1 Методы и схемы экспериментальных исследований частотных характеристик электромагнитных ТНКИ и кабельных ТТНП. Схемы установок для исследования частотных характеристик ТНКИ и ТТНП приведены на рисунках 3.1 и 3.2.

В качестве генератора ГС в схемах по рисункам 3.1 и 3.2 использовался генератор сигналов специальной формы типа Г6-31, обеспечивающий получение сигналов синусоидальной формы с частотой $f_c = 0 \dots 100$ кГц и $U_{\text{вых}} = 0 \dots 1$ В. Усили-

тель сигналов У типа LV 103 с полосой пропускания $f_{\text{пр}} = 3 \dots 80$ кГц предназначен для увеличения уровня напряжения до 15 В. Для измерения входных и выходных сигналов использовался цифровой осциллограф типа Tektronix TPS 2024B ($f_{\text{пр}} = 200$ МГц), вольтметр типа Instek GDM 78261 (базовая погрешность $\pm 0,0035\%$), измерительный шунт $R_{\text{ш}}$ класса точности 0,2.

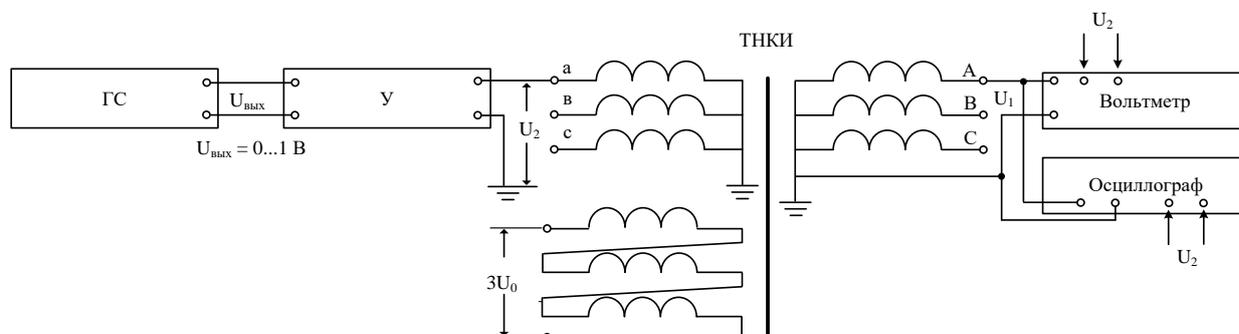


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки для снятия частотных характеристик ТНКИ: ГС – генератор входных сигналов напряжения; У – усилитель сигналов; ТНКИ – электромагнитный трехфазный трансформатор напряжения контроля изоляции

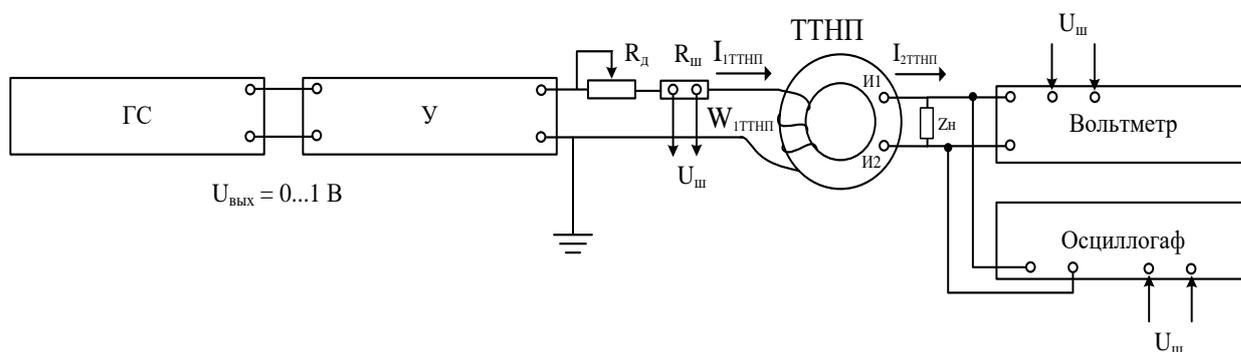


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки для снятия частотных характеристик кабельных ТТНП: ГС генератор входных сигналов; У – усилитель сигналов; R_d – добавочное сопротивление; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление измерительного шунта; ТТНП – кабельный трансформатор тока нулевой последовательности

3.2.2 Частотные характеристики ТНКИ. В кабельных сетях 6–10 кВ для измерения фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности, как правило, применяются ТНКИ типа НТМИ-6(10)-66.

Для проверки достоверности экспериментальных измерений были получены АЧХ и ФЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в нормируемом в соответствии с РД 153-34.0-15.501-00 [217] диапазоне частот до 2 кГц (рисунки 3.3, 3.4).

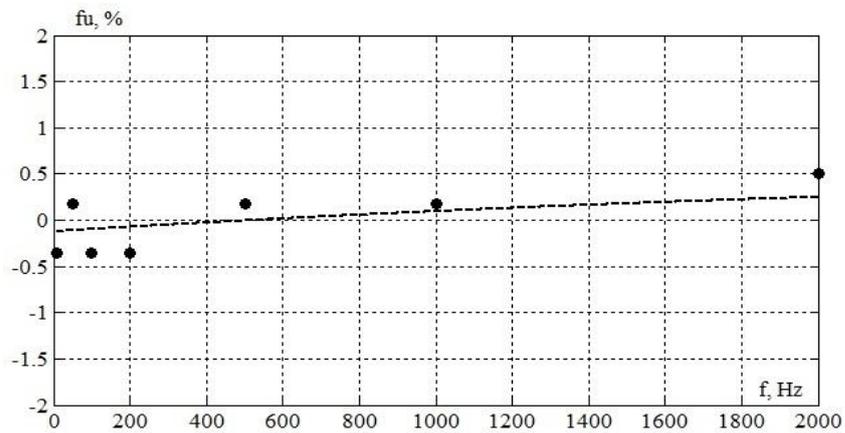


Рисунок 3.3 – АЧХ трансформатора напряжения НТМИ-6-66 в режиме холостого хода
в диапазоне частот до 2 кГц

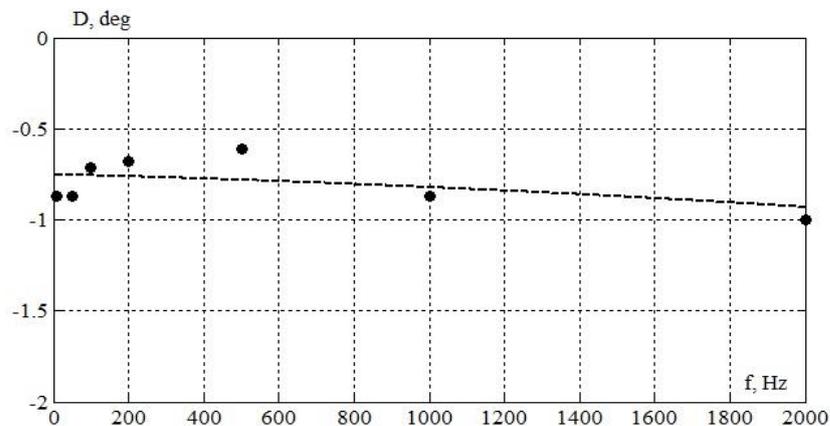


Рисунок 3.4 – ФЧХ трансформатора напряжения в режиме холостого хода
в диапазоне частот до 2 кГц

Из рисунков 3.3 и 3.4 можно видеть, что в нормируемом диапазоне частот до 2 кГц неравномерность АЧХ не превышает 2%, т.е. соответствует требованиям РД 153-34.0-15.501-00. Полученные АЧХ и ФЧХ также хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований частотных характеристик НТМИ-6-66, приведенными в [218]: в указанном диапазоне частот амплитудная погрешность не превышает 1%, а угловая погрешность 1° . Соответствие полученных АЧХ и ФЧХ для НТМИ-6-66 требованиям нормативных документов (РД 153-34.0-15.501-00 [217]), а также совпадение оценок амплитудной и угловой погрешностей в диапазоне частот до 2 кГц с данными других исследователей подтверждает достоверность используемой в работе методики экспериментальных исследований частотных характеристик электромагнитных ТНКИ.

На рисунках 3.5 и 3.6 приведены полученные экспериментально АЧХ и ФЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в диапазоне частот до 90 кГц.

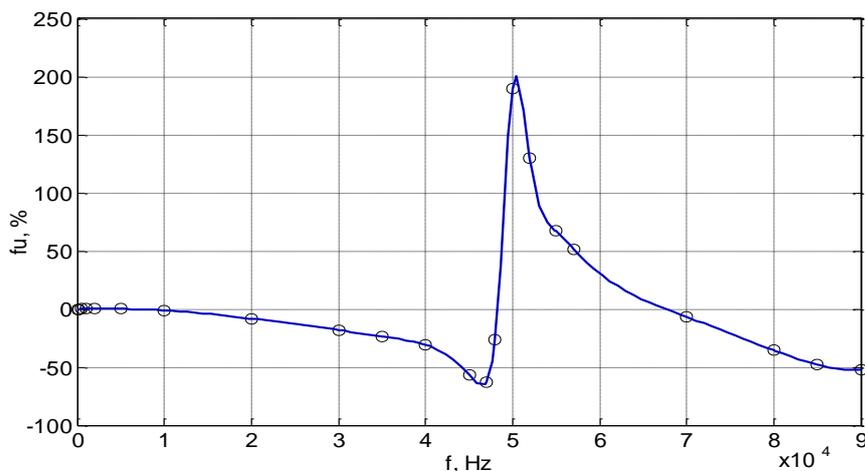


Рисунок 3.5 – АЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в режиме холостого хода в диапазоне частот до 90 кГц

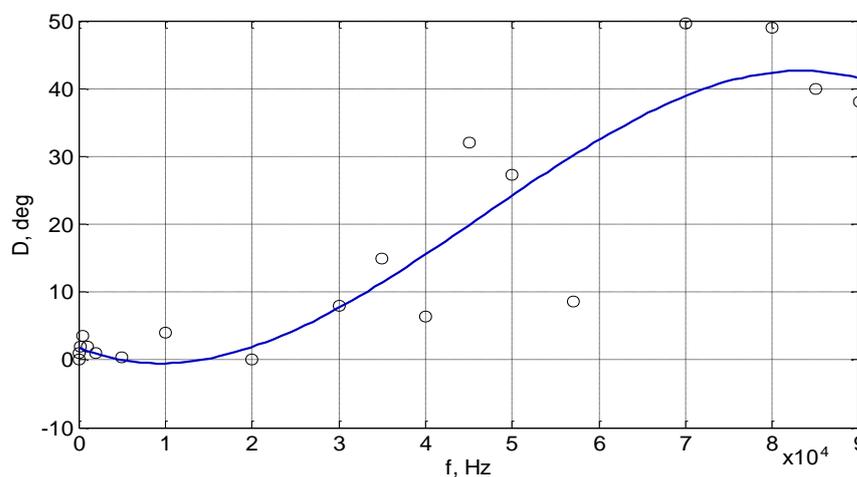


Рисунок 3.6 – ФЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в режиме холостого хода в диапазоне частот до 90 кГц

Из рисунков 3.5 и 3.6 можно видеть, что ТНКИ, применяемые в кабельных сетях 6–10 кВ, могут обеспечить приемлемую точность измерений только в диапазоне частот до $f \leq \sim 15\text{--}20$ кГц. При больших частотах неравномерность АЧХ и угловая погрешность ТНКИ резко возрастает из-за влияния емкостей обмоток и межобмоточных емкостей и обусловленных этим влиянием резонансных явлений.

На рисунках 3.7 и 3.8 приведена детализация АЧХ и ФЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в диапазоне частот до 20 кГц. Из зависимостей рис. 3.7 и 3.8. можно видеть, что в диапазоне частот до 10 кГц амплитудная погреш-

ность ТНКИ не превышает 2%, угловая погрешность до 4°; в диапазоне частот до 15 кГц – соответственно 4% и 6°; в диапазоне частот до 20 кГц – 9% и 10°.

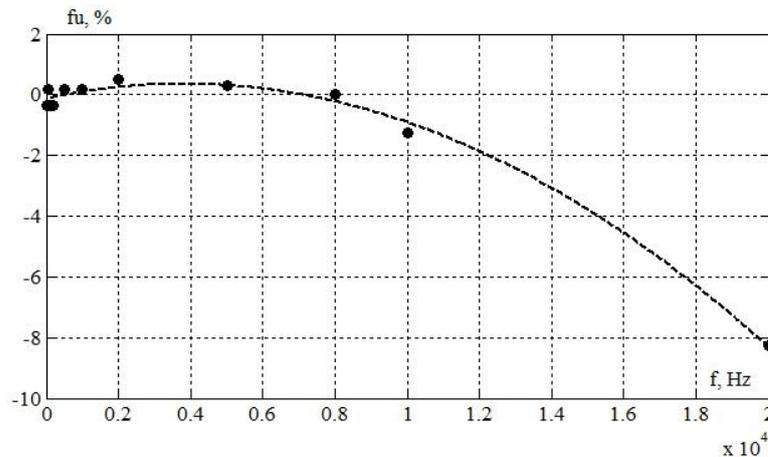


Рисунок 3.7 – АЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в режиме холостого хода в диапазоне частот до 20 кГц

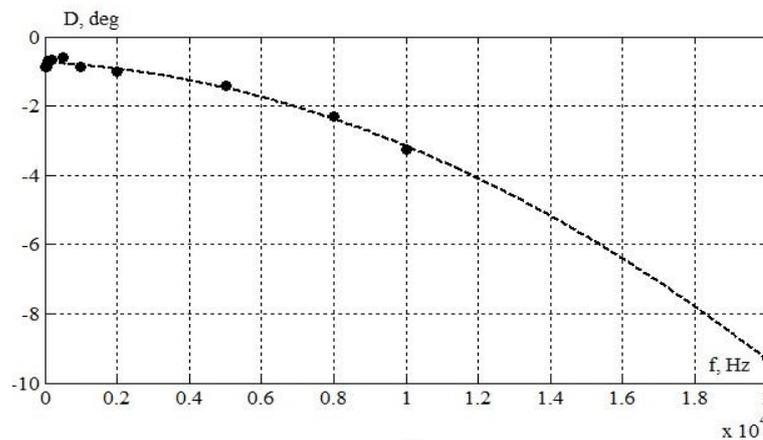


Рисунок 3.8 – ФЧХ трансформатора напряжения типа НТМИ-6-66 в режиме холостого хода в диапазоне частот до 20 кГц

Таким образом, с учетом приведенных в п. 3.1.2 требований к точности первичных преобразователей напряжения и тока рабочий диапазон частот устройств ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходных процессов при ОЗЗ, в кабельных сетях 6–10 кВ должен быть ограничен верхней частотой $f \leq \sim 20$ кГц.

3.2.3 Частотные характеристики кабельных ТТНП. Для подключения устройств защиты от ОЗЗ на КЛ 6–10 кВ используются простые ТТНП, охватывающие один или в некоторых случаях два кабеля. Наиболее широкое применение получили однокабельные ТТНП с замкнутым магнитопроводом типа ТЗЛМ. Разъемные однокабельные ТТНП типа ТЗРЛ обеспечивают значительно худшие

характеристики в части чувствительности устройств защиты от ОЗЗ и потому получили значительно меньшее применение в кабельных сетях 6–10 кВ. С учетом этого исследовались частотные характеристики наиболее широко применяемого ТТНП типа ТЗЛМ.

В отличие от фазных ТТ для кабельных ТТНП отсутствует понятие "номинальная вторичная нагрузка". ТТНП предназначены для подключения реле и устройств защиты от ОЗЗ, входное сопротивление которых может иметь значение от сотых долей до десятков Ом. Большие значения сопротивления вторичной нагрузки ТТНП – от единиц до десятков Ом – имеют место при использовании в защите от ОЗЗ электромеханических реле тока (например, РТ-40, ЭТД-551) и некоторых исполнений устройств защиты от ОЗЗ на электронной базе (УСЗ-2/2, ЗЗП-1, РТЗ-50). Современные микроэлектронные исполнения реле и устройств защиты от ОЗЗ имеют входное сопротивление по цепям тока, не превышающее значение ~ 1 Ом (например, реле тока типа РТЗ-51). Для микропроцессорных исполнений чувствительной защиты от ОЗЗ входное сопротивление по цепям тока с учетом сопротивления вторичных проводов и контактных соединений, как правило, не превышает значений порядка десятых долей Ом и имеет практически активный характер. Так как с уменьшением вторичной нагрузки ТТНП токовая и угловые погрешности уменьшаются, при экспериментальных исследованиях частотных характеристик кабельных ТТНП с некоторым запасом было принято, что $Z_n \approx R_n \leq 1$ Ом ($\cos \varphi_n \approx 1$).

На рисунках 3.9 и 3.10 приведены полученные экспериментально АЧХ и ФЧХ ТТНП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_n = 1$ Ом при различных значениях первичного тока $I_{1\text{ТТНП}}$.

Из зависимостей (рисунки 3.9 и 3.10) можно видеть, что в диапазоне частот первичного тока от ~ 3 –5 кГц (минимальная частота разрядных колебаний при ОЗЗ в кабельных сетях) до 30 кГц для ТТНП типа ТЗЛМ характерна незначительная степень неравномерности АЧХ и ФЧХ, при этом токовая (амплитудная) погрешность не превышает 3–5%, а угловая $\sim 1^\circ$. Таким образом, в указанном диапазоне частот кабельные ТТНП с замкнутым магнитопроводом способны обеспечить достаточную для решения задачи ДОМЗЗ точность преобразования в диапазоне частот первичных токов нулевой последовательности.

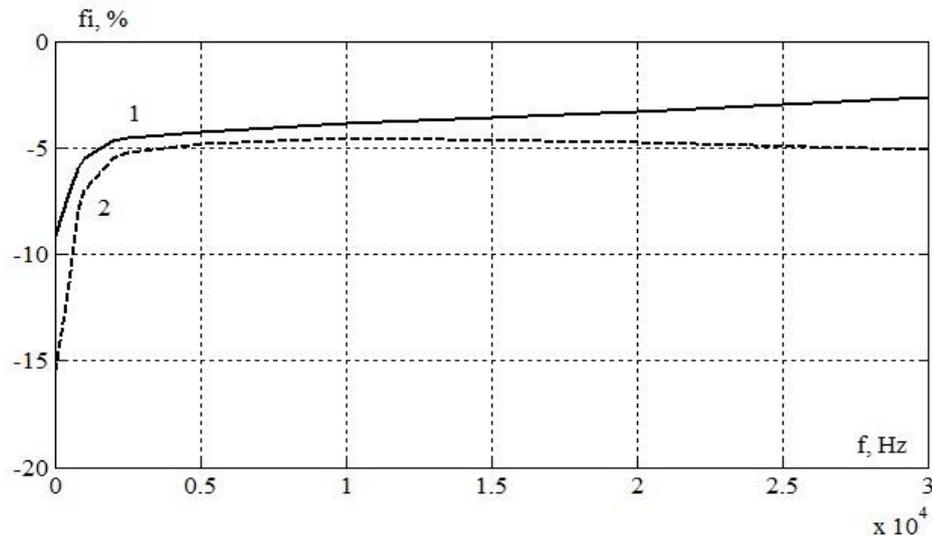


Рисунок 3.9 – АЧХ ТТП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_n = 1$ Ом: 1 – $I_{IТТП} = 50$ А; 2 – $I_{IТТП} = 10$ А

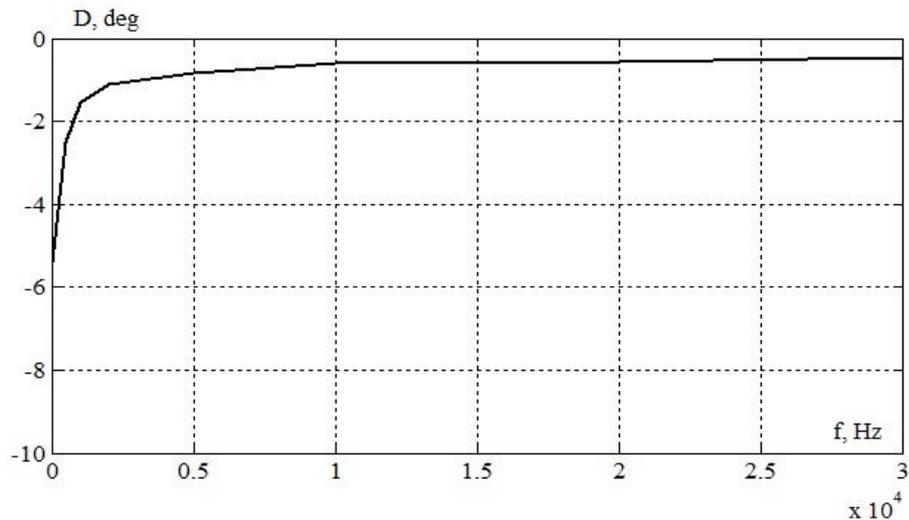


Рисунок 3.10 – ФЧХ ТТП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_n = 1$ Ом и значениях первичного тока $I_{IТТП} = 10$ и 50 А (характеристики практически совпадают)

Следует отметить, что экспериментальные АЧХ и ФЧХ ТТП типа ТЗЛМ получены в ограниченном диапазоне значений первичного тока, не позволяющем (при малых вторичных нагрузках) достичь насыщения магнитопровода. Амплитуда разрядных составляющих переходного тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ может достигать тысяч Ампер [143, 219]. Исследование точности работы ТТП при таких значениях первичного тока возможно только с использованием их математических моделей.

3.2.4 Общая оценка метрологических свойств современных электромагнитных ТНКИ и ТТП и задачи их совершенствования. С учетом приведен-

ных выше результатов экспериментального анализа частотных характеристик современных электромагнитных ТНКИ рабочий диапазон частот устройств ДОМЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ должен быть ограничен "сверху" частотой ~20 кГц. Необходимость ограничения рабочего диапазона частот в устройствах ДОМЗЗ "сверху" до 20 кГц в некоторых случаях, прежде всего, в кабельных сетях, содержащих в основном КЛ малой протяженности, может привести к существенным погрешностям в определении места повреждения, а также к уменьшению технического совершенства устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса. Потому в аспекте решения комплексной задачи локации всех разновидностей ОЗЗ, включающей определение поврежденного присоединения и дистанционное определение места повреждения, актуальной, на наш взгляд, является задача разработки и создания для электрических сетей среднего напряжения более совершенных первичных преобразователей напряжения, обеспечивающих высокую точность не только в стационарных, но и в переходных режимах. Такие разработки должны составить предмет дальнейших исследований

В отличие от ТНКИ кабельные ТТНП с замкнутым магнитопроводом (например, типа ТЗЛМ и ТЗЛ) способны обеспечить приемлемую точность преобразования переходных токов ОЗЗ в более широком диапазоне частот. Однако большинство других исполнений кабельных ТТНП отечественного производства, прежде всего, с разъемным магнитопроводом, обладают значительно худшими метрологическими характеристиками по сравнению с ТЗЛМ как на рабочей частоте 50 Гц, так и в области высоких частот [220]. Потому является актуальной задача повышения качества отечественных ТТНП в направлении, обеспечивающем улучшение их метрологических характеристик не только на рабочей частоте 50 Гц, но и в области повышенных частот.

Актуальными являются и задачи совершенствования расчетных математических моделей ТТНП и ТНКИ, необходимых исследователям и проектировщикам.

3.3 Анализ диапазона частот свободных составляющих переходных токов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

3.3.1 Приближенная оценка диапазона частот разрядной и зарядной составляющих токов переходного процесса при ОЗЗ на основе аналитического решения. Приближенную оценку диапазона частот разрядной и зарядной составляющих токов и напряжений переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ можно получить на основе аналитического решения, полученного в [214] и приведенного в подразделе 2.2 второй главы.

Из выражения (2.3) для схемы замещения радиальной кабельной сети, приведенной на рисунке 2.1, получим следующие выражения для расчета частоты основной разрядной f_p и частоты зарядной f_3 составляющих переходного процесса при ОЗЗ:

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (3.1)$$

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}, \quad (3.2)$$

где ω_1^2 , ω_2^2 , k_c – то же самое, что и в (2.1)–(2.3).

В [214], отмечается, что применение двухчастотной схемы замещения позволяет получить достаточно точные оценки параметров разрядной и зарядной составляющих только при удаленных от шин ОЗЗ на расстояние l_3 порядка нескольких десятков метров. При близких к шинам ОЗЗ процессы разряда емкостей поврежденной фазы всех неповрежденных линий имеют явно выраженный волновой характер и протекают практически независимо друг от друга с частотами, определяемыми длиной указанных линий и скоростью распространения электромагнитной волны в кабельных линиях. В этом случае в разрядном токе в поврежденной линии, равном сумме разрядных токов всех неповрежденных линий, разрядный ток имеет явно выраженный многочастотный характер, в котором выделить основную (доминирующую) частотную составляющую можно не всегда [214, 221].

По (3.1) и (3.2) выполнены расчеты частот f_p и f_3 при разных значениях основных влияющих факторов: суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, индуктивности источника питания, определяемой током трехфазного тока КЗ на шинах $I_k^{(3)}$ и удаленности пробоа изоляции от шин l_3 . Значения указанных факторов принимались с учетом полученных в первой главе примерных диапазонов изменения основных параметров кабельных сетей, полученных на основе анализа данных по системам электроснабжения некоторых городов РФ. Расчетные приближенные оценки диапазонов изменения частот разрядной f_p и зарядной составляющих f_3 переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ городского электроснабжения приведены в таблице 3.1.

В таблице 3.1: $I_{c\Sigma}$ – суммарный емкостный ток (значение принималось в пределах от 20 до 50 А, что характерно для кабельных сетей, центром питания которых являются ГПП); $F_{КЛ}$ – сечение КЛ (принималось максимальным для КЛ, применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ); $I_k^{(3)}$ – ток трехфазного КЗ на шинах 6–10 кВ ЦП, определяющий индуктивность источника питания; l_3 – расстояние до места ОЗЗ от шин источника питания.

Таблица 3.1 – Расчетные оценки диапазонов изменения частот разрядной f_p и зарядной составляющих f_3 по (3.1) и (3.2) при различных параметрах сети

Параметры сети			Частоты разрядных и зарядных колебаний, Гц				
$I_{c\Sigma}$, А	$F_{КЛ}$, мм ²	$I_k^{(3)}$, кА	$l_3 = 0,05$ км	$l_3 = 0,1$ км	$l_3 = 0,2$ км	$l_3 = 0,5$ км	$l_3 = 1$ км
20	240	10	$f_p = 28942$	$f_p = 20503$	$f_p = 14499$	$f_p = 9204$	$f_p = 6549$
			$f_3 = 985$	$f_3 = 984$	$f_3 = 983$	$f_3 = 979$	$f_3 = 973$
			$f_p = 23623$	$f_p = 16709$	$f_p = 11823$	$f_p = 7491$	$f_p = 5314$
30	240	5	$f_3 = 569$	$f_3 = 568$	$f_3 = 568$	$f_3 = 567$	$f_3 = 565$
		10	$f_p = 23631$	$f_p = 16720$	$f_p = 11838$	$f_p = 7515,3$	$f_p = 5345$
		$f_3 = 804$	$f_3 = 804$	$f_3 = 803$	$f_3 = 800$	$f_3 = 795$	
40	240	20	$f_p = 23646$	$f_p = 16741$	$f_p = 11867$	$f_p = 7563$	$f_p = 5417$
			$f_3 = 1137$	$f_3 = 1135$	$f_3 = 1133$	$f_3 = 1124$	$f_p = 1109$
			$f_p = 20465$	$f_p = 14480$	$f_p = 10251$	$f_p = 6508$	$f_p = 4631$
50	240	10	$f_3 = 696$	$f_3 = 696$	$f_3 = 696$	$f_3 = 693$	$f_3 = 688$
			$f_p = 18304$	$f_p = 12951$	$f_p = 9169$	$f_p = 5821$	$f_p = 4141$
			$f_3 = 623$	$f_3 = 622$	$f_3 = 622$	$f_3 = 620$	$f_3 = 615$

Из данных таблицы 3.1 можно видеть, что главными факторами, определяющими основную частоту f_p разрядного переходного тока ОЗЗ, являются суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$ и удаленность места ОЗЗ l_3 от шин источника питания, а частоту f_3 зарядной составляющей переходного тока – индуктивность источника питания (ток $I_k^{(3)}$ на шинах 6–10 кВ ЦП). При удаленностях l_3 от 100 м и более основная частота разрядного тока в кабельных сетях 6–10 кВ при изменении их параметров в достаточно широких пределах, как правило, не превышает 20 кГц, что в первом приближении соответствует сформулированным выше с учетом частотных характеристик ТНКИ и ТТНП требованиям к рабочему диапазону частот устройств ДОМЗЗ.

3.3.2 Оценка диапазона частот разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ на имитационной модели кабельной сети. Более точную оценку диапазона частот разрядной составляющей переходных токов и напряжений при ОЗЗ позволяют получить исследования с использованием имитационных моделей кабельных сетей, достаточно полно и точно отражающих реальную конфигурацию сети и параметры составляющих ее КЛ. Для таких исследований использовалась модель реальной городской кабельной сети напряжением 6 кВ (рисунок 3.11), созданная для комплексных испытаний разрабатываемых в диссертации способов и алгоритмов ДОМЗЗ (см. главу 4) и выполненная в системе моделирования Matlab.

Центром питания кабельной сети 6 кВ, приведенной на рисунке 3.11, является понизительная подстанция напряжением 110/35/6 кВ (сопротивление трансформаторов подстанции и питающей системы учтено в блоке System). КЛ сети выполнены кабелями с алюминиевыми жилами сечением от 185 до 95 мм² длиной от 50 м до ~1 км.

На рисунке 3.11 отражена только часть присоединений, подключенных к шинам секции 6 кВ питающей подстанции, на которых имитировались ОЗЗ. Все остальные присоединения, подключенные к секции шин 6 кВ, учтены в блоке Net (Сеть). Более подробное описание модели и параметры ее элементов приведены в четвертой главе.

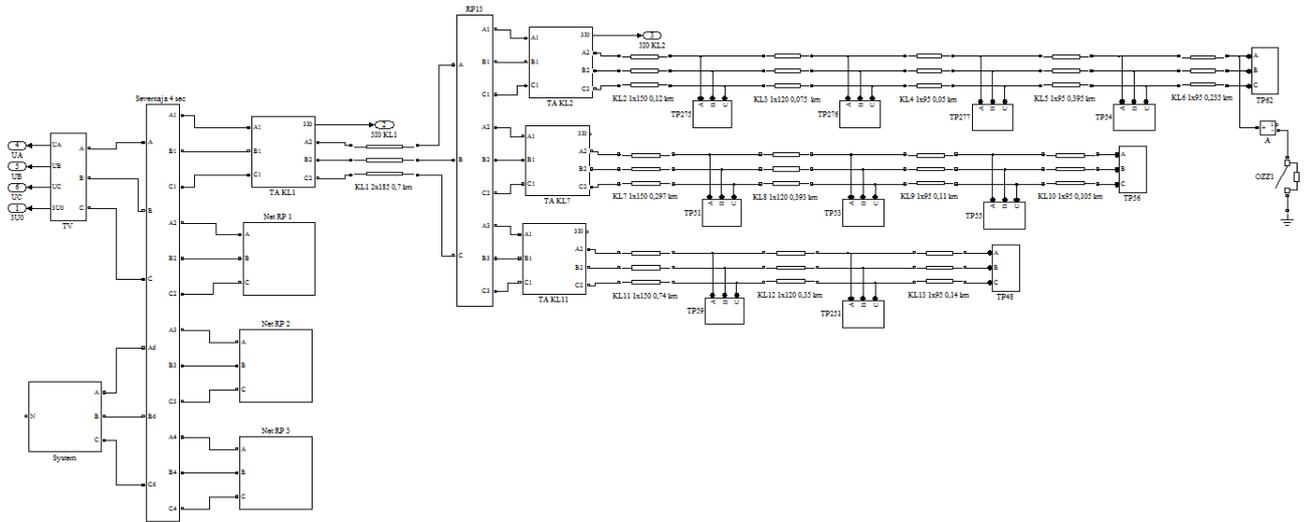
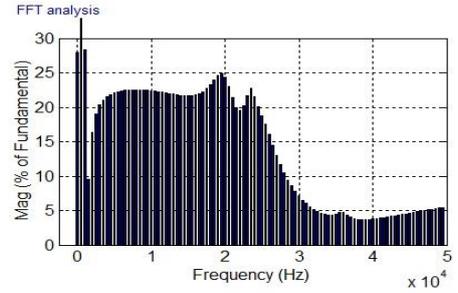
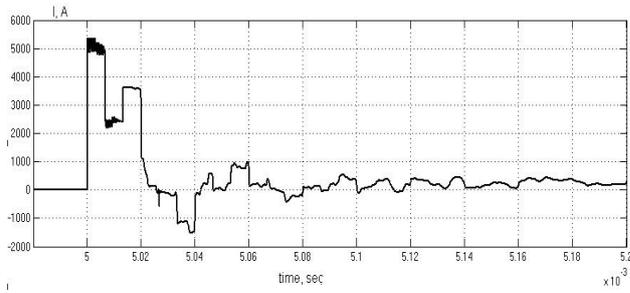


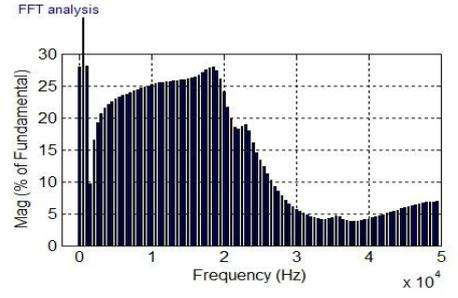
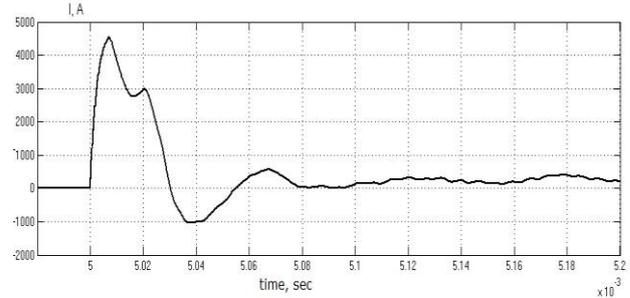
Рисунок 3.11 – Имитационная модель реальной кабельной сети 6 кВ
в системе Matlab

При исследованиях спектра частот переходного тока ОЗЗ моделировались замыкания на землю на кабельной линии KL2 (рисунок 3.11) при различных удаленностях места повреждения от шин ($l_3 = 25 \dots 1000$ м).

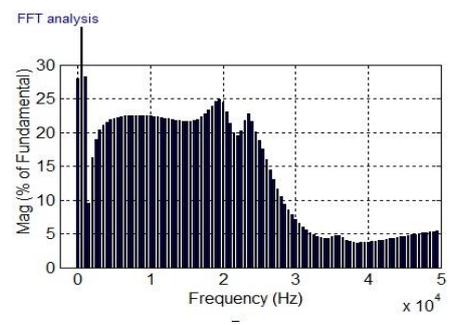
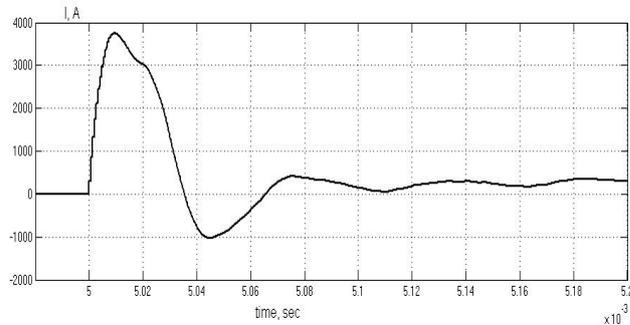
На рисунке 3.12 приведены расчетные осциллограммы переходного тока в месте ОЗЗ и его спектрограммы при различных значениях удаленности l_3 места ОЗЗ от шин. Из осциллограммы и спектрограммы на рисунке 3.12, а можно видеть, что при ОЗЗ на шинах ($l_3 = 0$) разрядная составляющая переходного тока имеет явно выраженный многочастотный характер. При таких ОЗЗ в разрядном токе в общем случае нельзя выделить основную частотную составляющую, определяемую по выражению (3.1). Однако уже при удаленностях места ОЗЗ от шин порядка нескольких десятков метров в разрядном токе начинает преобладать одна частотная составляющая (осциллограммы на рисунке 3.12, б и в), но при этом в спектре разрядного тока достаточно большую магнитуду имеют и составляющие с частотой более 20 кГц. При удаленностях l_3 порядка сотен метров и более в разрядном токе преобладает одна составляющая с частотой менее 20 кГц (осциллограммы и спектрограммы на рисунке 3.12, г и д).



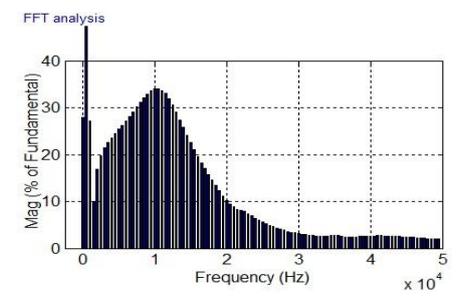
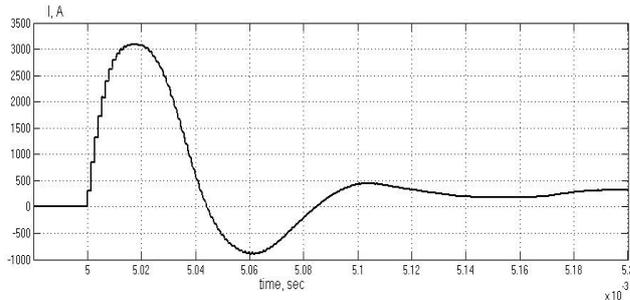
а)



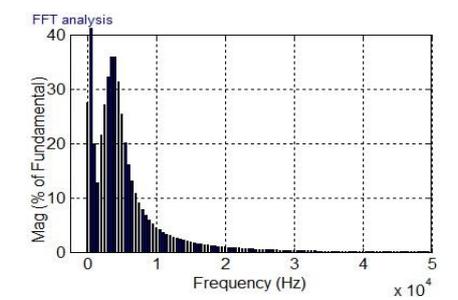
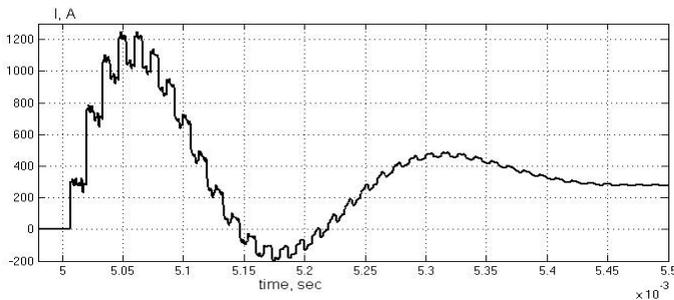
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.12 – Осциллограммы (слева) и спектрограммы (справа) тока ОЗЗ для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, $R_{II} = 0,1$ Ом при различных удаленностях ОЗЗ: а – $l_3 = 0$ м (ОЗЗ на шинах ЦП); б – $l_3 = 25$ м; в – $l_3 = 50$ м; г – $l_3 = 100$ м; д – $l_3 = 1$ км

Наличие в спектре переходного тока при близких к шинам ОЗЗ значительной доли составляющих с частотами более 20 кГц, имеющих магнитуду, близкую к магнитуде составляющих до 20 кГц, означает, что применение во входных цепях тока и напряжения ФНЧ с частотой среза $f_{cp} \leq 20$ кГц может привести к уменьшению крутизны переднего фронта переходного тока и напряжения и обусловить дополнительную погрешность определения расстояния до места повреждения по параметрам электрических величин переходного процесса.

Влияние ФНЧ с частотой среза $f_{cp} \leq 20$ кГц на крутизну переднего фронта первой и последующих полуволн переходного тока при ОЗЗ иллюстрируется осциллограммами на рисунке 3.13.

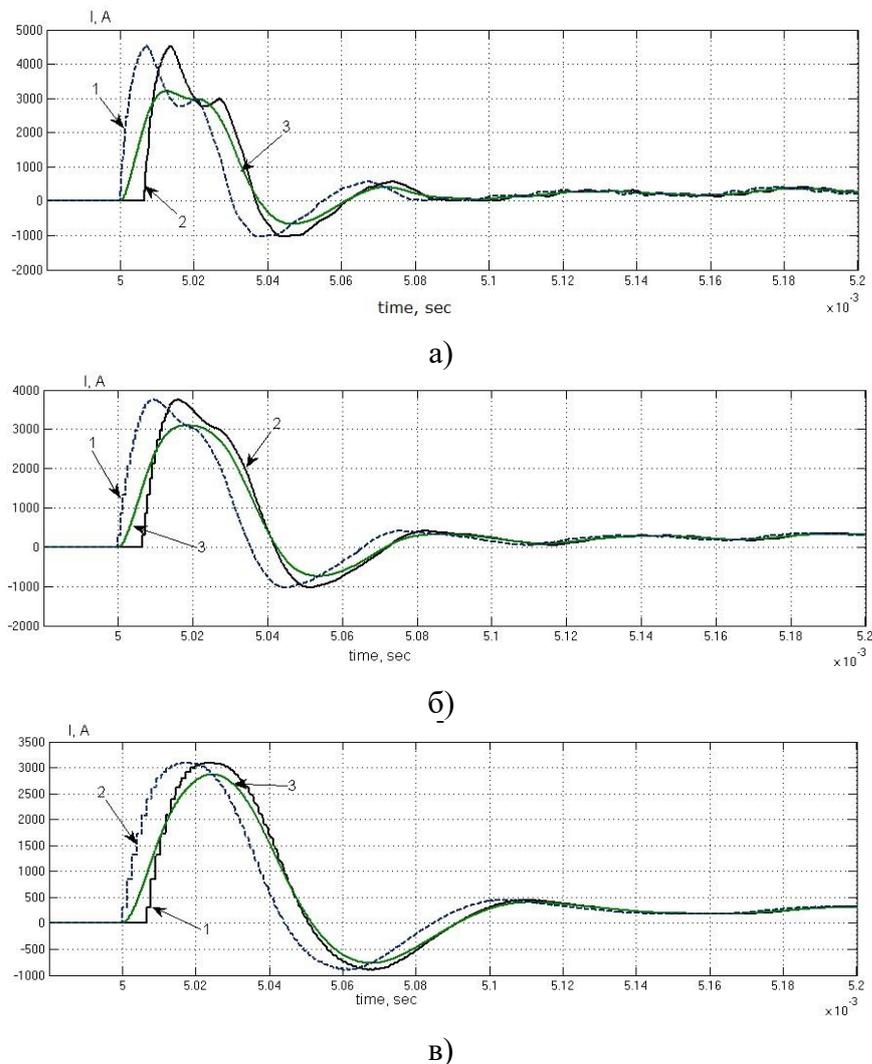


Рисунок 3.13 – Осциллограммы тока ОЗЗ для сети $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{CГ} = 30$ А, $R_{П} = 0,1$ Ом: при близких к шинам ОЗЗ: 1 – переходный ток ОЗЗ; 2 – переходный ток ОЗЗ с временной задержкой (для удобства сравнения сигналов); 3 – переходный ток при ОЗЗ после ФНЧ с частотой среза 20 кГц: а – $l_3 = 25$ м; б – $l_3 = 50$ м; в – $l_3 = 100$ м

Из осциллограмм, приведенных на рисунке 3.13, можно видеть, что ограничение рабочего диапазона частот "верхней" частотой 20 кГц оказывает существенное влияние на крутизну переднего фронта первой полуволны переходного тока при расстояниях до места ОЗЗ, измеряемых десятками и сотнями метров. Отметим также, что применение ФНЧ с частотой среза $f_{cp} \leq 20$ кГц оказывает значительно меньшее влияние на крутизну заднего фронта первой полуволны и крутизну фронтов последующих полуволн переходного тока ОЗЗ даже при малых значениях l_3 (осциллограммы на рисунке 3.13, б и в), что может быть использовано при построении алгоритмов ДОМЗЗ с использованием методов ПАР.

Оценка погрешностей, обусловленных необходимостью ограничения рабочего диапазона частот устройств ДОМЗЗ, основанных на контроле параметров электрических величин переходного процесса, дается в главе 4.

3.4 Разработка моделей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности

3.4.1 Обоснование подхода к моделированию трансформаторов тока

3.4.1.1 О подходах к моделированию электромагнитных ТТ. Создание общей модели электромагнитного ТТ (ТТНП), т.е. модели, способной предугадывать поведение трансформатора тока в широком диапазоне значений первичного тока, частот и величин нагрузки представляет собой сложную задачу, до сих пор не имеющую окончательного решения [222]. Поэтому для различных значений первичного тока, разных частотных диапазонов и при различных величинах вторичной нагрузки, как правило, использовались различные модели ТТ.

В большинстве современных систем моделирования электронных схем (SPICE-симуляторов – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), как правило, используется модель Джилса-Аттертона [223, 224], которая описывают нели-

нейность стали сердечника на основе физических свойств магнитного материала с использованием физической теории магнитных доменов в ферромагнитных материалах. Недостатками модели Джилса-Аттертона, затрудняющими ее использование в задачах, связанных с исследованиями динамических режимов функционирования устройств РЗА ЭЭС с применением системы Matlab, являются:

- необходимость подбора параметров модели по экспериментальным данным и связанных с этим дополнительных расчетов;

- при подборе параметров для точного моделирования предельных петель гистерезиса погрешность при моделировании частных петель может составлять сотни процентов;

- отсутствие зависимости формы петли от частоты или скорости перемагничивания;

Также часто (например, в LTspice-симуляторе (симулятор, позволяющий производить компьютерное моделирование работы различных электрических и электронных цепей корпорации Linear Technology [225]) используется упрощенная гистерезисная модель магнитного сердечника, которую предложили Джон Чан и др. [226]. В отличие от модели Джилса-Аттертона, гистерезисная модель LTspice использует только основные и вполне понятные параметры петли магнитного гистерезиса. Однако эти модели также достаточно сложны для реализации в среде системы моделирования Matlab.

В задачах, связанных с моделированием устройств релейной защиты, чаще применяют более простые модели на основе Т-образной схемы замещения ТТ, в которых магнитный сердечник описывается основной или средней кривой намагничивания (ОКН или СКН) с учетом потерь на гистерезис и вихревые токи [227–232].

Такие модели, как правило, обеспечивают приемлемую точность расчетов вторичных величин при больших значениях первичного тока и малых нагрузках ТТ. Как уже отмечалось выше, в отличие от ТТ для релейной защиты от КЗ, ТТНП в защитах от ОЗЗ должны обеспечивать требуемую точность преобразования в большем динамическом диапазоне значений первичного тока (от единиц и

долей ампера в установившемся режиме ОЗЗ до сотен и тысяч ампер в переходных режимах) и при более сложных по форме входных токах. Поэтому возможность и условия применения для построения моделей ТТНП описаний магнитного сердечника в форме ОКН и СКН требует дополнительных исследований.

В [233] показано, что существенное повышение точности расчетов электротехнических устройств с магнитопроводами может быть получено при использовании для описания процессов в магнитном сердечнике уравнения динамики перемангничивания, представленного в следующей форме:

$$\frac{dB}{dt} = r \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right) (H(t) - H_{cm}), \quad (3.3)$$

где H_{cm} – статическая петля гистерезиса.

3.4.1.2 Выбор подходов к моделированию ТТНП. В рамках данной работы были исследованы 3 подхода к построению математической модели ТТНП и заданию нелинейности кривой намагничивания стали сердечника трансформатора, основанных, соответственно [82, 83, 85]:

- 1) на использовании Т-образной схемы замещения ТТНП и основной кривой намагничивания (ОКН) магнитопровода трансформатора тока;
- 2) на использовании Т-образной схемы замещения ТТНП и средней кривой намагничивания (СКН) магнитопровода трансформатора тока;
- 3) на использовании уравнения динамики перемангничивания, приведенного в [233].

3.4.1.3 О выборе характеристик намагничивания для построения моделей ТТНП и проверки их достоверности. Для изготовления магнитопроводов ТТНП заводы используют холоднокатаную электротехническую сталь различных марок. Типовые характеристики намагничивания являются некоторыми усредненными; чаще они близки к характеристикам магнитопроводов из сталей худшего качества соответствующих марок. Поэтому при моделировании кабельных ТТНП с использованием типовых характеристик намагничивания не приходится ожидать высокой точности результатов конкретных расчетов. Следует иметь в виду также, что характеристики сталей имеют разброс от партии к партии. Кроме

того, несколько различаются характеристики стали отдельного магнитопровода и готового ТТНП. Поэтому более точные результаты, необходимые для проверки достоверности разрабатываемых моделей, могут быть получены только при использовании характеристик намагничивания конкретных ТТНП, снятых при практически синусоидальном первичном токе [73, 76].

3.4.2 Методика экспериментального определения характеристик намагничивания кабельных ТТНП

3.4.2.1 Оборудование и методика экспериментального определения характеристик намагничивания ТТНП. При проведении исследований использовалось аппаратное и программное оборудование LabVIEW фирмы National Instruments (NI) [234]:

- плата АЦП с шасси - SCXI-1600/SCXI-1000 Bundle;
- SCXI-1125, 8 Channel Programmable Isolated Input Module;
- SCXI-1327 High-Voltage Attenuator Terminal Block;
- среда графического программирования – LabVIEW 8.5.

Разработанный графический интерфейс в программе LabVIEW позволяет в процессе эксперимента выводить на экран монитора

1. результаты непосредственных измерений:
 - а) временные зависимости токов;
 - б) временные зависимости напряжений трансформатора;
2. данные после математической обработки:
 - а) временные зависимости напряжённости и индукции магнитного поля в сердечнике трансформатора;
 - б) временные зависимости потребляемой мощности и энергии;
 - в) построение петли гистерезиса с определением мощности активных потерь на гистерезис и вихревые токи, а также потерь в проводниках обмоток;

г) построение зависимости тока намагничивания от напряжения на намагничивающей ветви схемы замещения и определения по данной зависимости реактивной мощности.

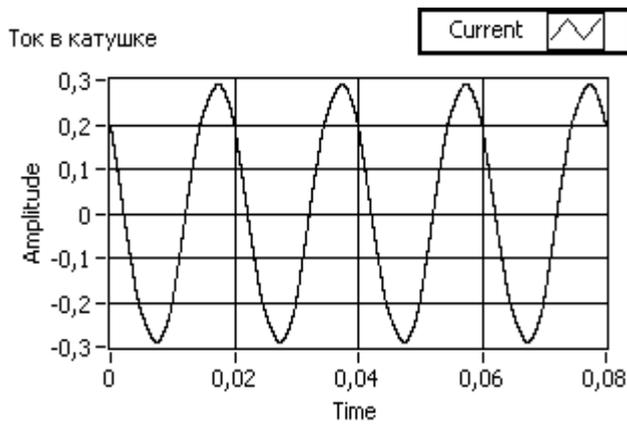
Приведенные ниже осциллограммы измерений и их математической обработки иллюстрируют методику определения характеристики намагничивания ТТНП типа ТЗЛМ в режиме холостого хода (рисунки 3.14 – 3.16).

На рисунках 3.14 представлены кривые, соответствующие начальному уровню намагничивания сердечника трансформатора, кривые рисунка 3.15 соответствуют начальной стадии насыщения, а кривые рис. 3.16 глубокому насыщению.

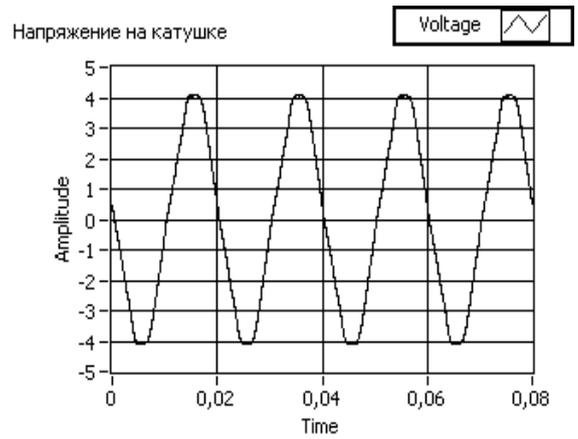
На рисунках 3.14÷3.16, а и б представлены временные зависимости первичного тока и напряжения на выводах вторичной обмотки ТТНП; рис. 3.14÷3.16, в – петли гистерезиса, по площади которых определялись потери активной мощности в сердечнике на гистерезис и вихревые токи; рисунки 3.14÷3.16, г – петли, определяемые зависимостью напряжения от тока ветви намагничивания. Площадь данных петель характеризует реактивную энергию, накапливаемую в сердечнике трансформатора.

Непосредственно энергетические процессы перемагничивания сердечника ТТНП дают временные зависимости мгновенной мощности и энергии соответственно, представленные на рисунках 3.14÷3.16, д и е. По наличию постоянной составляющей графика (рисунки 3.14÷3.16, д) легко определить мощность активных потерь. Колебательная составляющая представляет собой реактивную мощность. Обе составляющие вычисляются средствами LabVIEW и могут быть использованы для определения параметров активной и реактивной проводимости ветви намагничивания схемы замещения трансформатора.

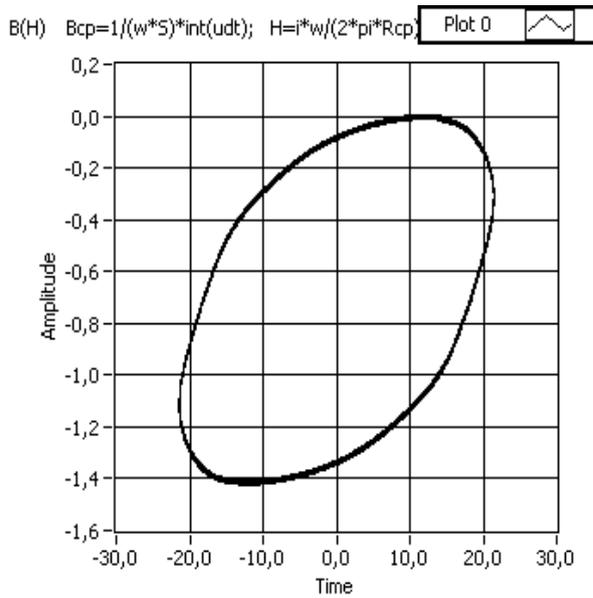
Полученная экспериментально ОКН для ТТНП типа ТЗЛМ, представляющая собой геометрическое место вершин петель гистерезиса, полученных при циклическом перемагничивании, приведена далее, на рисунках 3.23 и 3.26.



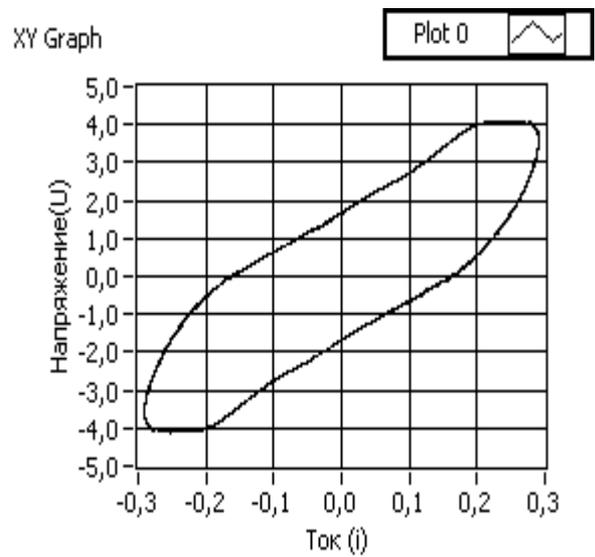
а)



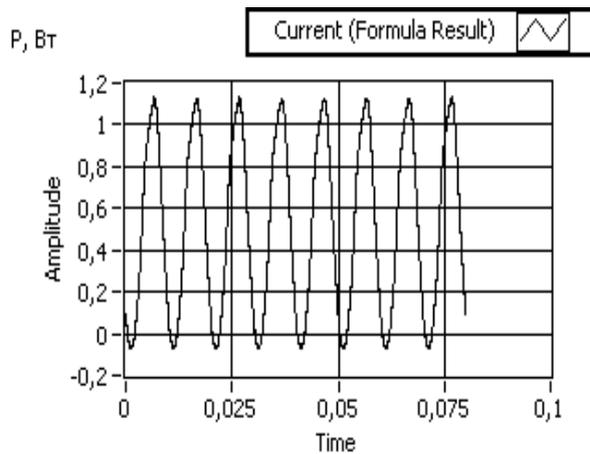
б)



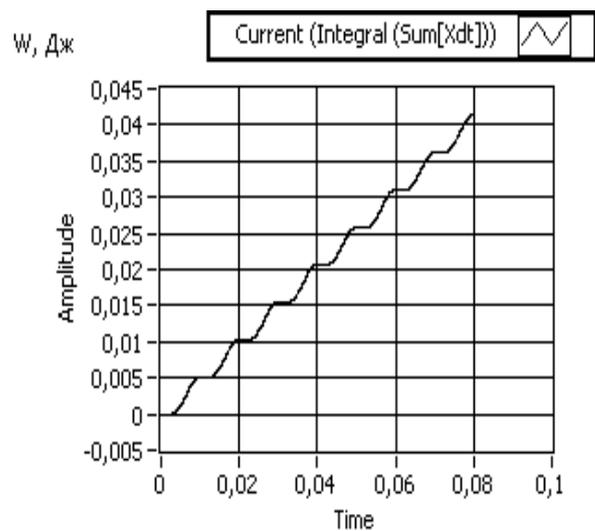
в)



г)

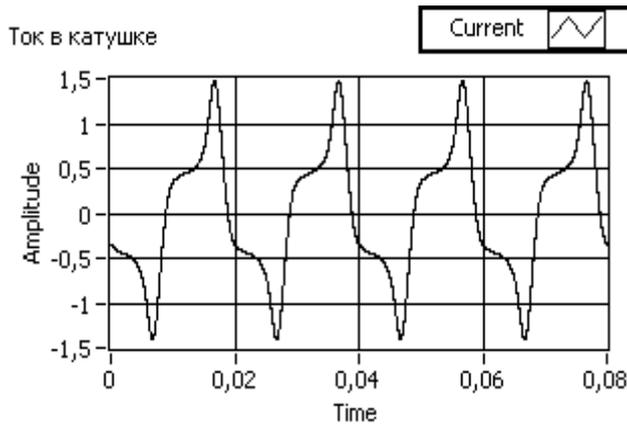


д)

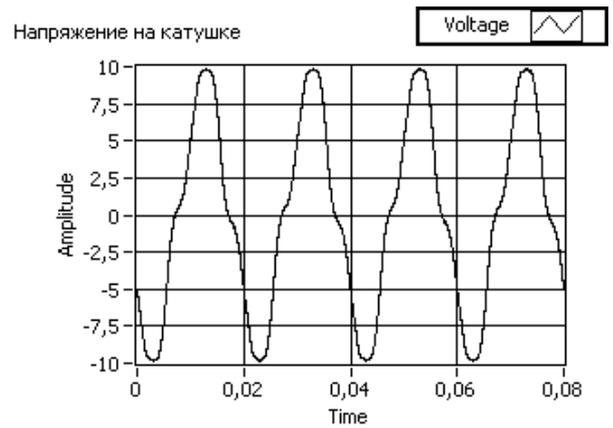


е)

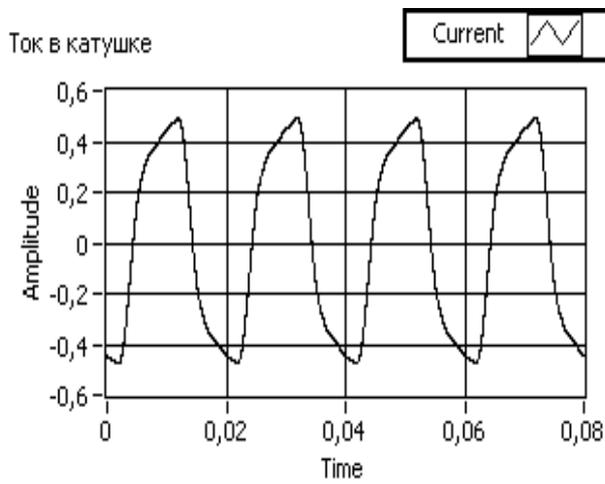
Рисунок 3.14 – Зависимости, соответствующие начальному уровню намагничивания магнитопровода ТТНП



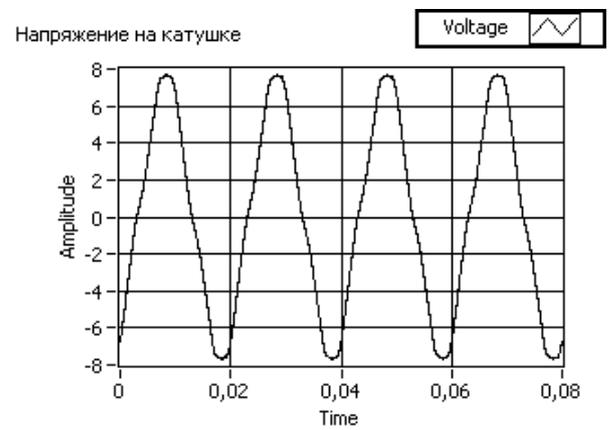
а)



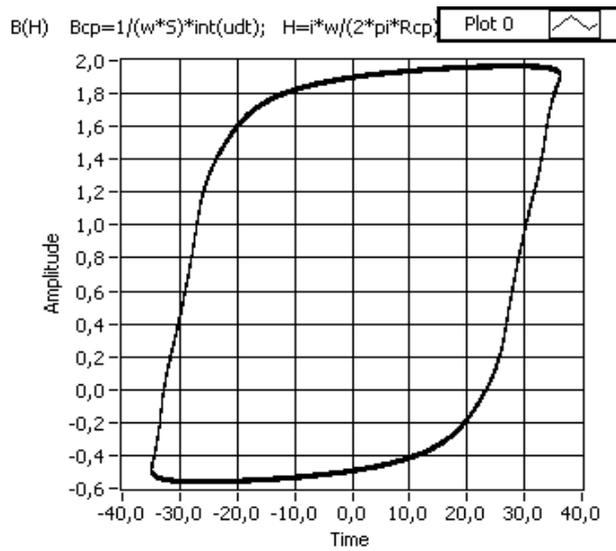
б)



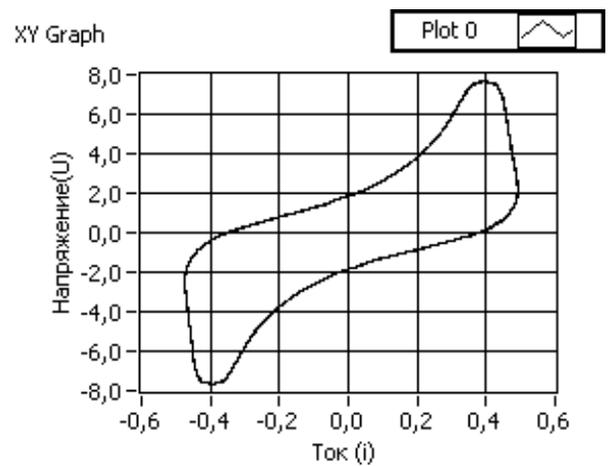
в)



г)

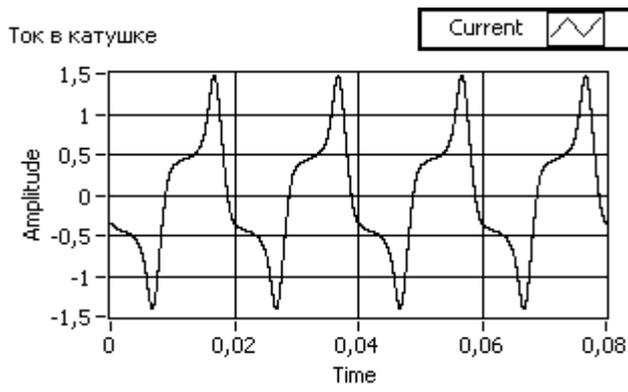


д)

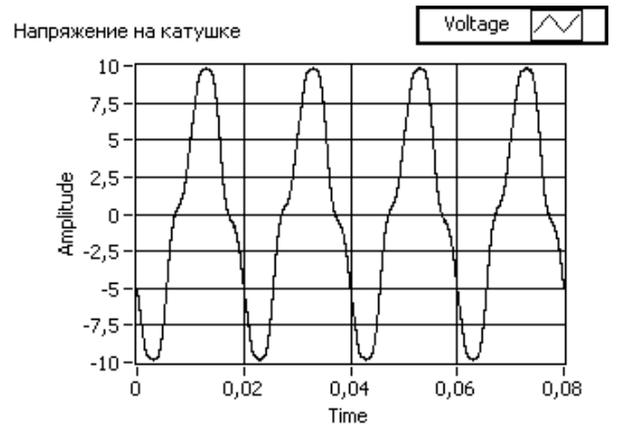


е)

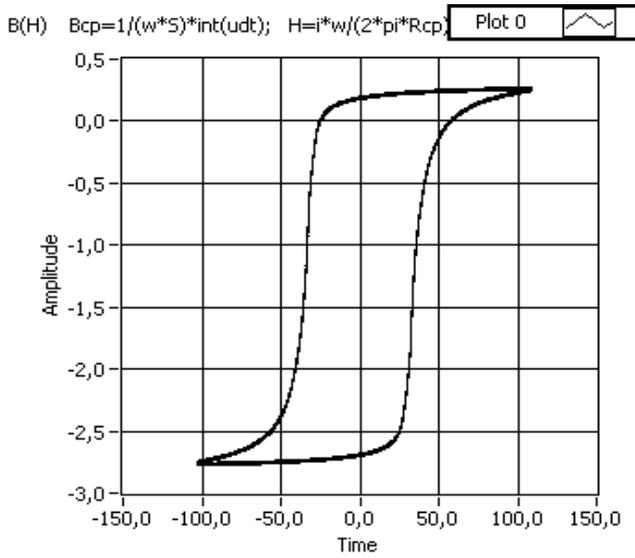
Рисунок 3.15 – Зависимости, соответствующие начальной стадии насыщения магнитопровода ТТНП



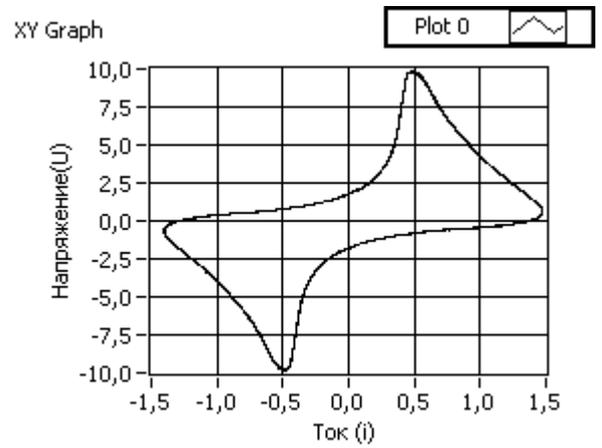
а)



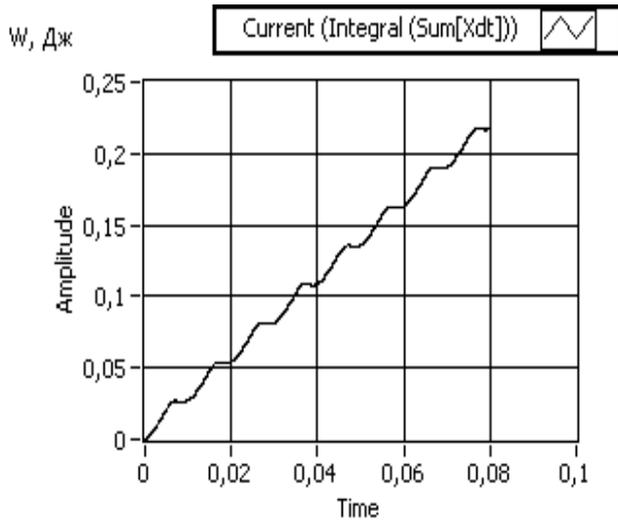
б)



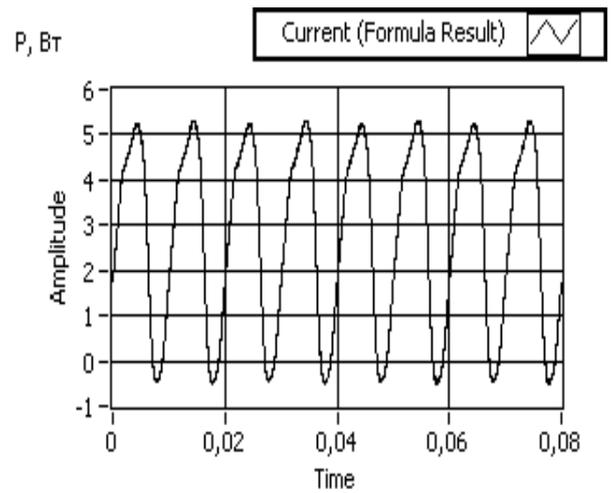
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.16 – Зависимости, соответствующие глубокому насыщению магнитопровода ТТНП

3.4.3 Математическая модель трансформатора тока нулевой последовательности на основе ОКН

3.4.3.1 Математическое описание модели и ее реализация в системе моделирования Matlab. В большинстве случаев для построения математической модели нелинейного электротехнического устройства, содержащего магнитопровод из электротехнической стали, принято использовать ОКН [198]. Поэтому для построения модели нелинейного ТТ (ТТНП) обычно также используется ОКН магнитопровода. Модели ТТ, как правило, строятся на основе Т-образной схемы замещения (рисунок 3.17).

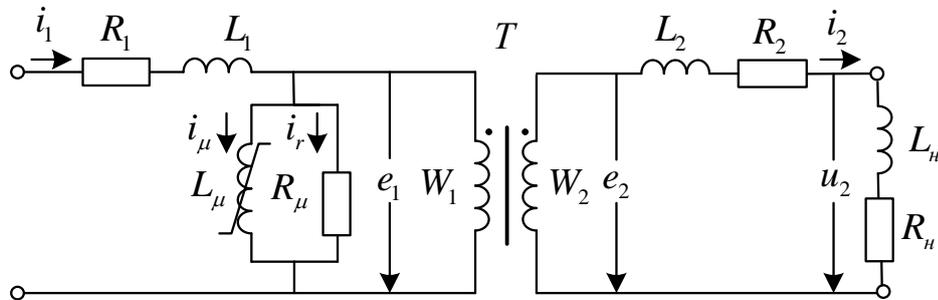


Рисунок 3.17 – Т-образная схема замещения ТТНП с нелинейным магнитопроводом

На схеме замещения по рисунку 3.17: R_1 , R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток ТТНП; L_1 , L_2 – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток ТТНП; L_μ – нелинейная индуктивность ветви намагничивания ТТНП; R_μ – активное сопротивление ветви намагничивания, учитывающее потери на гистерезис и вихревые токи; R_n и L_n – соответственно активное сопротивление и индуктивность вторичной нагрузки; T – идеальный трансформатор с коэффициентом трансформации $K_T = W_2/W_1$; W_1 и W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток ТТНП.

Для схемы замещения по рисунку 3.17 можно записать следующие уравнения, образующие математическую модель ТТНП:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{(L_2 + L_n)} [e_2 - i_2(R_2 + R_n)]; \quad (3.4)$$

$$e_2 = W_2 S \frac{dB}{dt}; \quad (3.5)$$

$$B = f(H); \quad (3.6)$$

$$H = \frac{i_\mu W_1}{l_{cp}}; \quad (3.7)$$

$$i_\mu = i_1 - i_R - i_2 K_T; \quad (3.8)$$

$$i_R = \frac{e_1}{R_\mu}; \quad (3.9)$$

$$e_1 = \frac{e_2}{K_T}, \quad (3.10)$$

где S – сечение магнитопровода ТТНП; l_{cp} – длина средней силовой магнитной линии сердечника ТТНП; B – индукция магнитного поля в сердечнике ТТНП; H – среднее значение напряженность магнитного поля в сердечнике ТТНП; $B = f(H)$ – зависимость индукции от напряженности в магнитопроводе ТТНП по ОКН.

Из рисунка 3.17 также видно, что ЭДС e_1 можно представить также в следующей форме

$$e_1 = L_\mu(i_\mu) \frac{di_\mu}{dt} = \frac{d\psi_1}{di_\mu} \frac{di_\mu}{dt} = \frac{d\psi_1(i_\mu)}{dt}, \quad (3.11)$$

где $\psi_1 = W_1 S B$ – потокосцепление первичной обмотки ТТНП.

При равномерной намотке вторичной обмотки ТТНП по окружности магнитопровода для ТТ, в т.ч. и ТТНП, можно принять $L_2 \approx 0$. Входное сопротивление по цепям тока для микропроцессорных устройств РЗА, как уже отмечалось выше, также можно считать практически активным, т.е. принять $L_n \approx 0$. С учетом данных допущений уравнения математической модели ТТНП для схемы замещения по рисунку 3.17 можно представить в следующей форме:

$$W_2 S \frac{dB}{dt} = e_2; \quad (3.12)$$

$$e_2 = i_2 (R_2 + R_n); \quad (3.13)$$

$$i_2 = (i_1 - i_\mu - i_R) / K_T. \quad (3.14)$$

$$H = f(B); \quad (3.15)$$

$$i_{\mu} = \frac{HW_1}{l_{cp}}; \quad (3.16)$$

$$e_1 = \frac{e_2}{K_T} = e_2 \frac{W_1}{W_2}, \quad (3.17)$$

$$i_R = \frac{e_1}{R_{\mu}}; \quad (3.18)$$

Отметим, что в моделях ТТНП по уравнениям (3.4) – (3.11) и (3.12) – (3.18) в качестве кривой намагничивания сердечника ТТНП может быть использована как ОКН, так и СКН.

3.4.3.2 О возможности и особенностях использования для моделирования ТТНП в системе Matlab стандартного блока Saturable Transformer. Стандартный блок Saturable Transformer в системе MATLAB моделирует двух- или трехобмоточный однофазный трансформатор с нелинейной характеристикой намагничивания материала сердечника. Схема замещения двухобмоточного нелинейного трансформатора, используемая в блоке Saturable Transformer, аналогична приведенной на рисунке 3.17, а основными параметрами блока, задаваемыми при моделировании, являются следующие величины:

– Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] – номинальная полная мощность (ВА) и номинальная частота (Гц);

– Winding 1(2) parameters [V1(2) (Vrms) R1(2) L1(2)] – параметры первичной и вторичной обмоток: действующее значение напряжения (В), активное сопротивление и индуктивность рассеяния в именованных или относительных единицах.

– Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] – характеристика намагничивания сердечника в именованных или относительных единицах.

– Core loss resistance and initial flux [Rm phi] or [Rm] – активное сопротивление цепи намагничивания и остаточное значение магнитного потока или только сопротивление ветви намагничивания в именованных или относительных единицах.

Вид окна задания параметров блока Saturable Transformer приведен на рисунке 3.18.

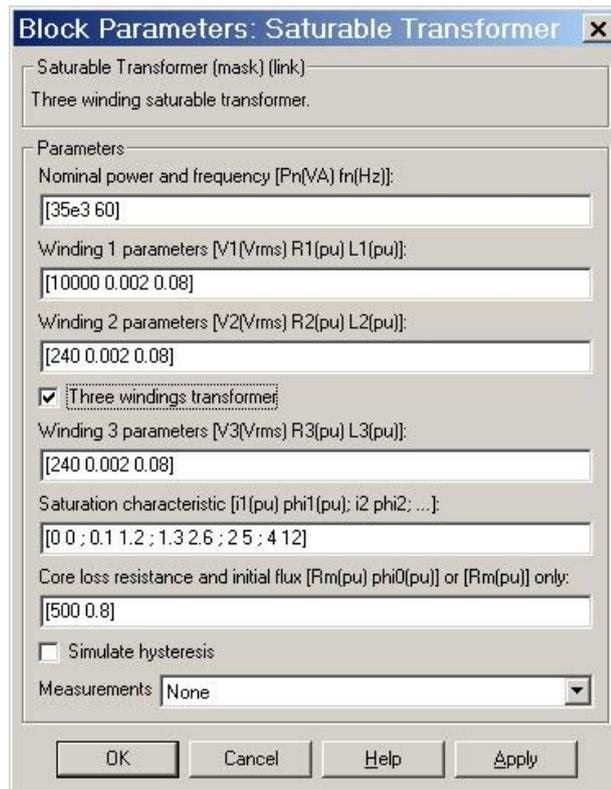


Рисунок 3.18 – Окно задания параметров блока Saturable Transformer

Из приведенного выше перечня параметров блока Saturable Transformer и рисунка 3.18 можно видеть, что данный блок предназначен прежде всего для моделирования силовых трансформаторов и задания требуемых параметров на основе каталожных технических данных последних. Режимы работы ТТ и, соответственно, и система каталожных технических данных принципиально отличаются от системы каталожных технических данных силовых трансформаторов. Поэтому для моделирования ТТ необходима либо разработка специальной модели в системе Matlab, либо разработка методики задания его стандартных параметров на основе каталожных технических данных электромагнитных ТТ. Более простым представляется второй подход.

Типовые паспортные данные (каталожные) данные ТТ в стандартной справочной литературе содержат в себе следующие параметры:

- $I_{1\text{ном}}$ – номинальный первичный ток, А;
- $I_{2\text{ном}}$ – номинальный вторичный ток, А;
- $K_T = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$ – номинальный коэффициент трансформации тока;

– $K_{10\text{ном}}$ – номинальная предельная кратность первичного тока, при которой обеспечивается $\varepsilon \leq 10\%$ при номинальной вторичной нагрузке;

– $S_{\text{нагр.ном}}$ – номинальная вторичная нагрузка при $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$;

– R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки.

При моделировании ТТ, в отличие от силовых трансформаторов, нельзя принять его номинальную мощность (параметр блока P_n), равной номинальной мощности нагрузки ТТ $S_{\text{нагр.ном}}$, т.к. из-за достаточно больших значений сопротивления R_2 потери во вторичной обмотке могут составлять существенную долю от $S_{\text{нагр.ном}}$. С учетом того при моделировании ТТ следует принять

$$P_n = S_{2\Sigma} = I_{2\text{ном}}^2 Z_{2\Sigma} = I_{2\text{ном}}^2 (R_2 + Z_{\text{нагр.ном}}) = I_{2\text{ном}}^2 (R_2 + R_{\text{нагр.ном}} + jX_{\text{нагр.ном}}), \quad (3.19)$$

где активная и реактивная составляющие сопротивления вторичной нагрузки ТТ определяются по выражениям

$$R_{\text{нагр.ном}} = \frac{S_{\text{нагр.ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8 \frac{S_{\text{нагр.ном}}}{I_{2\text{ном}}^2}; \quad (3.20)$$

$$X_{\text{нагр.ном}} = \frac{S_{\text{нагр.ном}}}{I_{2\text{ном}}^2} \cdot \sin \varphi_{\text{ном}} = 0,6 \frac{S_{\text{нагр.ном}}}{I_{2\text{ном}}^2}. \quad (3.21)$$

В отличие от силового трансформатора, в котором отношение номинальных напряжений обмоток $U_{1\text{ном}}/U_{2\text{ном}} = W_1/W_2$, в ТТ отношение чисел витков первичной и вторичной обмоток ТТ определяется не отношением входного напряжения на первичной обмотке к выходному напряжению на вторичной обмотке, а отношением ЭДС E_1/E_2 (рисунок 3.17).

С учетом этого, значения номинальных напряжений обмоток блока Saturable Transformer должны определяться по выражениям

$$V_2 = E_{2\text{ном}} = I_{2\text{ном}} Z_{2\Sigma}; \quad (3.22)$$

$$V_1 = E_{2\text{ном}} / K_T. \quad (3.23)$$

При моделировании ТТ также принимается $L_1 = L_2 = 0$ и $R_1 = 0$.

Для ТТНП в каталожных данных отсутствует значение номинальной вторичной нагрузки. Далее в моделях за номинальную, с некоторым запасом, была при-

нята нагрузка $Z_n \approx R_n = 1 \text{ Ом}$ ($\cos \varphi_n \approx 1$). За номинальный вторичный ток было принято значение входного фазного номинального тока для большинства микропроцессорных устройств релейной защиты $I_{2ном} = 1 \text{ А}$. Экспериментально измеренное сопротивление вторичной обмотки для различных образцов ТТНП составило от 0,5 до 1 Ом. Номинальная мощность образцов ТТНП по (3.19)

$$P_{нТТНП} = S_{2\Sigma} = I_{2ном}^2 Z_{2\Sigma} = I_{2ном}^2 (R_2 + R_{нагр.ном}) = 1^2(1+1) = 2 \text{ ВА}. \quad (3.24)$$

Номинальные первичные и вторичные напряжения обмоток ТТНП определяются по (3.22) – (3.23).

3.4.3.3 Схема испытаний модели ТТНП на основе ОКН. С использованием ОКН в качестве характеристики намагничивания в программном комплексе Matlab была реализована модель ТТНП типа ТЗЛМ (приложение В). Исследование модели ТТНП в целях оценки ее погрешностей производилось в двух режимах: режиме холостого хода и режиме малой вторичной нагрузки, характерной для современных микропроцессорных устройств РЗА. Каталожные данные ТТНП типа ТЗЛМ сведены в таблицы 3.2. и 3.3.

Таблица 3.2 – Технические характеристики ТЗЛМ

Номинальное напряжение, кВ	0,66
Номинальная частота, Гц	50
Испытательное одномоментное напряжение, кВ	3
Коэффициент трансформации	25/1
Односекундный ток термической стойкости вторичной обмотки, А	140

Таблица 3.3 – Параметры ТЗЛМ

Тип стали магнитопровода	Длина средней силовой линии L , см	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	Число витков вторичной обмотки
3411	33,9	7,2	25

Исследуемая модель выполнена с использованием стандартного блока Saturated Transformer.

Схема испытаний модели ТТНП приведена на рисунке 3.19.

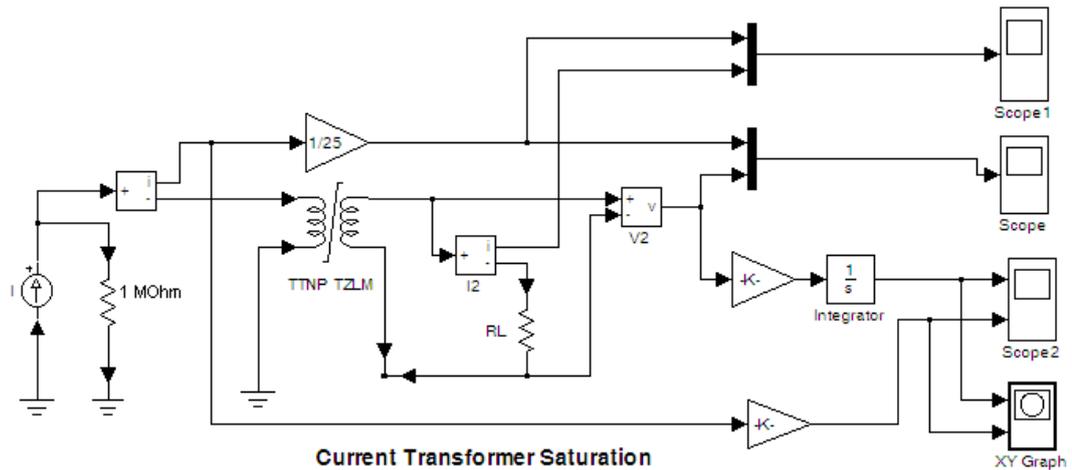


Рисунок 3.19 – Схема испытаний модели ТТНП в программном комплексе Matlab

3.4.3.4 Оценка погрешностей модели ТТНП на основе ОКН в режиме холостого хода. Для оценки точности модели ТТНП с ОКН в системе Matlab были сняты осциллограммы вторичных напряжений и зависимости $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$ для среднеквадратичных и мгновенных значений при синусоидальном первичном токе в диапазоне от 1 до 30 А (до насыщения стали сердечника) и диапазоне частот 50 ... 500 Гц в режиме холостого хода (таблица 3.4 и таблица 3.5) и при сопротивлении вторичной нагрузки $R_H = 1$ Ом.

Режим холостого хода рассматривался как «худший случай», поскольку в этом режиме погрешность ТТНП максимальна. При работе ТТНП с вторичной нагрузкой погрешность ТТНП будет заведомо меньше; характер нагрузки (соотношение активной и индуктивной составляющей) также влияет на погрешность ТТНП – при чисто активной нагрузке погрешность будет меньше.

Полученные на модели осциллограммы и зависимости сравнивались с аналогичными осциллограммами и зависимостями $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$, полученными экспериментально для реального образца ТТНП типа ТЗЛМ с использованием программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ – 51 в качестве источника тока и цифрового осциллографа Tektronix для регистрации первичных и вторичных электрических величин. Величина вторичного напряжения измерялась цифровым вольтметром типа Instek GDM 78261. Суммарная погрешность измерительных приборов не превышала 5%.

Сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными моделированием на ЭВМ в системе Matlab+ Simulink показало, что рассматриваемая модель ТТНП в режиме холостого хода обеспечивает допустимые погрешности (до ~10%) по интегральным (среднеквадратичных, средневыпрямленных) значениям вторичного напряжения только при работе на линейном участке ОКН (для ТТНП типа ТЗЛМ $I_{1ТТНП} = 3 \dots 10$ А). При этом погрешности по мгновенным значениям могут значительно превышать 10% (рисунок 3.20).

Таблица 3.4 – Оценка точности модели ТТНП на основе ОКН для $f=50$ Гц
в режиме холостого хода

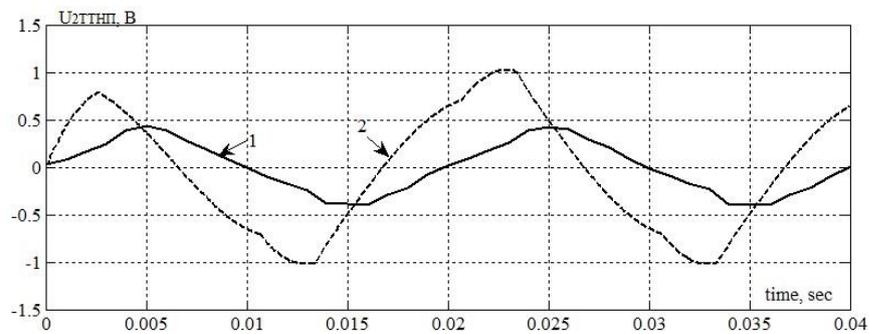
$I_1, \text{А}$	$U_{2ТТНП}, \text{В}$	$U_{2\text{модель}}, \text{В}$	погрешность, %
3,00	1,09	1,87	71,56
4,00	1,87	2,51	34,22
5,00	2,70	3,15	16,67
6,00	3,50	3,73	6,57
7,00	4,20	4,15	-1,19
8,00	4,75	4,53	-4,63
10,00	5,44	5,31	-2,39
12,00	5,78	5,96	3,11
13,00	5,89	6,22	5,60
14,00	5,97	6,46	8,21
15,00	6,03	6,68	10,78
16,00	6,08	6,90	13,49
17,00	6,13	7,11	15,99
18,00	6,17	7,30	18,31
20,00	6,23	7,65	22,79

Таблица 3.5 – Оценка точности модели ТТНП на основе ОКН для $f=500$ Гц
в режиме холостого хода

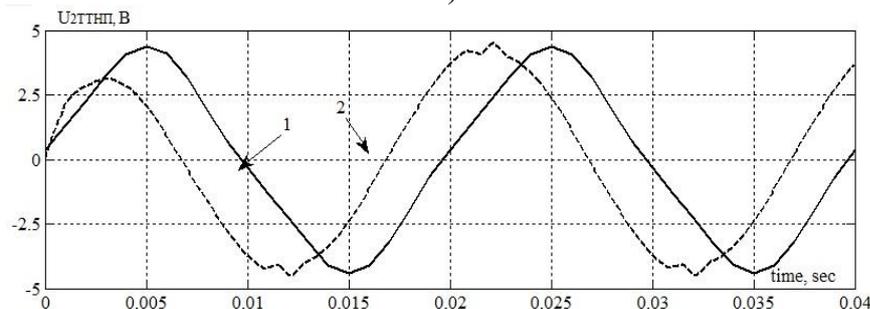
$I_1, \text{А}$	$U_{2ТТНП}, \text{В}$	$U_{2\text{модель}}, \text{В}$	погрешность, %
3,00	3,08	3,80	23,38
4,00	4,30	5,06	17,67
5,00	5,66	6,32	11,59
6,00	7,12	7,57	6,32

7,00	8,68	8,82	1,61
8,00	10,33	10,07	-2,49
10,00	13,90	12,59	-9,46
12,00	17,76	15,10	-14,98
14,00	21,75	17,62	-18,99
15,00	23,70	18,89	-20,32
16,00	25,67	20,15	-21,52
18,00	29,37	22,67	-22,83
20,00	32,45	25,19	-22,39

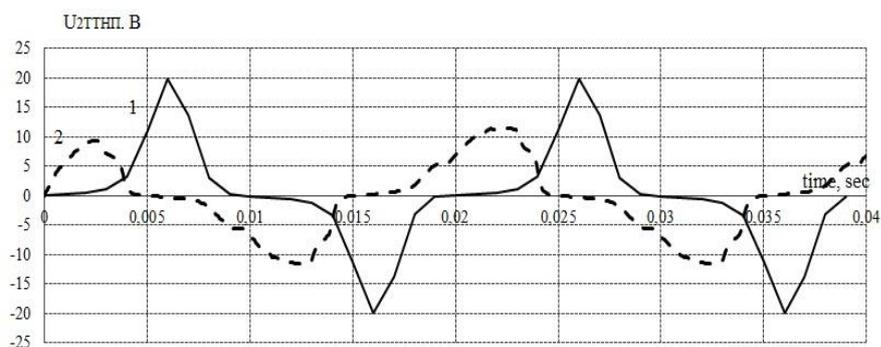
Сравнение действующих значений вторичных напряжений, осциллограмм вторичных напряжений и петель гистерезиса для различных значений первичных токов показали, что в режиме холостого хода на начальном участке ОКН модель дает большую погрешность (более 50% для первой гармоники) и генерирует высшие гармоники. На осциллограммах видно также отставание модельного вторичного напряжения по фазе. Такие модели при большом сопротивлении нагрузки значительно искажают форму вторичного тока (напряжения), и поэтому неприемлемы для исследования режимов функционирования защит от ОЗЗ на основе ВГ или электрических величин переходного процесса (рисунок 3.20).



а)



б)



в)

Рисунок 3.20 — Сравнение осциллограмм экспериментально полученных вторичных напряжений (кривая 1) и смоделированных вторичных напряжений (кривая 2) для первичных токов: а – $I_{1ТТНП} = 1$ А; б – $I_{1ТТНП} = 5$ А; в – $I_{1ТТНП} = 15$ А

При малых значениях первичных токов, которые характерны для сетей среднего класса напряжений, при больших сопротивлениях вторичной нагрузки данная модель не дает приемлемой точности.

При работе ТТНП с активно-индуктивной нагрузкой $R_H \leq 1$ Ом и $\cos\varphi > 0,8$ токовая погрешность уменьшается до 5 – 10 %.

3.4.3.5 Оценка погрешностей модели ТТНП на основе ОКН в режимах малой вторичной нагрузки. Сравнение модельных и экспериментально полученных зависимостей $I_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$ при синусоидальном первичном токе в диапазоне от 1 до 60 А частотой $f = 50$ Гц показало, что в режиме малой вторичной нагрузки ($R_H = 1$ Ом) модель имеет погрешности менее 5% по действующим значениям вторичного тока (рисунок 3.21).

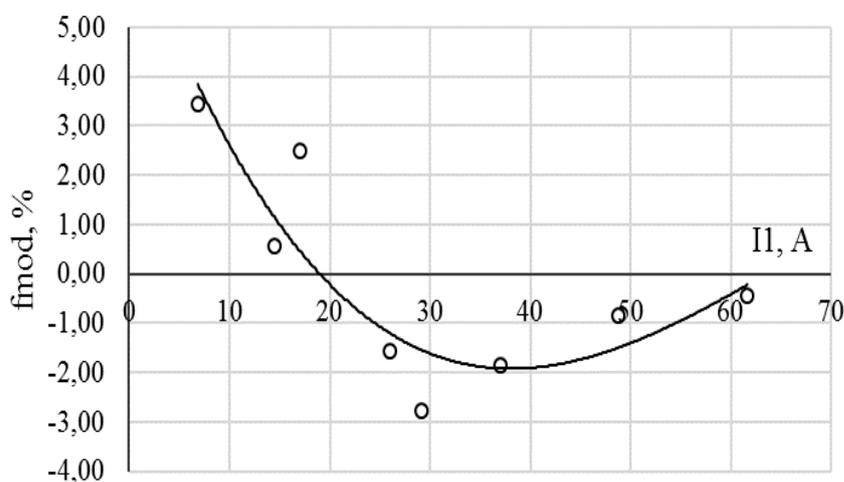


Рисунок 3.21 – Погрешность модели на основе ОКН, $R_H = 1$ Ом, $f = 50$ Гц

В диапазоне частот от 500 до 30 000 Гц в режиме малой вторичной нагрузки была снята АЧХ (рисунок 3.22) и ФЧХ. Погрешность модели на повышенных частотах увеличивается, однако не превышает 10% по действующим значениям вторичного тока (относительная погрешность по амплитуде представлена далее на рисунке 3.36).

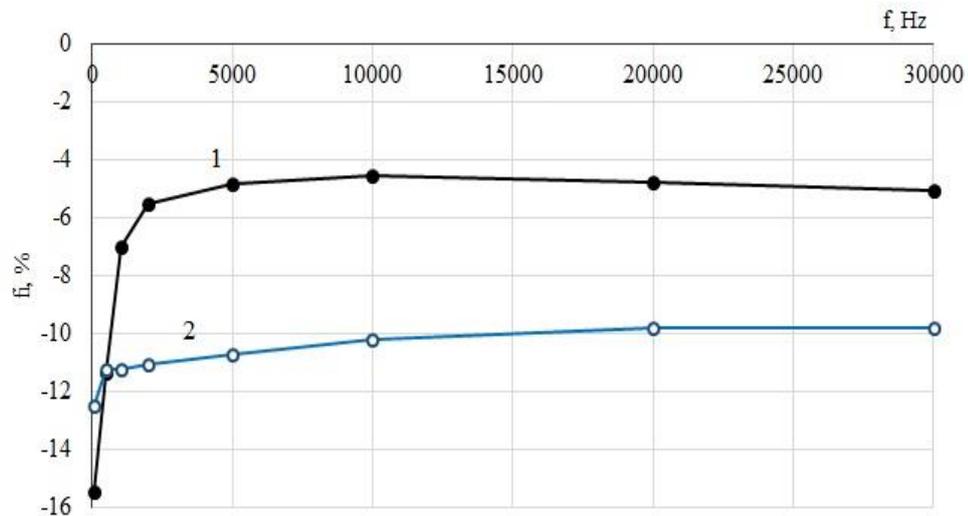


Рисунок 3.22 – АЧХ ТТНП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_n = 1$ Ом: 1 – эксперимент; 2 – модель на основе ОКН

3.4.3.6 Общая оценка модели ТТНП на основе ОКН. В режиме холостого хода и большой вторичной нагрузки модель на основе ОКН имеет большую токовую и фазовую погрешность и генерирует высшие гармоники. При малых значениях сопротивления вторичной нагрузки $Z_n \leq 1$ Ом погрешность модели не превышает 10% в рассматриваемом частотном диапазоне (до 30 кГц).

3.4.4 Математическая модель трансформатора тока нулевой последовательности на основе средней кривой намагничивания

3.4.4.1 Описание модели. В работах ЮРГТУ (ранее НПИ) показано [229], что при необходимости максимально точного отображения не только интеграль-

ных, но и мгновенных значений вторичного тока при моделировании трансформаторов тока необходимо использовать среднюю кривую намагничивания, являющаяся средней линией между восходящей и нисходящей ветвями частной петли гистерезиса.

Порядок снятия характеристик намагничивания (рисунки 3.23 – 3.24), осциллограмм вторичных токов и напряжений, а также испытаний модели аналогичен пунктам 3.4.2.1, 3.4.3.3 и 3.4.3.4. Реализация моделей в системе Matlab+Simulink аналогична модели на основе ОКН (рисунок 3.19).

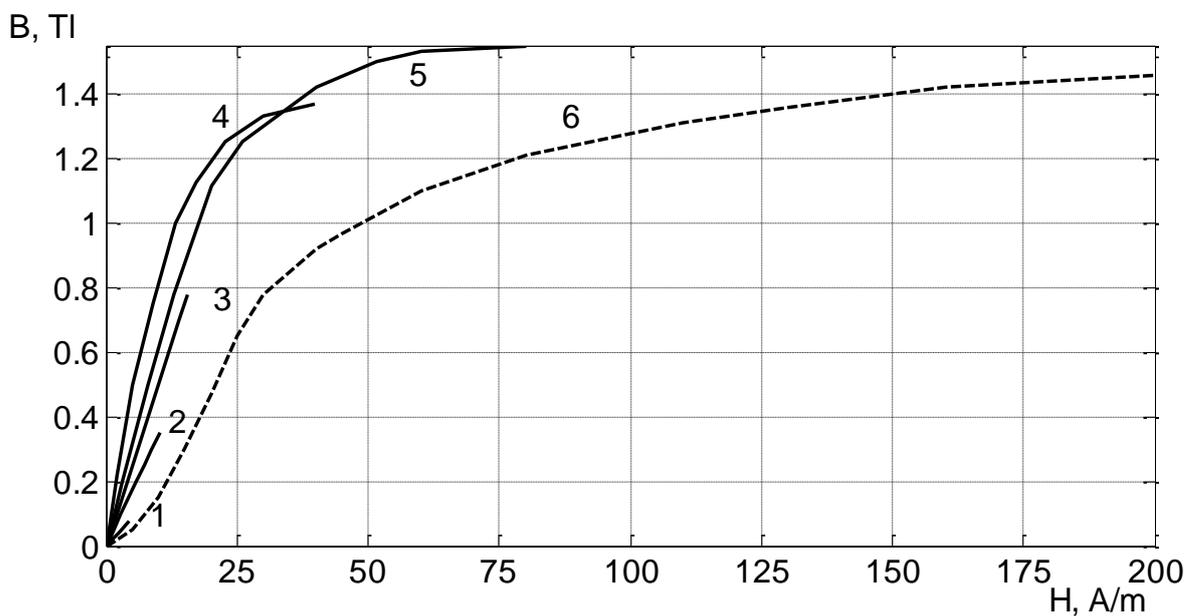
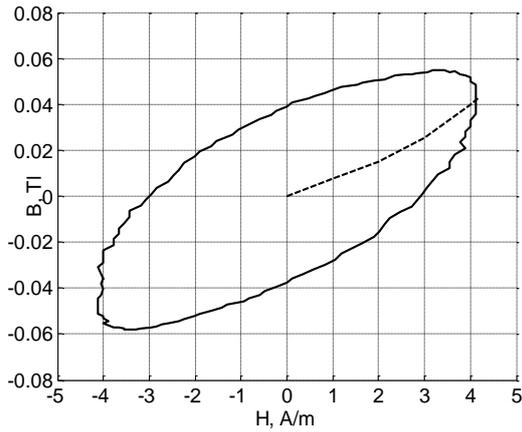


Рисунок 3.23 – СКН для различных величин первичных токов при частоте $f = 50$ Гц:

$I_{1ТТНП} = 1$ А (кривая 1), $I_{1ТТНП} = 3$ А (кривая 2), $I_{1ТТНП} = 5$ А (кривая 3),
 $I_{1ТТНП} = 10$ А (кривая 4), $I_{1ТТНП} = 20$ А (кривая 5) и ОКН (кривая 6)

Для построения модели ТТНП были экспериментально определены СКН магнитопровода ТТНП типа ТЗЛМ на частоте 50 Гц в режиме источника тока при $I_{1ТТНП} = 1$ А, 3 А, .., 30 А (рисунок 3.24) для каждого значения первичного тока с шагом 1 А.

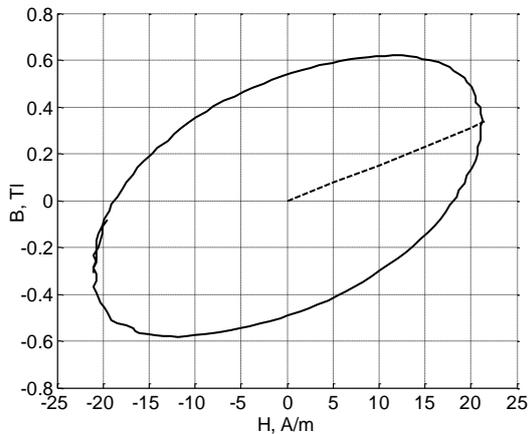
Из семейства СКН (рисунки 3.23 и 3.24), соответствующих различным значениям первичных токов, была получена «усредненная» СКН, соответствующая диапазону первичных токов $I_{1ТТНП} = 1$ А, 2 А, .., 30 А (рисунок 3.25).



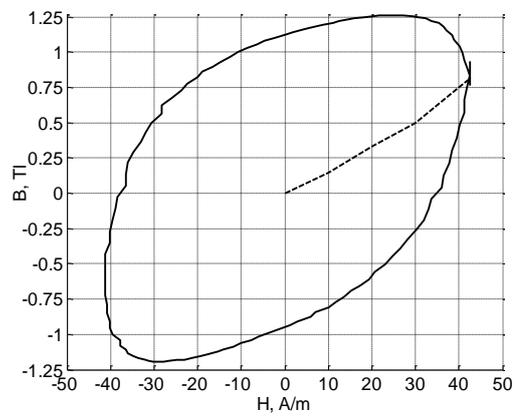
а)



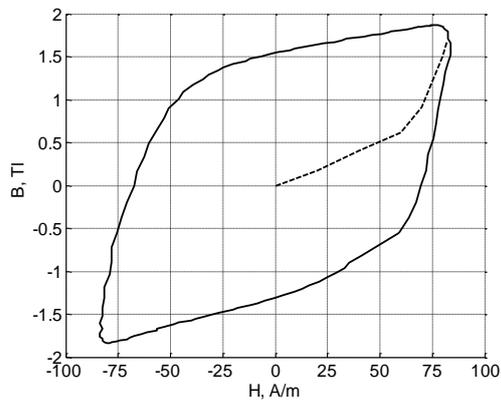
б)



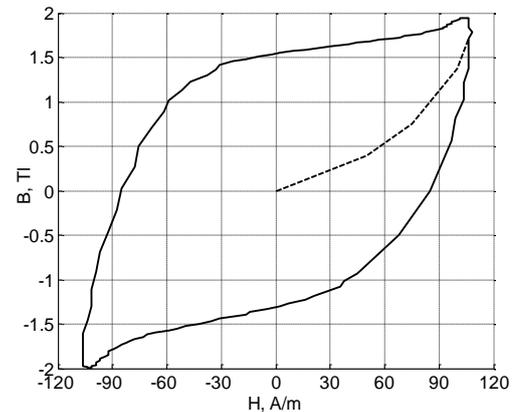
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.24 – Петли гистерезиса и средние кривые намагничивания для ТТНП типа ТЗЛМ в режиме холостого хода при величинах первичного тока: а – $I_{1\text{ТТНП}} = 1$ А; б – $I_{1\text{ТТНП}} = 3$ А; в – $I_{1\text{ТТНП}} = 5$ А; г – $I_{1\text{ТТНП}} = 10$ А; д – $I_{1\text{ТТНП}} = 20$ А; е – $I_{1\text{ТТНП}} = 30$ А

Кривая проводилась таким образом, чтобы проходить как можно ближе к средним кривым, соответствующим разным первичным токам и отражать как можно точнее нелинейность характеристики намагничивания сердечника ТТНП. В одной

системе координат ($H=f(B)$) было построено семейство средних кривых, соответствующих первичным токам от 1 до 30 А с шагом 1 А. «Усредненная» кривая проводилась через середины отрезков, проведенных от вершины каждой СКН, параллельно оси индукции, до соседней средней кривой.

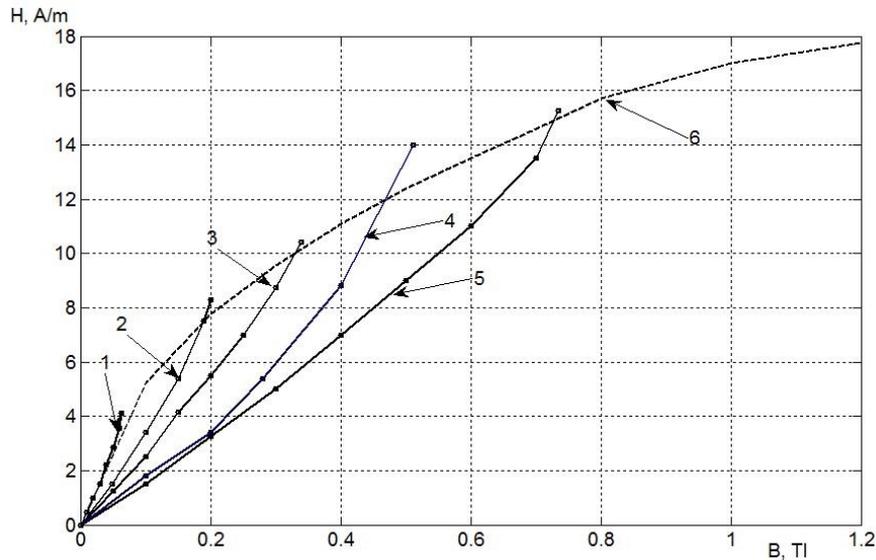


Рисунок 3.25 – «Усредненная» кривая намагничивания ТТНП (6) и семейство СКН для первичных токов: 1 – $I_{\text{ТТНП}} = 1$ А; 2 – $I_{\text{ТТНП}} = 2$ А; 3 – $I_{\text{ТТНП}} = 3$ А; 4 – $I_{\text{ТТНП}} = 4$ А; 5 – $I_{\text{ТТНП}} = 5$ А

«Усредненная» кривая значительно отличается от ОКН на начальном участке (рисунок 3.26); при больших значениях напряженности магнитного поля (более 100 А/м) кривые практически совпадают.

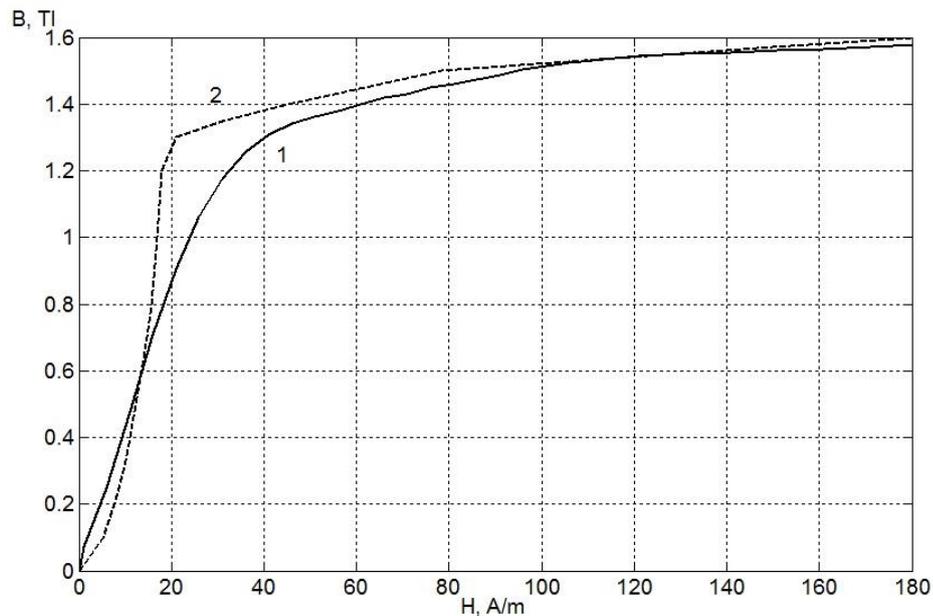
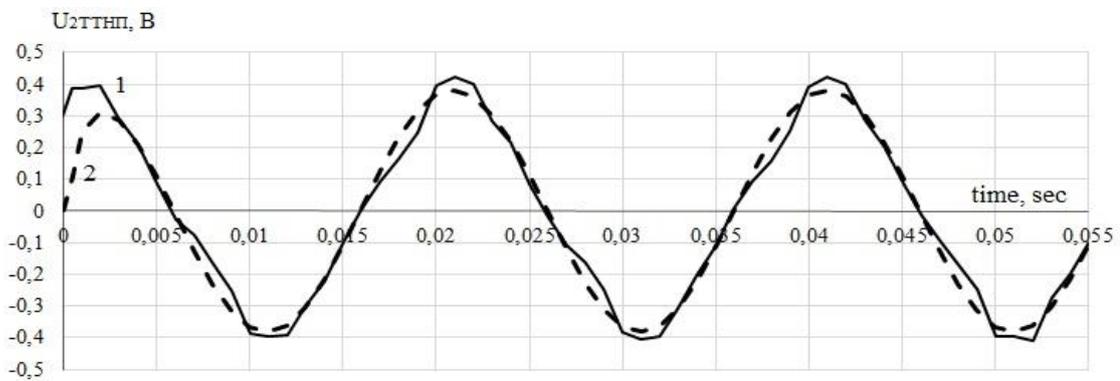


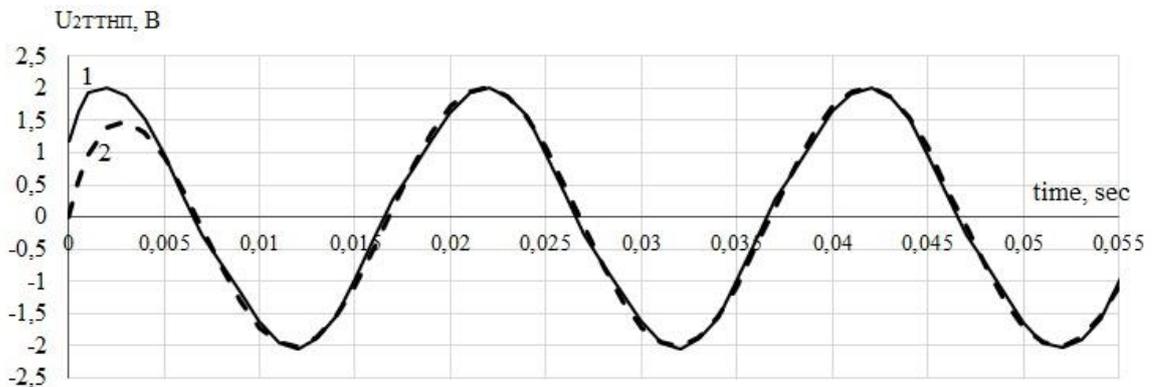
Рисунок 3.26 – Сравнение основной (1) и «усредненной» СКН (2) сердечника ТЗЛМ

3.4.4.2 Оценка точности модели. Полученные на модели осциллограммы и зависимости сравнивались с аналогичными осциллограммами и зависимостями $U_{2ТТНП} = f(I_{1ТТНП})$, полученными экспериментально для образца ТТНП типа ТЗЛМ с использованием программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ – 51 и цифрового осциллографа Tektronix для различных значений первичного тока $I_{1ТТНП}$ в режиме холостого хода (например, рисунок 3.27).

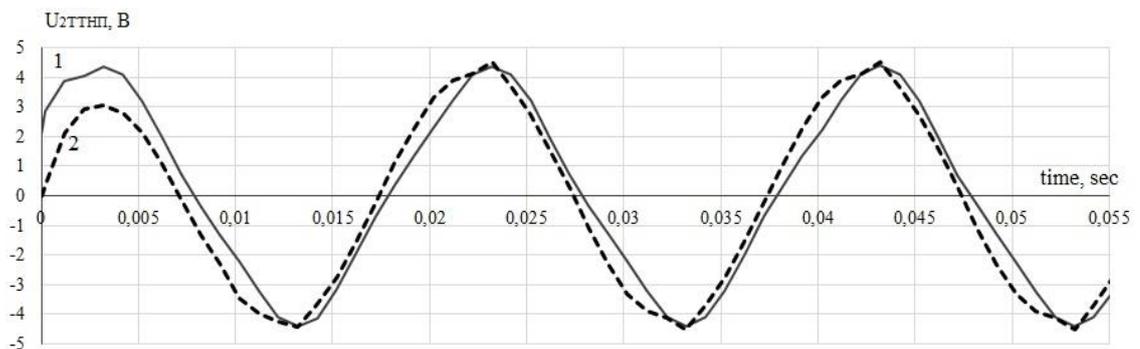
Модели ТТНП на основе СКН обеспечивают снижение токовой погрешности по интегральным значениям вторичного напряжения в режиме холостого хода до 10% и существенное уменьшение погрешностей по мгновенным значениям в диапазоне первичных токов ТТНП от 1 до 15 А (рисунок 3.27).



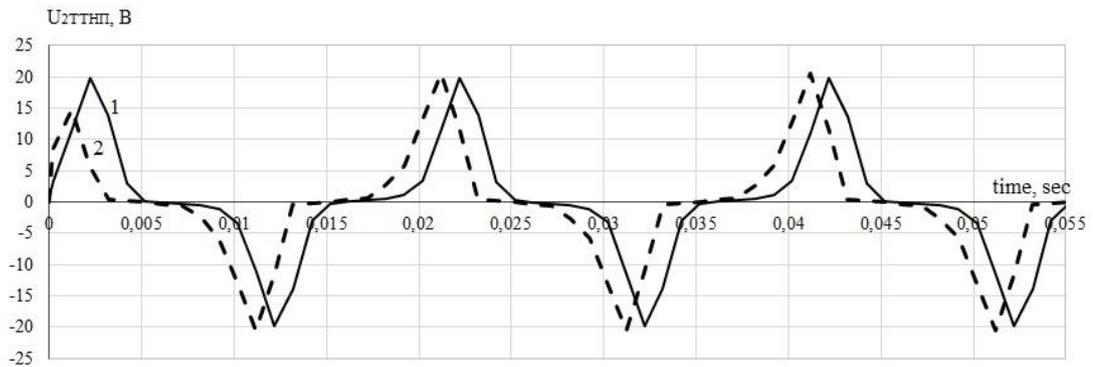
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.27 – Сравнение экспериментальных осциллограмм $U_{2TTNP}(t)$ и осциллограмм, полученных для моделей ТТП на основе СКН (кривая 2) для первичных токов:

а – $I_{1TTNP} = 1$ А; б – $I_{1TTNP} = 3$ А; в – $I_{1TTNP} = 5$ А; г – $I_{1TTNP} = 15$ А

В диапазоне частот от 500 до 30 000 Гц в режиме малой вторичной нагрузки была снята АЧХ (рисунок 3.28) и ФЧХ. Погрешность модели на повышенных частотах не превышает 10% по действующим значениям вторичного тока (относительная погрешность по амплитуде представлена далее на рис.3.36) и уменьшается относительно погрешности модели на основе ОКН. Погрешность модели при частоте $f = 50$ Гц и величинах первичного тока до 60 А не превышает 5 % (рисунок 3.29).

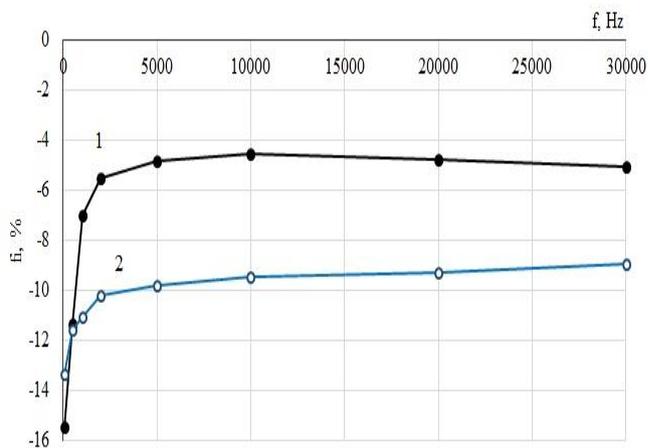


Рисунок 3.28 – АЧХ ТТП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_H = 1$ Ом: 1 – эксперимент; 2 – модель на основе СКН

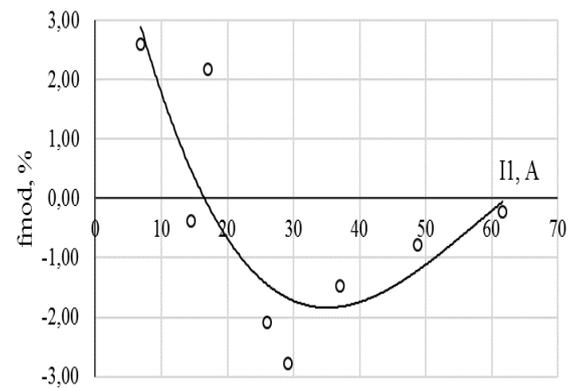


Рисунок 3.29 – Погрешность модели на основе СКН, $R_H = 1$ Ом, $f = 50$ Гц

3.4.5 Математическая модель трансформатора тока нулевой последовательности на основе уравнения динамического перемагничивания магнитопроводов

3.4.5.1 **Описание модели.** В основе данной модели лежит уравнения динамики перемагничивания [233]:

$$\frac{dB}{dt} = r \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2}\right) (H(t) - H_{cm}), \quad (3.3)$$

где H_{cm} – статическая петля гистерезиса, кривая намагничивания трансформатора (ОКН или СКН). Реализация модели в Matlab+Simulink представлена на рисунке 3.30.

Так как H_{cm} зависит от амплитуды первичного тока, в модели ТТНП на основе уравнения (3.3) потери в стали сердечника на гистерезис и вихревые токи приближенно учитывались постоянным активным сопротивлением, подключенным параллельно ветви намагничивания. Сопротивления определялась по формуле [235]:

$$r = 12\rho \frac{S^2 \omega^2}{d^2 V}, \quad (3.4)$$

где ρ – удельное сопротивление материала листа, Ом·м; d – толщина листа, м; V – объем сердечника, м³. Такое представление функции H_{cm} дает достаточно точное совпадение петель гистерезиса при значениях первичных токов до 10 А (рисунок 3.31) и совпадение петель при токах до 30 А с погрешностью до 10%.

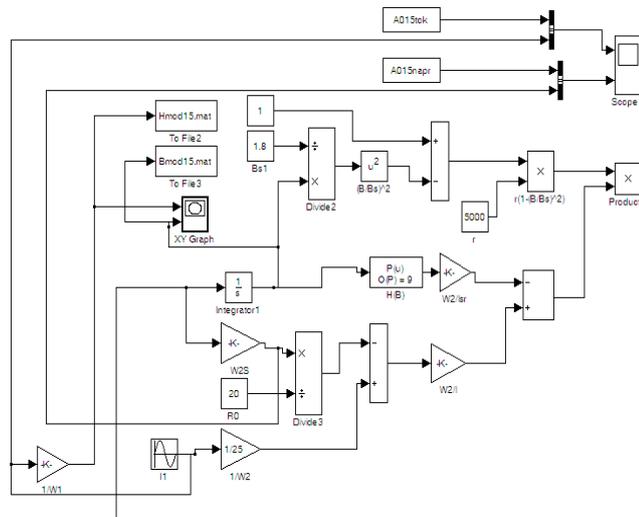


Рисунок 3.30 – Модель ТТНП на основе (3.2) в среде системы Matlab+Simulink

Такое представление функции H_{cm} дает достаточно точное совпадение петель гистерезиса при значениях первичных токов до 10 А (рисунок 3.31) и совпадение петель при токах до 30 А с погрешностью до 10%.

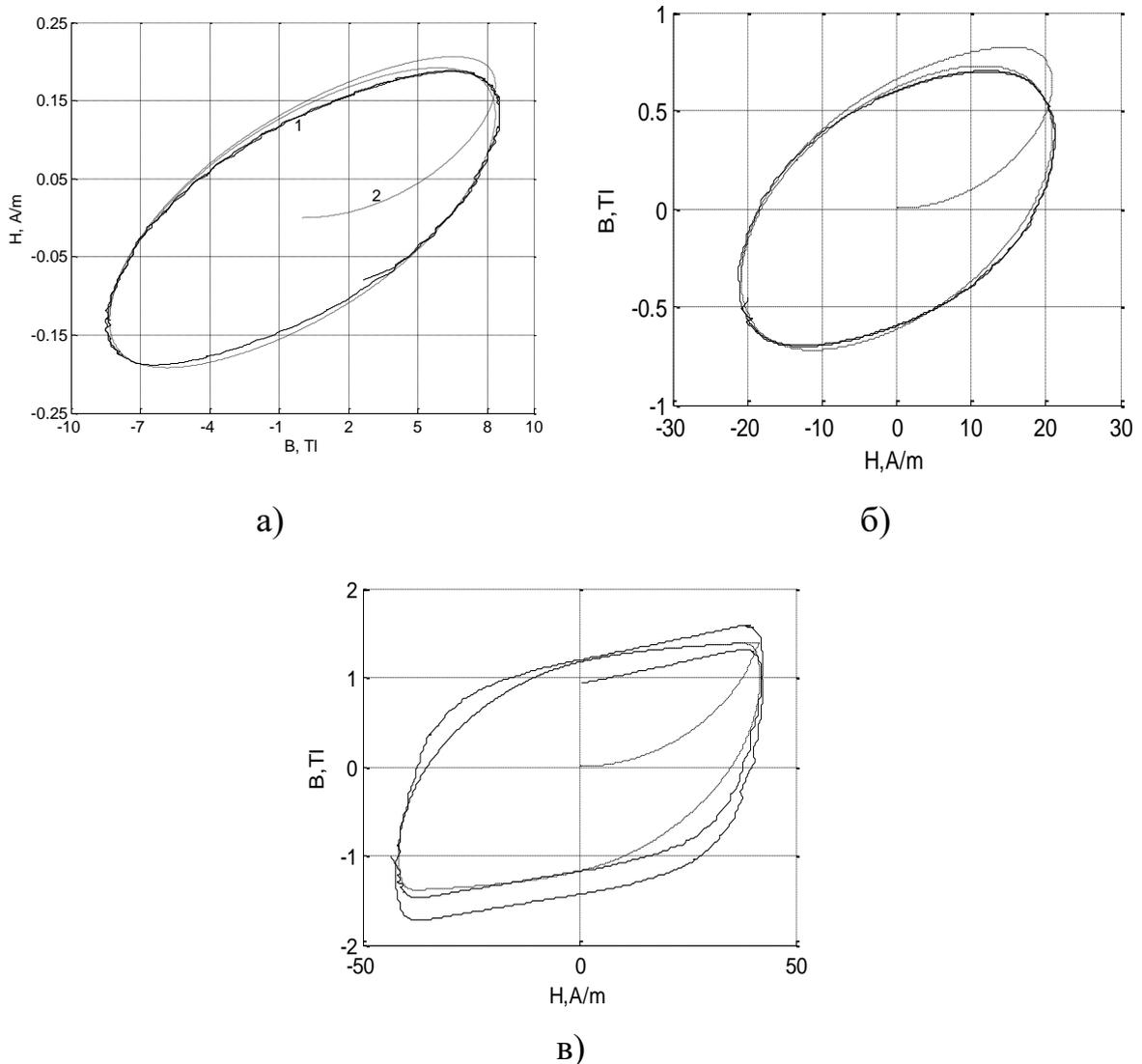


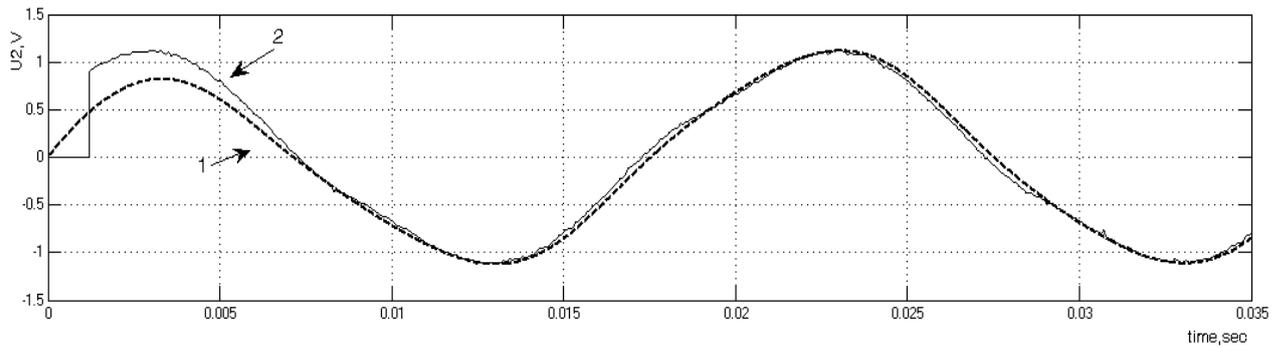
Рисунок 3.31 – Сравнение экспериментальных (сплошная кривая) и расчетных (пунктирная кривая) петель гистерезиса, полученных для моделей ТТП на основе уравнения динамики перемагничивания: а – $I_{ТТПН} = 1$ А; б – $I_{ТТПН} = 5$ А; в – $I_{ТТПН} = 10$ А

Режим испытаний моделей на основе уравнения перемагничивания аналогичны режимам испытаний модели ТТП типа ТЗЛМ на основе ОКН и на основе СКН.

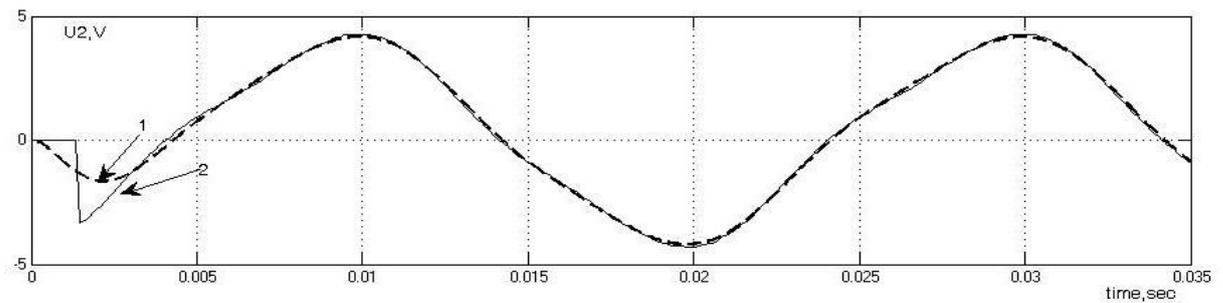
3.4.5.2 Оценка точности модели. Полученные на модели осциллограммы и зависимости сравнивались с аналогичными осциллограммами и зависимостями $U_{2ТТП} = f(I_{ТТП})$, полученными экспериментально для реального образца ТТП

типа ТЗЛМ с использованием программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ – 51 и цифрового осциллографа Tektronix.

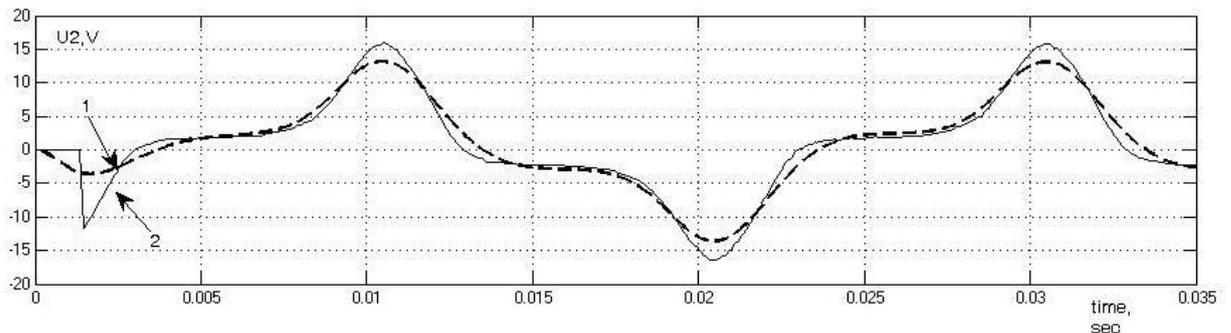
Модель обеспечивает приемлемую погрешность (до 10%) для интегральных и для мгновенных значений вторичного напряжения даже при работе ТТНП в режиме холостого хода в диапазоне первичных токов от 1 до 30 А (рисунок 3.32).



а)



б)



в)

Рисунок 3.32 – Сравнение полученных для моделей ТТНП расчетных (кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) осциллограмм: а – $I_{ТТНП} = 1$ А; б – $I_{ТТНП} = 5$ А; в – $I_{ТТНП} = 10$ А

Таким образом, применение уравнения (3.3) обеспечивает приемлемую точность модели в статических и динамических режимах даже при больших вторичных нагрузках. В режиме малых нагрузок (рисунки 3.33, 3.34 и 3.36) модель имеет

меньшую погрешность по сравнению с моделями на ОКН и СКН в широком диапазоне частот. ФЧХ модели на основе уравнения динамики перемагничивания в режиме малой нагрузки представлена на рисунке 3.35.

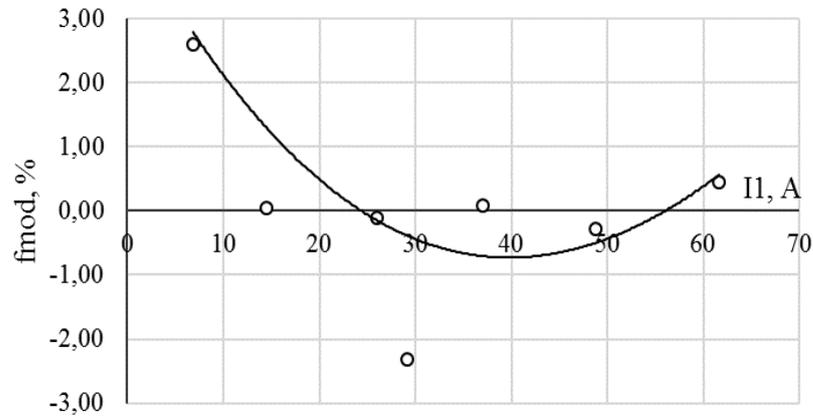


Рисунок 3.33 – Погрешность модели на основе уравнения динамики перемагничивания (3.2), $R_H = 1$ Ом, $f = 50$ Гц

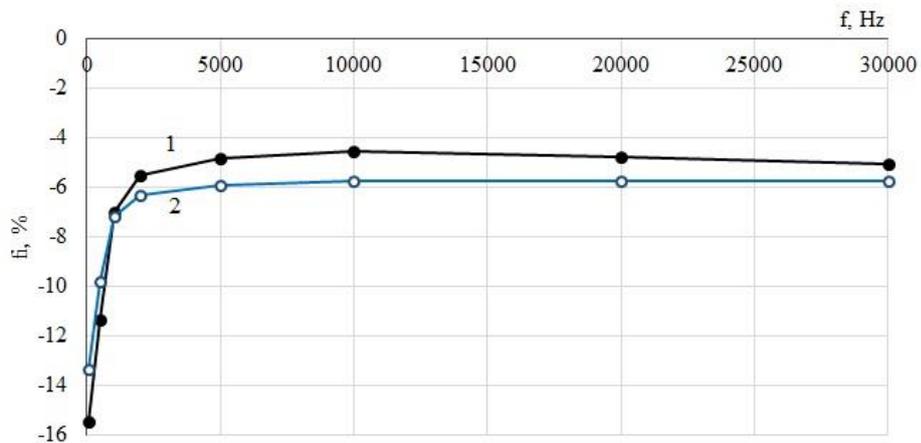


Рисунок 3.34 – АЧХ ТТП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_H = 1$ Ом: 1 – эксперимент; 2 – модель на основе уравнения (3.3)

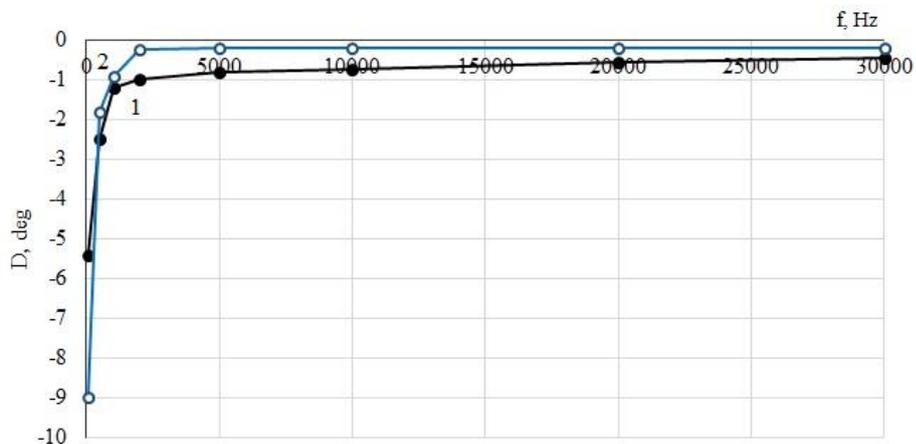


Рисунок 3.35 – ФЧХ ТТП типа ТЗЛМ в диапазоне частот до 30 кГц при $R_H = 1$ Ом: 1 – эксперимент; 2 – модель на основе уравнения (3.3)

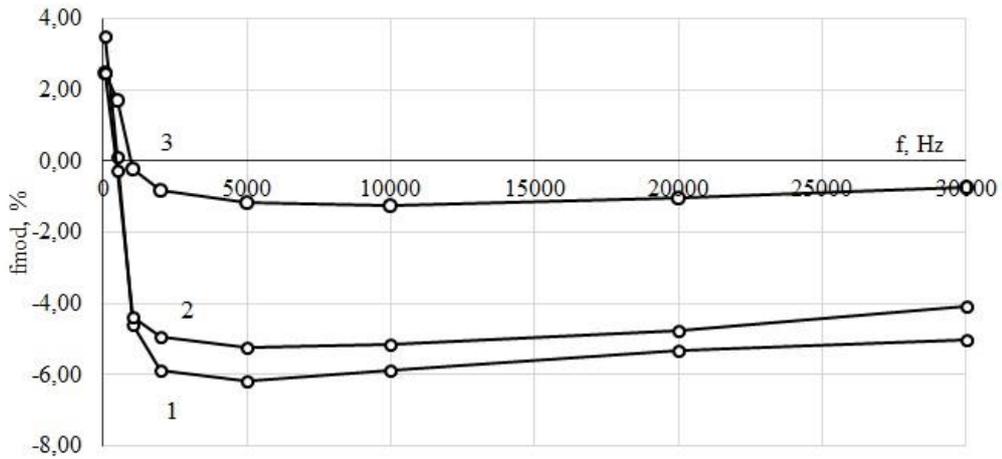


Рисунок 3.36 – Погрешности моделей ТТНП в зависимости от частоты, $R_H = 1$ Ом, $I_{ТТНП} = 10$ А: 1 – модель на основе ОКН; 2 – модель на основе СКН; 3 – модель на основе (3.3)

Для исследования работы ТТНП в переходных режимах были построены модели ТЗЛМ на основе уравнения (3.3) с использованием ОКН в качестве кривой насыщения.

3.4.6 Исследования достоверности и оценка точности разработанных моделей трансформаторов тока в переходных режимах

3.4.6.1 Методика исследования работы ТТНП в переходных режимах ОЗЗ. Вопросы работы фазных и кабельных трансформаторов тока на высших гармониках и в переходных режимах, исследованы недостаточно. Для экспериментальных исследований динамических режимов работы ТТНП применялся метод физико-математического имитационного моделирования с использованием программно-аппаратного комплекса РЕТОМ-51 и системы моделирования Matlab (рисунок 3.37). Тестовые сигналы переходных токов ОЗЗ для экспериментальных испытаний ТТНП были получены на математических моделях сетей 6-35 кВ, выполненных в системе моделирования Matlab. Полученные на математических моделях тестовые сигналы – токи $3i_0$ в переходных режимах ОЗЗ преобразовывались в осциллограммы в COMTRADE-формате. Для испытаний реальных образцов

ТТНП тестовыми сигналами применялся программно-аппаратный комплекс типа РЕТОМ-51, обеспечивающий возможность воспроизведения в цепях тока любого электромагнитного процесса, записанного в COMTRADE-формате.

Возможности устройства РЕТОМ-51 позволяют моделировать первичные токи нулевой последовательности с амплитудой до 60А в диапазоне частот до 500 Гц. Практические исследования с использованием РЕТОМ-51 показали, что для затухающих колебаний приемлемую точность воспроизведения COMTRADE-осциллограмм можно получить примерно до частоты 1 кГц. При исследованиях переходных режимов ТТНП амплитуду первичного тока также можно увеличить за счет увеличения числа витков первичной обмотки $W_{ITТНП}$.

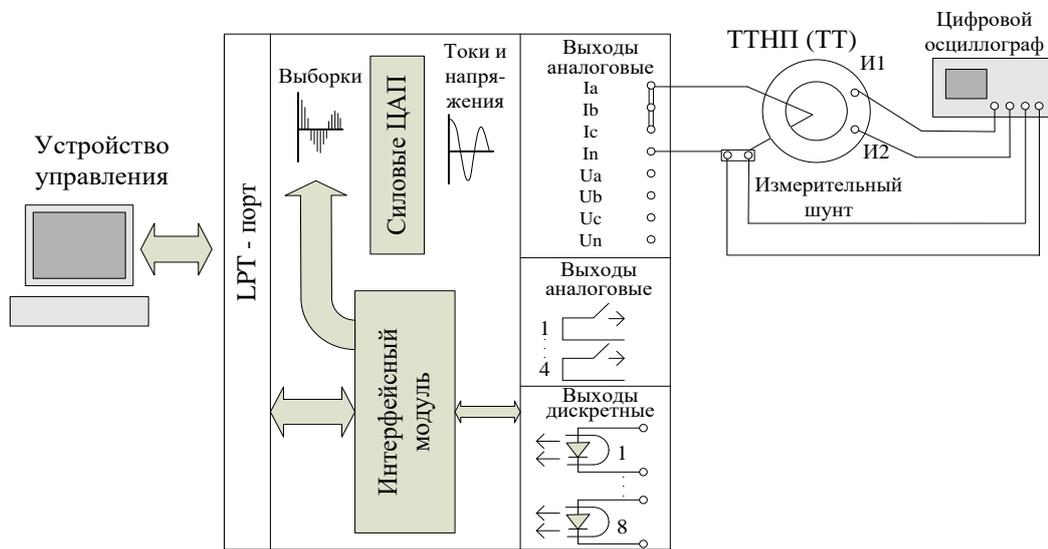


Рисунок 3.37 – Структурная схема системы для физико-математического моделирования динамических режимов работы ТТНП с использованием РЕТОМ

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что токовые погрешности кабельного ТТНП типа ТЗЛМ при малых вторичных нагрузках ($Z_e \leq 1 \text{ Ом}$) в диапазоне амплитуд первичных переходных токов до $\sim 400 \text{ А}$ не превышают 10 – 15 %.

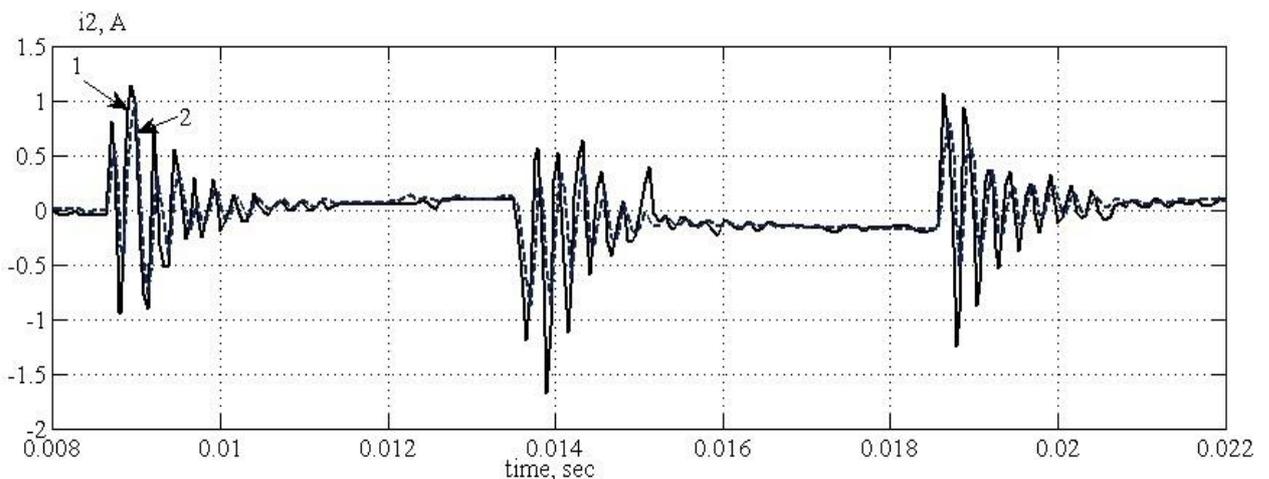
3.4.6.2 Исследование достоверности моделей работы кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности на математических моделях. Как было указано ранее, токи переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6 – 10 кВ содержат две основные частотные составляющие. При малых потерях в контуре нулевой последовательности обе составляющие имеют характер затухающих колебаний.

Практически в устройствах защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, используется диапазон частот до 3-5 кГц [например, 10]. Амплитуды переходных токов в сетях 6 – 10 кВ могут иметь значения от десятков до сотен и даже тысяч ампер. Поэтому представляет интерес оценка точности разработанных моделей ТНП при первичных токах, имеющих характер затухающих колебаний.

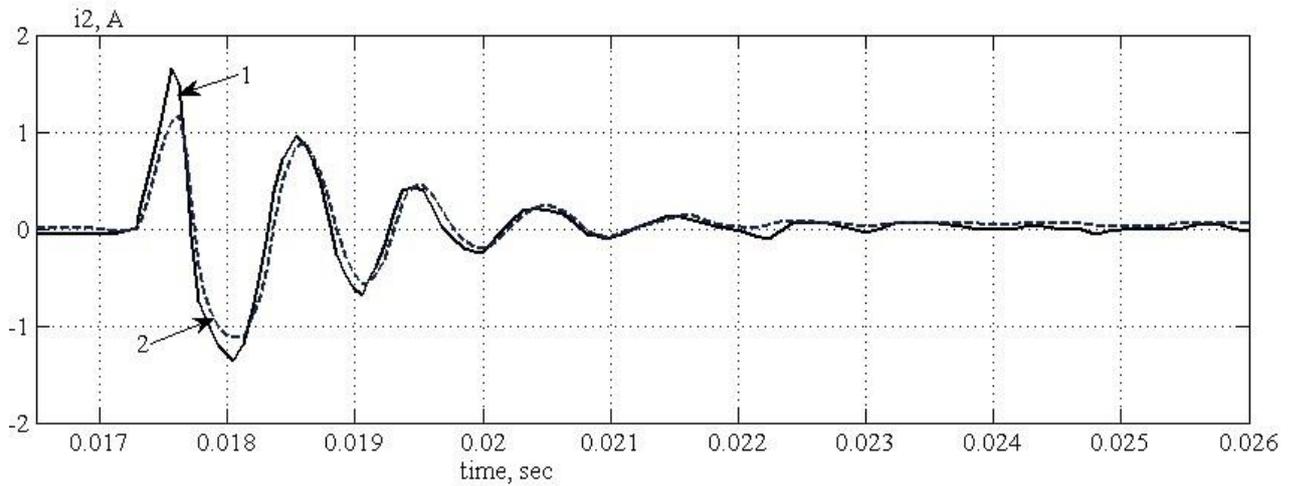
Для испытаний реального образца ТНП (типа ТЗЛМ) в переходных режимах использовалось устройство РЕТОМ-51 и COMTRADE-осциллограммы затухающих колебаний в диапазоне частот от 200 Гц до 500 Гц. Для получения переходных токов с большей частотой (до 5 кГц и выше) использовалось физическое моделирование колебательного разряда емкости. Испытания реального образца и моделей ТНП проводилось для режима малых вторичных нагрузок ($Z_e = 0,1 \dots 1 \text{ Ом}$). Полученные осциллограммы вторичных токов реального образца ТНП сравнивались с расчетными осциллограммами, полученными для моделей ТНП.

Анализ результатов экспериментальных испытаний и результатов моделирования показал, что модель на основе уравнения (3.3) при малых вторичных нагрузках ТНП в диапазоне частот до 5-10 кГц и амплитуде до $\sim 200 \text{ А}$ обеспечивает приемлемую (с погрешностями до 10 %) точность преобразования мгновенных значений первичного переходного тока (например, рисунок 3.38).

Уменьшение вторичной нагрузки ТНП приводит к повышению точности преобразования мгновенных значений первичного тока (например, рисунок 3.39).



а)



б)

Рисунок 3.38 – Осциллограммы вторичных токов реального ТНП (кривая 1) и модели на основе уравнения (3.3) (кривая 2) с вторичной нагрузкой $Z_c = 1$ Ом при имитации а – дугового перемежающегося ОЗЗ; б – затухающих колебаний первичного тока

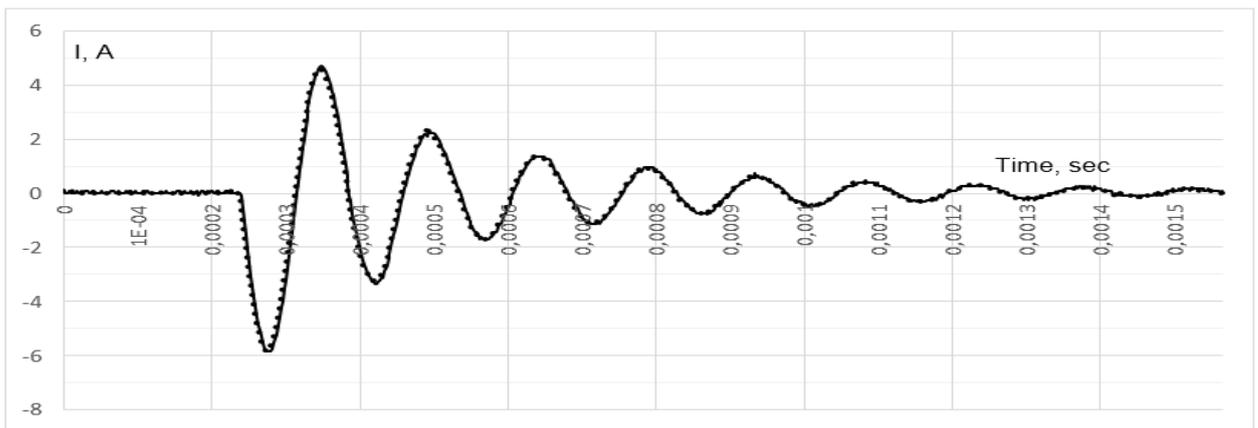


Рисунок 3.39 – Осциллограммы вторичных токов реального ТНП (сплошная кривая) и модели на основе уравнения (3.3) (пунктирная кривая) с вторичной нагрузкой $Z_c = 0,1$ Ом при затухающих колебаниях первичного тока

Таким образом, предложенная модель ТНП на основе уравнения динамики перемagnичивания магнитного сердечника (3.3) позволяет обеспечить приемлемую точность при исследованиях не только статических, но и динамических режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ, имеющих малое входное сопротивление по цепям тока $Z_B \leq 1$ Ом.

3.5 Математическая модель трансформатора напряжения контроля изоляции

3.5.1 Модель трансформатора напряжения. Для построения модели ТН на повышенных частотах необходимо учитывать наличие межвитковых и межобмоточных емкостей [236]. Для построения математической модели ТНКИ типа НТМИ-6-66 в среде Matlab+Simulink (рисунок 3.40) были экспериментально определены значения параметров Т-образной схемы замещения ТН (таблица 3.6), включая активное сопротивление и индуктивность ветки намагничивания, значения емкостей обмоток и межобмоточных емкостей.

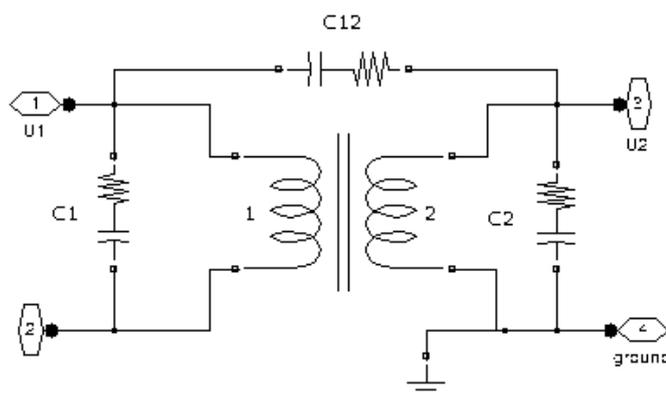


Рисунок 3.40 – Модель НТМИ-6-66 в Simulink

Таблица 3.6 – Параметры схемы замещения НТМИ, приведенные к первичному напряжению

Суммарное активное сопротивление обмоток, Ом	Суммарная индуктивность обмоток, Гн	Активное сопротивление ветви намагничивания, Ом	Индуктивность ветви намагничивания, Гн	Емкость между обмотками (C12), емкости обмоток (C1 и C2), пФ
3390	3,49	290000	480	0,242; 33; 0,31

3.5.2 Оценка точности модели НТМИ. Далее были определены АЧХ (рисунок 3.41) и ФЧХ (рисунок 3.42) модели в режиме холостого хода в диапазоне частот до 20 кГц. Полученные погрешности модели по амплитуде не превышают 5 % (рисунок 3.43). Данная модель была принята для дальнейших исследований влияния погрешностей ТН на точность способов ДОМЗЗ.

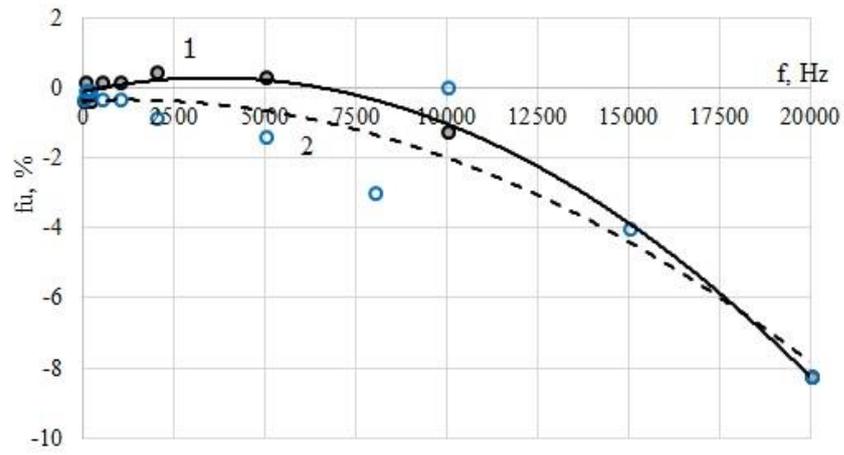


Рисунок 3.41 – Зависимость амплитудной погрешности НТМИ-6-66 от частоты в режиме холостого хода: 1 – эксперимент; 2 – модель

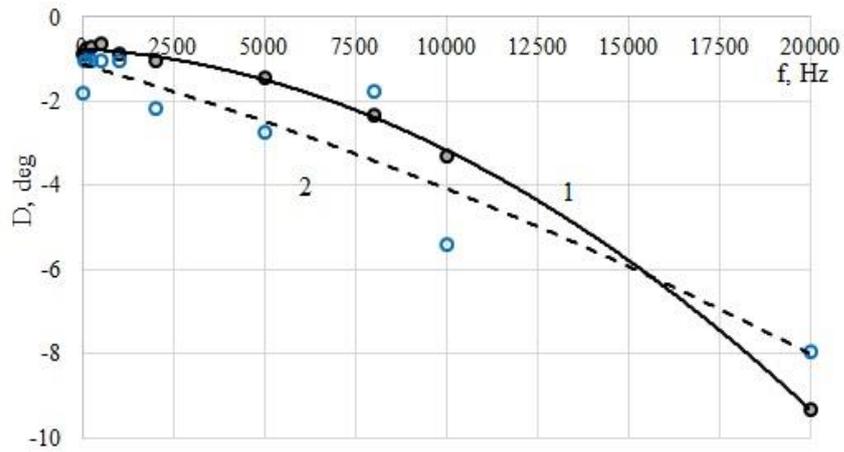


Рисунок 3.42 – Зависимость фазовой погрешности НТМИ-6-66 от частоты в режиме холостого хода: 1 – эксперимент; 2 – модель

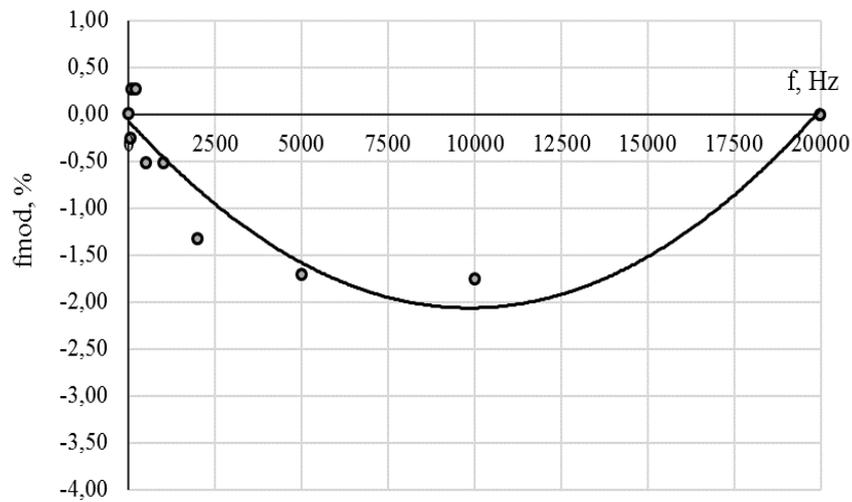


Рисунок 3.43 – Зависимость амплитудной погрешности модели НТМИ-6-66 от частоты в режиме холостого хода

3.6 Выводы по главе 3

3.6.1 Полученные из доступных источников и определенные экспериментально частотные характеристики образцов ТТНП и ТНКИ позволяют сделать вывод, что рабочий диапазон частот устройств ДОМЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ должен быть ограничен "сверху" частотой ~ 20 кГц условием приемлемой трансформации первичных сигналов, прежде всего, по цепям напряжения.

3.6.2 Оценка диапазона частот разрядной и зарядной составляющих токов переходного процесса при ОЗЗ показала, что уже при удаленности в несколько десятков метров (50 – 100 м и более), в переходном процессе можно выделить доминирующую разрядную частоту, которая, для распределительных кабельных сетей городского электроснабжения, как правило, не превышает 20 кГц, что позволяет использовать для задач ДОМЗЗ имеющиеся в большинстве случаев в эксплуатации электромагнитные датчики тока и напряжения, которые, однако, вносят погрешность в эти способы.

3.6.3 Для дальнейшего исследования влияния первичных датчиков тока и напряжения необходимы математические модели, отражающие их работу в широком частотном диапазоне.

3.6.4 Исследовано три подхода к построению модели кабельного трансформатора тока, которые можно использовать для построения математической модели трансформатора тока любого типа, основанные на использовании стандартной модели насыщаемого трансформатора в Matlab+Simulink с основной кривой намагничивания в качестве кривой насыщения, модели в Matlab+Simulink с «усредненной» средней кривой намагничивания в качестве кривой насыщения и уравнения динамического перемагничивания магнитопроводов (3.3).

3.6.5 На основе экспериментальных исследований и моделирования на ЭВМ показано, что модель ТТНП на основе ОКН в режиме холостого хода дает приемлемые погрешности (до $\sim 10\%$) для интегральных (среднеквадратичных) значений вторичного напряжения только на линейном участке кривой намагничивания. Погрешности модели на ОКН по мгновенным значениям могут значительно превы-

шать 10%, что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения. При работе ТТНП с нагрузкой $Z_H \leq 1$ Ом токовая погрешность модели на основе ОКН уменьшается до 10% в исследуемом диапазоне частот (до 30 кГц).

3.6.6 Модели ТТНП на основе «усредненной» СКН обеспечивают снижение токовой и угловой погрешностей как по интегральным, так и по мгновенным значениям вторичного напряжения в режиме холостого хода до 10% и обеспечивают существенное уменьшение погрешностей по мгновенным значениям в диапазоне первичных токов ТТНП от 1 до 15 А. При работе ТТНП с вторичной нагрузкой $Z_H \leq 1$ Ом погрешности моделей на основе СКН не превышают единиц процентов. В режиме малой нагрузки модель имеет меньшую погрешность, по сравнению с моделью на ОКН.

3.6.7 Подход к моделированию ТТНП, основанный на моделировании петли гистерезиса, с учетом потерь в магнитопроводе трансформатора имеют большую точность даже при больших нагрузках и являются универсальными, т.е. подходят как для исследования работы трансформатора в установившихся, так и в переходных режимах. В режиме малой нагрузки (установившийся режим) модель имеет наименьшую погрешность, по сравнению с моделями на ОКН и СКН.

Сравнение экспериментально полученных вторичных токов и вторичных токов модели в переходных режимах (дуговых перемежающихся ОЗЗ и затухающих колебаниях первичного тока) при малых вторичных нагрузках ТТНП $Z_H = 0,1 \dots 1$ Ом в диапазоне частот до 5-10 кГц и амплитуде до ~ 400 А, показало, что модель на основе уравнения динамики перемагничивания (3.3) обеспечивает приемлемую (с погрешностями до 10 %) точность преобразования мгновенных значений первичного переходного тока.

3.6.8 Получена модель ТН типа НТМИ-6-66, учитывающая наличие емкостей обмоток и межобмоточных емкостей, имеющая допустимые (менее 5% по амплитуде и 5° по фазе) погрешности в диапазоне частот до 20 кГц в режиме холостого хода.

Основные результаты исследований данной главы отражены в публикациях [73–86, 89, 90, 92, 95, 97, 99, 101].

Глава 4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ДИСТАНЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6 – 10 кВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

4.1 Способы и алгоритмы дистанционного определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

4.1.1 Основные методы ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. В главе 1 было показано, что для определения места (зоны) ОЗЗ на КЛ, находящихся под рабочим напряжением, в кабельных сетях 6–10 кВ наиболее целесообразно применять методы, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю. К ним относятся:

- 1) методы, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса;
- 2) методы, основанные на сравнении измеренных значений электрических величин переходного процесса и значений, полученных с использованием алгоритмической (имитационной) модели контролируемой КЛ.

В главе 2 были исследованы информационные параметры электрических величин переходного процесса, которые могут использоваться для разработки способов ДОМЗЗ на КЛ 6–10 кВ под рабочим напряжением. На основе анализа основных свойств указанных параметров показано, что устойчивостью к влиянию таких факторов, как суммарный емкостный ток $I_{c\Sigma}$ и переходное сопротивление в месте повреждения может обеспечить способ, основанный на измерении напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в момент перехо-

да последнего через нулевое значение, а также способ, основанный на использовании алгоритмической модели контролируемого объекта.

4.1.2 Способ ДОМЗЗ, основанный на измерении напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в момент перехода последнего через нулевое значение. Сущность способа определяется выражением (2.24), полученным на основе схемы замещения по рисунку 2.2

$$L(t_{0i}) = u_{\phi}(t_{0i}) / \frac{d3i_0}{dt}(t_{0i}), \quad (4.1)$$

где t_{0i} – момент перехода тока $3i_0(t)$ через нулевое значение; $u_{\phi}(t_{0i})$ – напряжение на поврежденной фазе в момент t_{0i} ; $\frac{d3i_0}{dt}(t_{0i})$ – значение производной переходного тока $i_0(t)$ в момент t_{0i} .

Индуктивность $L(t_{0i})$ в (4.1) связана с расстоянием до места повреждения соотношением

$$L = \frac{2L_1^{(1км)} + L_0^{(1км)}}{3} l_3 = L^{(1км)} l_3, \quad (4.2)$$

где $L_1^{(1км)}$ и $L_0^{(1км)}$ – соответственно погонные (удельные) индуктивности прямой и нулевой последовательности контролируемой КЛ; l_3 – расстояние до места ОЗЗ от начала КЛ.

Из (4.1) и (4.2) получим

$$l_3(t_{0i}) = \frac{u_{\phi}(t_{0i})}{L^{(1км)} \frac{d3i_0}{dt}(t_{0i})}. \quad (4.3)$$

Рассмотренный алгоритм определения места ОЗЗ по данному способу, не учитывающий влияния дополнительных факторов, искажающих замер, в дальнейшем будем называть базовым. Алгоритм позволяет достаточно просто решить задачу определения места ОЗЗ в online-режиме и за счет этого уменьшить затраты времени на определение поврежденного участка и отключение его без нарушения электроснабжения потребителей. Упрощенная структурная схема реализации базового алгоритма в online-режиме представлена на рисунке 4.1.

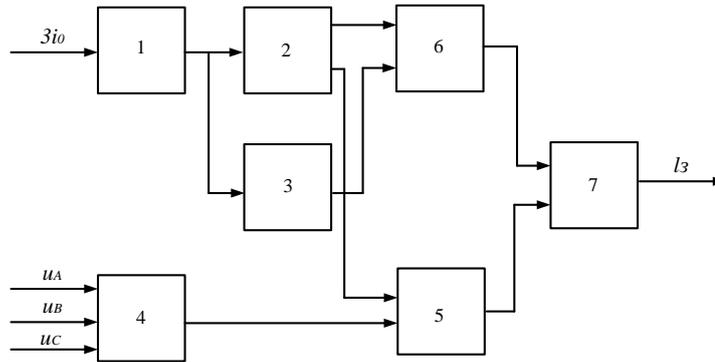


Рисунок 4.1 – Структурная схема реализации алгоритма ДОМЗЗ, основанного на измерении напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в момент перехода последнего через нулевое значение, в online-режиме:

1 – пороговый элемент; 2 – блок фиксации момента перехода сигнала через нуль;
 3 – дифференциатор; 4 – избиратель напряжения поврежденной фазы; 5, 6 – элементы памяти, запоминающие значение сигнала в заданный момент времени; 7 – вычислитель расстояния l_3 до места ОЗЗ по параметрам прямой и нулевой последовательности КЛ

Работа схемы по рисунку 4.1 проиллюстрирована осциллограммами на рисунках 4.2 и 4.3 для случая ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6 кВ с $I_{c\Sigma} = 30$ и 10 А при $l_3 = 1$ км. Расчетные осциллограммы получены на упрощенной модели кабельной сети в Matlab, соответствующей схеме замещения сети по рисунку 2.1.

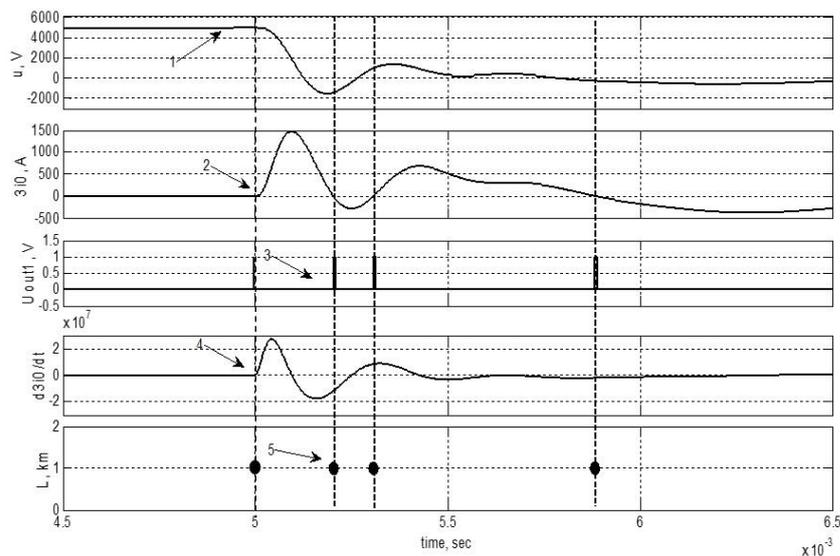


Рисунок 4.2 – Осциллограммы электрических величин переходного процесса и расчетное значение расстояния до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, $R_n = 0$ и $l_3 = 1$ км: 1 – напряжение на поврежденной фазе $u(t)$; 2 – ток $3i_0(t)$; 3 – сигналы на выходе блока фиксации моментов перехода $3i_0(t)$ через нулевое значение; 4 – производная $3di_0(t)/dt$; 5 – расчетное значение расстояния до места ОЗЗ по формуле (4.3) для t_{0i}

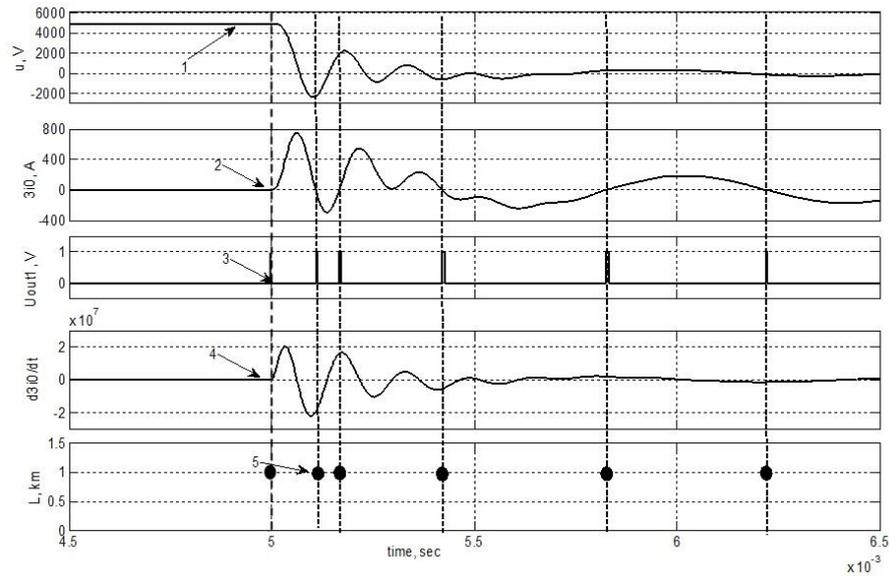


Рисунок 4.3 –Осциллограммы электрических величин переходного процесса и расчетное значение расстояния до места ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\sum} = 10$ А, $R_n = 0$ и $l_3 = 1$ км: 1, 2, 3, 4 и 5 – то же самое, что и на рис. 4.2

При практической реализации устройства на основе рассмотренного способа схема по рисунку 4.1 должна быть дополнена пусковым органом, фиксирующим момент возникновения броска переходного тока $3i_0$.

4.1.3 Способ ДОМЗЗ, основанный на использовании имитационной алгоритмической модели контролируемого объекта (АМО). Метод ДОМЗЗ с применением АМО основан на процедуре определения места повреждения как поиска минимума целевой функции (функции невязки), зависящей от аварийных параметров, в качестве которых, как правило, рассматриваются расстояние до места повреждения и переходное сопротивление в месте повреждения [72]. Для реализации данного способа в целях ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ используется имитационная алгоритмическая модель поврежденной КЛ, в которой в момент времени t_0 , соответствующий пробоем изоляции, моделируется возникновение ОЗЗ посредством подачи на ее входы предварительно зарегистрированных наблюдаемых величин (напряжений, токов) и определяется реакция модели (например, в виде токов, тока нулевой последовательности и др.). Полученные посредством АМО модельные сигналы далее используются для сравнения с зарегистриро-

ванными наблюдаемыми величинами и построения функции их невязки от изменяемых параметров модели (например, l_3 и R_{II}).

Таким образом, алгоритм поиска места ОЗЗ с использованием АМО, предложенный в [72, 205], должен обеспечивать выполнение следующих операций:

1) регистрацию мгновенных значений наблюдаемых сигналов, например, токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$;

2) расчет реакции АМО с заданными аварийными параметрами l_3 и R_{II} , например, тока $\hat{i}(t)$, на воздействие поданных на входы модели зарегистрированных наблюдаемых величин (напряжений $u(t)$, токов $i(t)$);

3) вычисление невязки сигналов $i(t)$ и $\hat{i}(t)$ при заданных аварийных параметрах l_3 и R_{II} .

Операции по пп. 1–3 повторяются до получения значений l_3 и R_{II} , соответствующих минимуму невязки.

Недостатком рассмотренного алгоритма является необходимость предварительной регистрации наблюдаемых величин – токов $i(t)$ и напряжений $u(t)$ на интервале времени наблюдения за переходным процессом при ОЗЗ, что не позволяет обеспечить определение места повреждения на КЛ в online-режиме при дуговых прерывистых ОЗЗ, когда особенно необходимо быстрое действие устройств ДОМЗЗ для уменьшения вероятности перехода ОЗЗ в двойные или многоместные замыкания с возможным нарушением электроснабжения потребителей.

Кроме того, предложенный в [72, 205] способ определения места ОЗЗ с использованием АМО основан на измерении вектора наблюдений не только фазных напряжений, но и фазных токов, что в кабельных сетях 6–10 кВ технически в большинстве случаев невозможно из-за отсутствия фазных ТТ в средней фазе (фазе В).

Быстродействие метода ДОМЗЗ, основанного на использовании АМО, в online-режиме в кабельных сетях 6–10 кВ можно увеличить, если пренебречь влиянием переходного сопротивления R_{II} в месте повреждения на замер расстояния l_3

до места повреждения. Обоснованность данного допущения определяется тем, что при ОЗЗ в КЛ переходное сопротивление в месте повреждения в момент пробоя изоляции определяется только сопротивлением электрической дуги, падение напряжения на которой в кабелях 6–10 кВ не превышает значений $u_d \approx 50\text{--}100$ В, а активное динамическое сопротивление дуги – тысячных долей Ом [10, 19, 238, 239]. Так подавляющая часть пробоев изоляции в кабельных сетях 6–10 кВ происходят при напряжении на поврежденной фазе $u_{np} \geq (0,5 \dots 1,0)U_{фm} = \sqrt{2}(6000 \dots 10000)/\sqrt{3} \approx 2500 \dots 8000$ В, падение напряжения на дуге u_d практически не оказывает влияния на затухание свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ. В [10] на основе экспериментальных исследований в действующих кабельных сетях 6–10 кВ показано, что основной причиной затухания свободных составляющих переходного тока являются активные потери в контуре тока ОЗЗ.

Если в первом приближении пренебречь влиянием R_{II} на замер расстояния до места ОЗЗ в кабельных сетях по параметрам переходного процесса, то в качестве аварийного параметра АМО можно рассматривать только одну величину – расстояние до места ОЗЗ l_3 . Используя в алгоритме ДОМЗЗ не одну, а несколько АМО с различными значениями одного аварийного параметра l_3 , можно получить зависимость невязки наблюдаемой и модельной величины, например, токов $3i_0(t)$ и $3i_0(t)$, и по минимуму функции невязки определить искомое расстояние $l_{3,расч}$ до места повреждения непосредственно в online-режиме без предварительной регистрации наблюдаемых величин и проведения последующих вычислений с использованием специальной программы. Число используемых в алгоритме моделей контролируемого объекта с различными значениями параметра l_3 определяется только требованиями к точности расчетов и, как показывают предварительные расчеты, может составлять от 3 до 5.

На рисунке 4.4 приведена структурная схема способа ДОМЗЗ с применением АМО, основанного на использовании рассмотренных выше принципов.

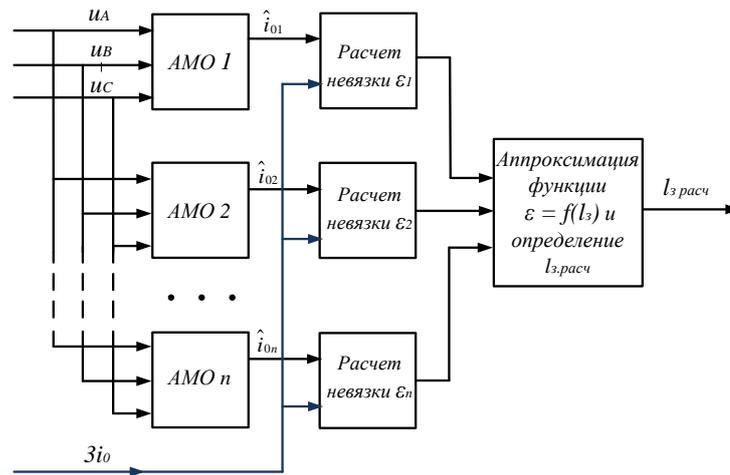


Рисунок 4.4 – Структурная схема реализации способа ДОМЗЗ с применением нескольких АМО с различными значениями аварийного параметра l_3

Таким образом, предлагаемый способ определения места ОЗЗ в online-режиме в кабельных сетях 6–10 кВ с применением АМО основан на следующих основных принципах и операциях:

1) в качестве наблюдаемых величин используются фазные напряжения и ток нулевой последовательности, для измерения которых на ЦП и РП кабельных сетей 6–10 кВ имеются необходимые первичные преобразователи напряжения и тока (ТНКИ и ТТНП);

2) в целях упрощения алгоритма и повышения его быстродействия не учитывается влияние на замер расстояния до места повреждения l_3 переходного сопротивления R_{II} электрической дуги в месте пробоя изоляции в переходном режиме ОЗЗ и в качестве аварийного параметра АМО рассматривается только l_3 ;

3) в целях повышения быстродействия алгоритма и обеспечения возможности определения места повреждения в online-режиме в алгоритме используются не одна, а несколько АМО с различными значениями аварийного параметра l_3 ;

4) в качестве величин, подаваемых на входы АМО в момент времени t_0 , соответствующий моменту пробоя изоляции (возникновения ОЗЗ на контролируемой КЛ), используются фазные напряжения;

5) в качестве реакции каждого АМО с заданным аварийными параметром l_3 на воздействие поданных на входы модели наблюдаемых напряжений используется ток нулевой последовательности $\hat{i}_0(t)$;

б) в online-режиме определяются значения невязки наблюдаемого тока и модельного тока нулевой последовательности для каждой из АМО;

7) по найденным значениям невязки и заданным для каждой АМО значениям l_3 строится аппроксимация функции невязки от расстояния до места повреждения $\varepsilon = f(l_3)$;

8) по уравнению $\varepsilon = f(l_3)$ определяется расчетное значение расстояния до места повреждения $l_{3,расч}$, соответствующее минимуму невязки ε .

4.1.4 Факторы, влияющие на точность способов ДОМЗЗ. Рассмотренные в главах 1 и 2 основные достоинства и недостатки способов ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, включая способы по пп. 4.1.3 и 4.1.4, не учитывают влияние на точность замера расстояния до места повреждения ряда факторов, к основным из которых относятся:

1) необходимость ограничения рабочего диапазона частот устройств ДОМЗЗ, обусловленная особенностями частотных характеристик первичных преобразователей тока и напряжения, прежде всего, электромагнитных ТН (см. главу 3);

2) особенности распределения емкостных токов ОЗЗ, не позволяющие измерить с помощью ТТНП собственный емкостный ток поврежденного присоединения;

3) изменение спектра тока ОЗЗ, прежде всего, его разрядной составляющей при изменениях положения точки ОЗЗ на поврежденной КЛ, обуславливающее с учетом пп. 1 дополнительные погрешности замера;

4) многочастотный характер разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, обусловленный распределенным характером параметров КЛ и реальной конфигурацией кабельной сети, обуславливающий дополнительные погрешности измерения параметров электрических величин переходного

процесса, например, момента перехода тока через нулевое значение, производной переходного тока в момент перехода последнего через нуль и др.;

5) зависимость от частоты тока переходного процесса параметров КЛ (индуктивностей и активных сопротивлений жил и оболочки кабеля);

6) ток нагрузки в поврежденной фазе КЛ;

7) амплитудные и угловые погрешности ТТНП и ТНКИ и др.

Определенное влияние на точность замера могут оказывать также величина суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, активные потери в контуре тока ОЗЗ, переходное сопротивление дуги в месте пробоя изоляции, начальная фаза пробоя изоляции, режим заземления нейтрали сети, высшие гармоник тока ОЗЗ и др. Потому реальная эффективность способов ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, должна оцениваться с учетом указанных выше влияющих факторов.

4.1.5 Основные задачи и метод исследования способов ДОМЗЗ. С учетом изложенного в п. 4.1.4, основными задачами исследований в данной главе являются:

1) исследование погрешностей и разработка методов повышения точности замера расстояния до места повреждения способа ДОМЗЗ, основанного на измерении напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $i_0(t)$ в момент перехода последнего через нулевое значение, в условиях влияния факторов, указанных в п. 4.1.4;

2) исследование погрешностей и разработка методов повышения точности замера расстояния до места повреждения способа ДОМЗЗ, основанного на использовании АМО, в условиях влияния факторов, указанных в п. 4.1.4.

Учитывая сложность переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при ОЗЗ и алгоритмов функционирования устройств ДОМЗЗ, выполненных на основе указанных выше способов, для решения поставленных задач применялось моделирование в системе Matlab.

4.2 Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования погрешностей способов ДОМЗЗ

4.2.1 Эквивалентирование модели кабельной сети 6–10 кВ для исследования погрешностей ДОМЗЗ, обусловленных различными влияющими факторами. При использовании для исследования переходных процессов при ОЗЗ полных имитационных моделей, достаточно точно отражающих особенности конфигурации и параметры всех элементов кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения (например, рисунок 1.7), время проведения только одного вычислительного эксперимента даже при применении достаточно быстродействующих ПК в некоторых случаях может достигать, как показали расчеты, десятков минут. Кроме того, особенности конфигурации кабельной сети 6–10 кВ сами по себе могут являться одним из факторов, обуславливающих дополнительные погрешности замера расстояния до места повреждения, что затрудняет установление закономерностей влияния на точность замера l_3 рассматриваемого фактора. Эквивалентирование сложной кабельной сети упрощает решение данной задачи, а также позволяет значительно уменьшить затраты времени на проведение вычислительных экспериментов.

В [16, 214, 221] показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ даже при сравнительно небольших удаленностях места ОЗЗ от шин источника питания – порядка нескольких десятков метров – основное влияние на переходный ток в месте повреждения оказывают параметры поврежденной линии. В [237] рассмотрены принципы эквивалентирования сложных кабельных сетей среднего напряжения при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ и показано, что при указанных выше значениях удаленности l_3 места ОЗЗ от шин источника питания для оценки интегральных значений тока ОЗЗ (среднеквадратичного, средневыпрямленного) достаточно точная модель необходима только для поврежденной линии, а линии неповрежденной части сети можно представить упрощенной эквивалентной схемой замещения с сосредоточенными параметрами (рисунок 4.5).

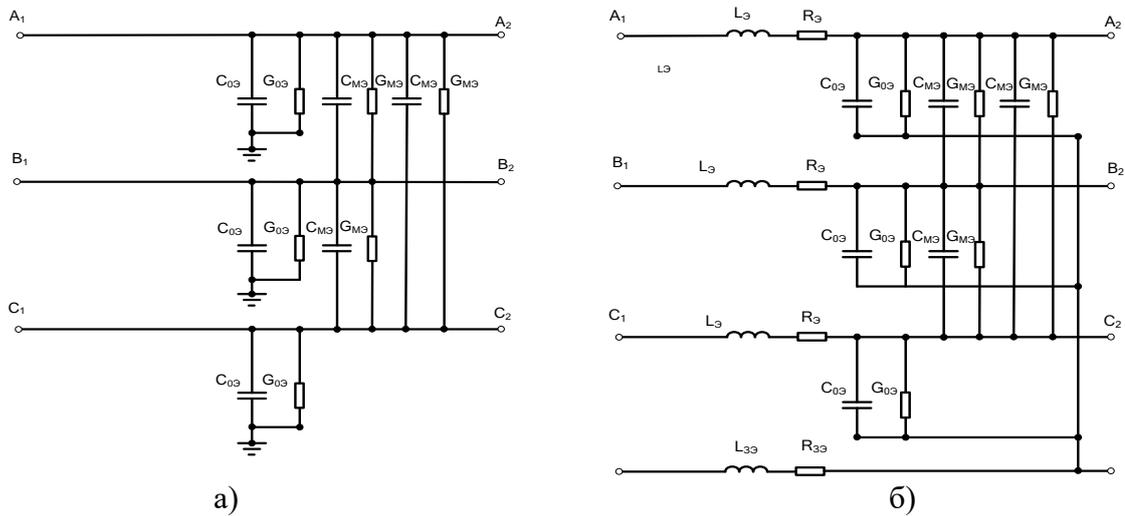


Рисунок 4.5 – Эквивалентные схемы замещения неповрежденных КЛ сетей 6 – 10 кВ для оценки интегральных значений переходного тока ОЗЗ: а – эквивалентная схема замещения, учитывающая только емкостные и активные проводимости; б – эквивалентная схема замещения, учитывающая емкостные и активные проводимости и продольные активно-индуктивные сопротивления

Значения емкостных и активных проводимостей фаз на землю $C_{0Э}$ и $G_{0Э}$ в эквивалентной схеме замещения выбирается таким образом, чтобы не изменились суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$ и его активная составляющая $I_{a\Sigma}$, а значения междуфазных емкостей и проводимостей принимаются такими, чтобы соотношения $C_{0Э}/C_{0М}$ и $G_{0Э}/G_{МЭ}$ были равны соответствующим соотношениям в полной схеме сети.

Рисунок 4.6 иллюстрируют применение данного способа эквивалентирования кабельных сетей 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при ОЗЗ.

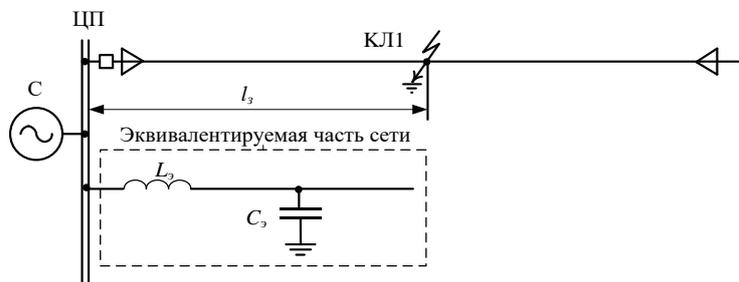


Рисунок 4.6 – Эквивалентирование неповрежденных линий кабельной сети 6–10 кВ при расчетах интегральных значений переходного тока ОЗЗ

Более существенное влияние переходные токи неповрежденных КЛ оказывают на параметры мгновенных значений переходного тока в месте ОЗЗ (напри-

мер, максимального значения, момента перехода через нулевое значение, производной в заданный момент времени и др.). Потому при оценке параметров мгновенных значений переходного тока ОЗЗ должны применяться более точные модели неповрежденных КЛ, однако и в том случае для удаленных участков сети допустимо представление их эквивалентами по рисунку 4.5.

На рисунке 4.7 показан пример эквивалентирования неповрежденных линий при расчетах параметров мгновенных значений переходного тока в месте ОЗЗ.

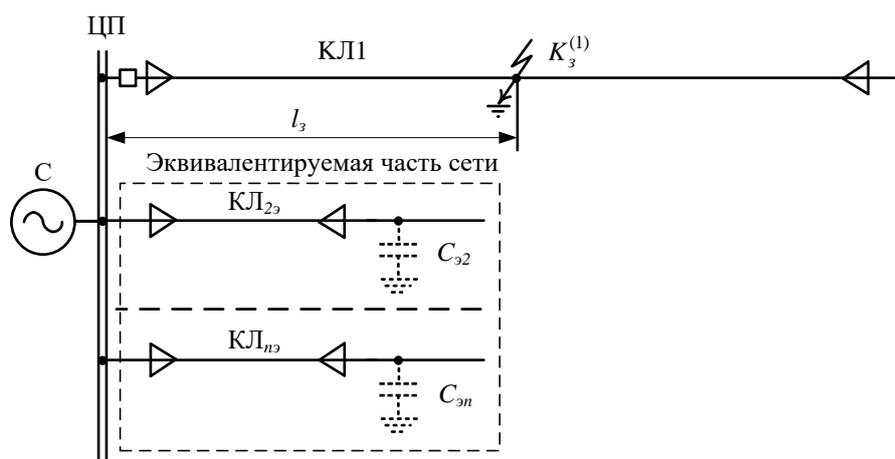


Рисунок 4.7 – Эквивалентирование неповрежденных присоединений кабельной сети 6–10 кВ при расчетах мгновенных значений переходного тока ОЗЗ

Следует отметить, что при достаточно больших удаленностях места ОЗЗ от шин (например, порядка 1 км и более достаточно точную оценку параметров переходного тока в месте ОЗЗ можно получить и с применением схем замещения по рисунку 4.6.

4.2.2 Имитационная модель кабельной сети 6 кВ для комплексных исследований эффективности методов ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса. Комплексная проверка эффективности предложенных способов ДОМЗЗ была выполнена на имитационной модели реальной кабельной сети 6 кВ системы электроснабжения одного из городов Российской Федерации (рисунок 4.8).

Моделировались участки кабельной сети, ЩП которых являются параллельно работающие 3 и 4 секции шин 6 кВ ПС "Северная", от которых осуществляется

электроснабжение 4-х распределительных подстанций: РП-1, РП-2, РП-3 и РП-13. Параметры линий моделируемого участка сети приведены на рисунке 4.8.

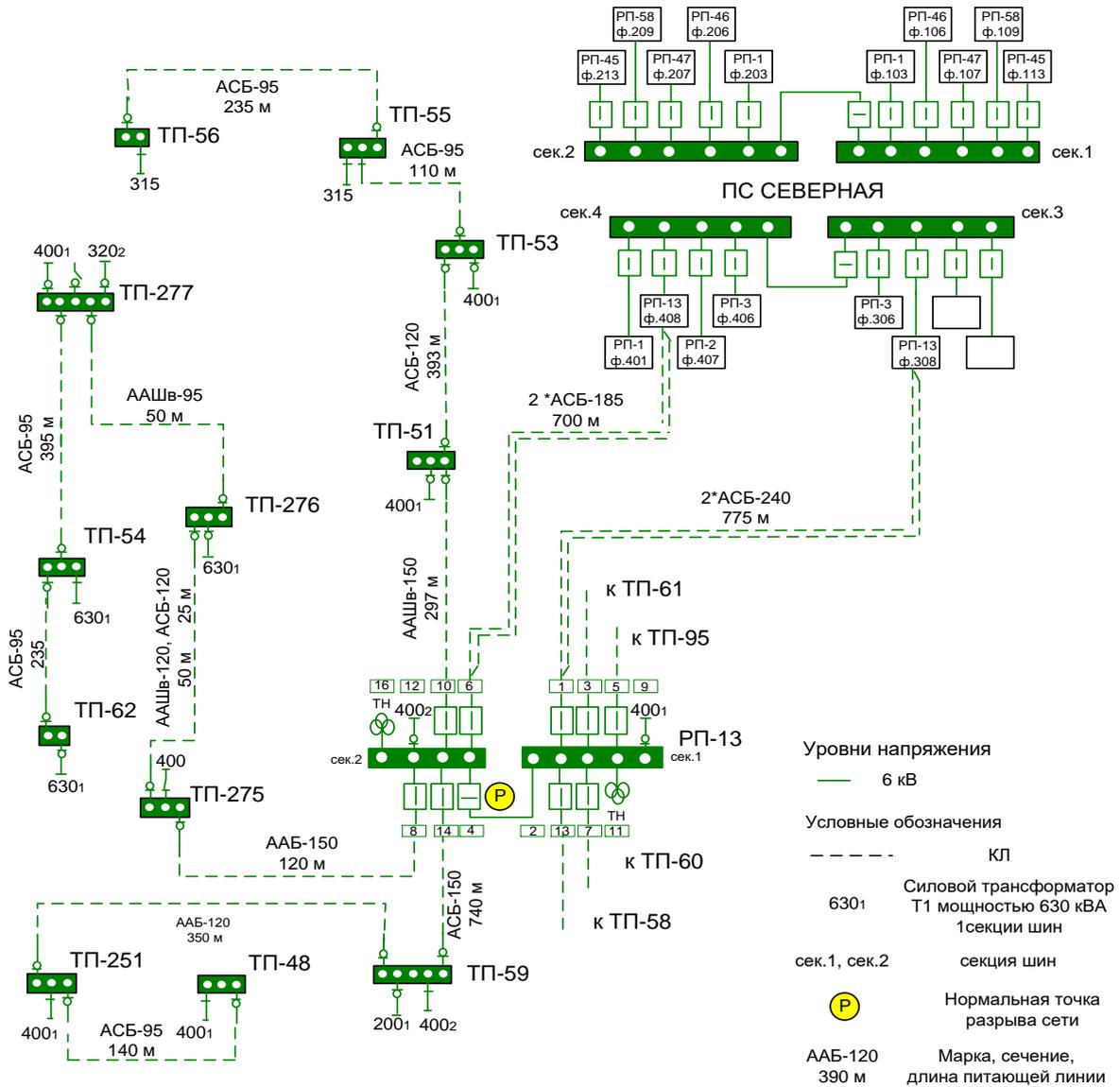


Рисунок 4.8 – Схема моделируемой распределительной кабельной сети 6 кВ

Имитационная модель кабельной сети по рисунку 4.8, выполненная в системе Matlab, приведена на рисунке 4.9.

Участок кабельной сети, питаемый от шин секции 2 РП-13, включает модели всех магистральных КЛ, питающих ТП. Участки сети, питаемые от шин секции 1 РП-13 и от РП-1, РП-2 и РП-3, представлены в общей модели эквивалентами по схеме рисунка 4.7. Суммарный емкостный ток электрически связанной сети $I_{c\Sigma}$ примерно равен 30 А.

Первичные преобразователи тока нулевой последовательности, установленные в начале кабельных магистралей, и первичные преобразователи напряжения нулевой последовательности в комплексной модели представлены моделями ТТП типа ТЗЛМ и ТНКИ типа НТМИ-6-66 (см. главу 3).

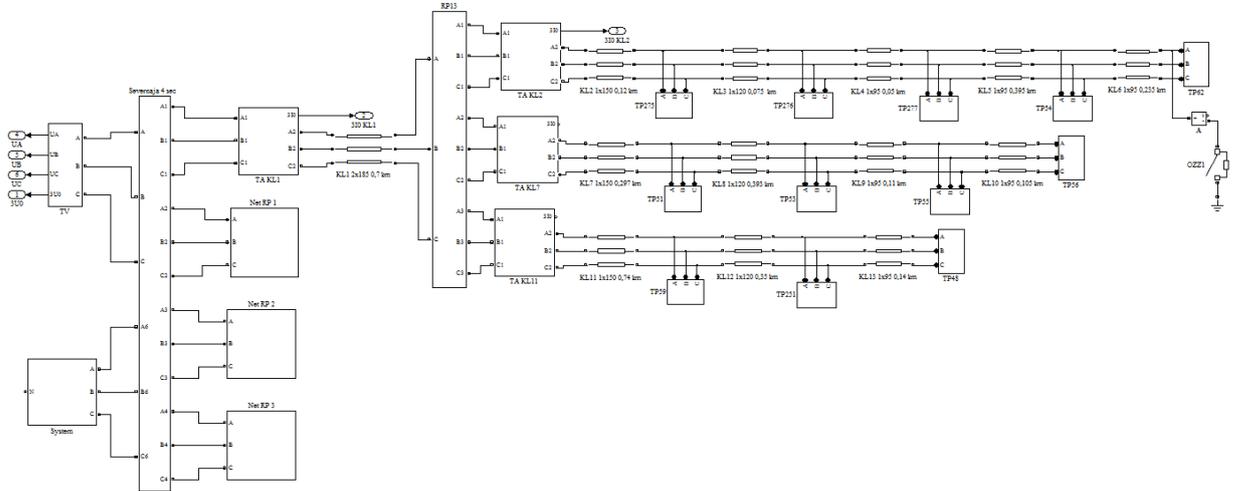


Рисунок 4.9 – Схема имитационной модели реальной кабельной сети 6 кВ по рис. 4.8 для комплексного исследования факторов, влияющих на точность ДОМЗЗ

В модели по рисунку 4.9 ОЗЗ имитировались в различных точках, на КЛ, отходящих от шин РП (например, в различных точках KL2).

4.3 Исследование погрешностей способа дистанционного определения места замыкания на землю, основанного на измерении параметров аварийного переходного режима

4.3.1 Модель кабельной сети для анализа факторов, влияющих на точность замера расстояния до места ОЗЗ. Учитывая, что в кабельных сетях 6–10 кВ на параметры наблюдаемых электрических величин переходного процесса при ОЗЗ может оказывать влияние множество факторов (п. 4.1.4), оценить их комплексное одновременное влияние на точность ДОМЗЗ аналитическими методами в общем случае невозможно. С учетом этого для решения рассматриваемой задачи использовался метод многофакторного анализа. При проведении многофакторного анализа из-

меняют только рассматриваемый фактор, а влияние остальных факторов либо не учитывается вообще, либо параметры, характеризующие влияние других факторов, изменяются только от эксперимента к эксперименту.

Влияние отдельных факторов проще и удобнее отследить при использовании для проведения многофакторного анализа упрощенной имитационной модели, соответствующей эквивалентированным схемам кабельной сети по рисункам 4.6 и 4.7. Схема модели в системе Matlab, использованная для проведения многофакторного анализа, приведена на рисунке 4.10.

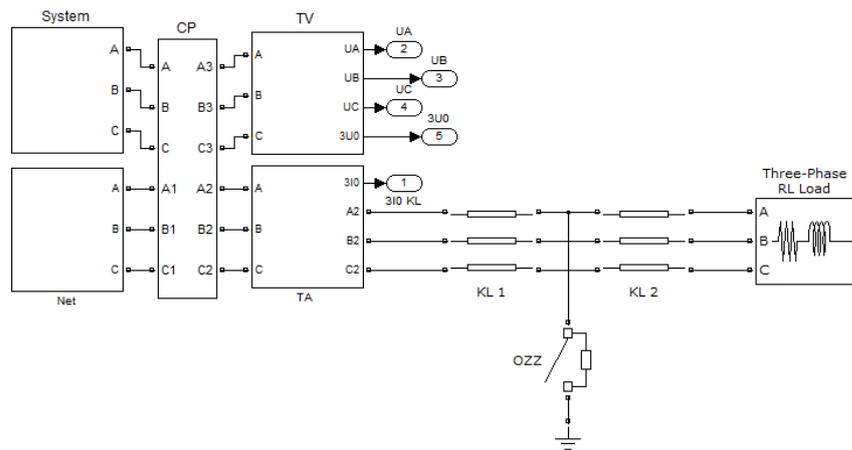


Рисунок 4. 10 – Упрощенная имитационная модель кабельной сети 6 кВ в Matlab для многофакторного анализа факторов, влияющих на точность ДМЗЗ

Модель позволяет учитывать влияние всех факторов, перечисленных в п. 4.1.4. В зависимости от исследуемого фактора первичные преобразователи тока и напряжения (TV и ТА) могут учитываться идеальными моделями или моделями, отражающими их реальные частотные характеристики (глава 3). ФНЧ, ограничивающие рабочий диапазон частот измеряемых электрических величин переходного процесса, учтены в блоках TV и ТА.

Для комплексной оценки одновременного влияния на точность исследуемого способа ДМЗЗ всех рассматриваемых факторов применялась как рассмотренная упрощенная модель кабельной сети, так и полная модель реальной кабельной сети по рисунку 4.8 и 4.9.

4.3.2 Анализ влияния частотной фильтрации входных сигналов. В главе 3 показано, что рабочий диапазон частот устройств ДМЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ должен быть ограничен "сверху" частотой ~ 20 кГц с учетом значительных амплитудных и угловых погрешностей электромагнитных ТНКИ при частотах более 20

кГц (например, рисунки 3.5, 3.6). Для ограничения рабочего диапазона частот во входных цепях напряжения и тока должны предусматриваться ФНЧ с соответствующей частотой среза $f_{cp} \leq 20$ кГц, что может привести к уменьшению крутизны переднего фронта переходного тока и напряжения и обусловить дополнительную погрешность определения расстояния до места повреждения по параметрам электрических величин переходного процесса.

Влияние частотной фильтрации сигналов во входных цепях устройства ДОМЗЗ на основе исследуемого способа на точность замера расстояния до места исследования на модели, имитирующей кабельную сеть, поврежденную КЛ и устройство ДОМЗЗ, подключенное по цепям тока и напряжения с использованием моделей ТНКИ и ТТНП. При проведении вычислительных экспериментов во входных цепях напряжения и тока использовался ФНЧ Баттерворта 2-го порядка с различными значениями частоты среза $f_{cp} = 5 \dots \dots 50$ кГц. Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что неприемлемые погрешности в оценке расстояния до места ОЗЗ возникают при применении ФНЧ $f_{cp} < 10$ кГц и $f_{cp} > 20$ кГц (например, рисунок 4.11).

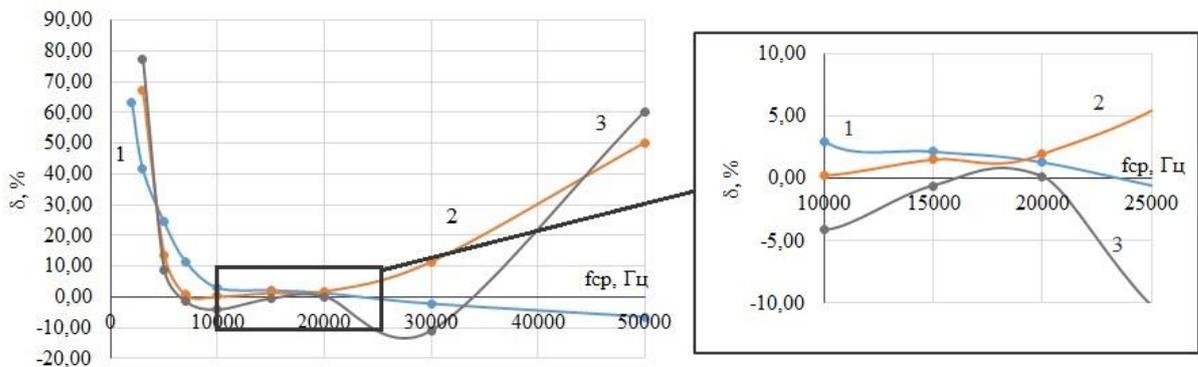


Рисунок 4.11 – Зависимость погрешности определения l_3 от частоты среза ФНЧ

для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А при различных удаленностях ОЗЗ:

1 – $l_3 = 0,25$ км; 2 – $l_3 = 0,5$ км; 3 – $l_3 = 0,75$ км

Наименьшие значения дополнительной погрешности, не превышающие 3–5%, в оценке расстояния l_3 до места повреждения имеют место при применении ФНЧ с частотой среза $f_{cp} \approx 15$ –20 кГц (например, рисунок 4.11). С учетом этого при анализе влияния других факторов в качестве базового принимался режим, при котором во входных цепях тока и напряжения (в блоках TV и TA модели по рисунку 4.10) применялся ФНЧ Баттерворта 2-го порядка с $f_{cp} = 20$ кГц.

4.3.3 Анализ влияния многочастотного характера разрядной составляющей переходного тока. Разрядный ток переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в отличие от зарядного представляет собой многочастотный сигнал, содержащий кроме основной составляющей с частотой f_p , приближенно определяемой из уравнения (2.3), и другие составляющие с частотами, превышающими f_p (например, спектрограммы переходных токов ОЗЗ на рисунке 3.12). Многочастотный характер разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ проявляется прежде всего при небольших удаленностях l_3 места ОЗЗ от шин источника питания, однако в этих случаях использование входных ФНЧ с частотой среза $f_{cp} \approx 20$ кГц, как правило, обеспечивает подавление высокочастотных составляющих разрядного тока и выделение основной составляющей с частотой f_p . С точки зрения влияния на точность замера более опасными являются случаи, когда дополнительные частотные составляющие разрядного тока имеют частоту, достаточно близкую к частоте f_p основной составляющей (например, рисунок 3.12, д). Практически такой эффект наблюдается при относительно больших удаленностях l_3 места ОЗЗ от шин (порядка 0,75–1 км), когда частота основной разрядной составляющей (полезного сигнала) имеет значения порядка 5–7 кГц (таблица 3.1). Наличие в разрядном токе двух или более явно выраженных частотных составляющих может обусловить существенные погрешности в определении как момента t_{0i} перехода через нулевое значение переходного ОЗЗ, так и значения его производной $3di_0(t_{0i})/dt$. Наибольшие погрешности при определении индуктивности до места повреждения $L_3 \equiv l_3$ по выражению (4.1) за счет влияния рассматриваемого фактора имеют место для первого перехода тока $3i_0(t)$ через нулевое значение (начального момента времени $t_{01} = 0$) и могут достигать нескольких десятков процентов. При последующих переходах тока $3i_0(t)$ через нуль погрешность, обусловленная влиянием рассматриваемого фактора, уменьшается за счет более быстрого затухания высокочастотных разрядных составляющих по сравнению с основной составляющей разрядного тока.

Анализ показал, что в указанных случаях для повышения точности определения расстояния l_3 до места повреждения необходимо использовать момент перехода через нулевое значение основной частотной составляющей разрядного тока и соответствующее ей значение производной для данного момента времени. Использование

ФНЧ с частотой среза $f_{cp} = 20$ кГц не всегда обеспечивает подавление указанных дополнительных частотных составляющих и выделение основной составляющей разрядного тока. Как дополнительное средство частотной фильтрации входного сигнала тока, обеспечивающее выделение основной частотной составляющей, а также упрощение расчета производной в момент перехода тока через ноль, более целесообразно использовать аппроксимацию наблюдаемого тока на основе нескольких выборок. Анализ на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ показал, что достаточное повышение точности определения параметров t_{oi} и производной $3di_0(t_{oi})/dt$, как правило, может обеспечить аппроксимация прямой линией, проходящей через ближайшие к моменту перехода наблюдаемого тока через нулевое значение точки, расположенные соответственно выше и ниже оси абсцисс.

Рисунок 4.12 иллюстрирует результаты применение данного метода в целях повышения точности замера расстояния до места повреждения.

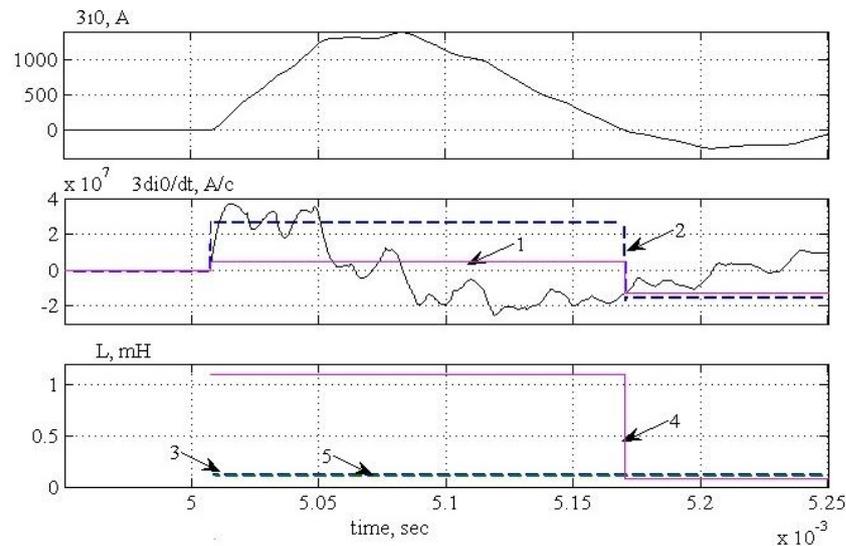


Рисунок 4.12 – Пример вычисления индуктивности (пропорциональной расстоянию l_3) до места ОЗЗ в сети с параметрами $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, $R_n = 0$, $l_3 = 1$ км с применением аппроксимации кривой переходного тока вблизи момента его перехода через ноль:

- 1 – значение производной $3di_0(t_{oi})/dt$, определенное непосредственно по кривой $i_0(t)$;
- 2 – значение производной $3di_0(t_{oi})/dt$, вычисленное по аппроксимированной кривой $i_0(t)$;
- 3 – замер индуктивности $L_3 \equiv l_3$ при использовании значения $3di_0(t_{oi})/dt$ на основе замера 2;
- 4 – замер индуктивности $L_3 \equiv l_3$ при использовании значения $3di_0(t_{oi})/dt$ на основе замера 1;
- 5 – истинное значение индуктивности $L_3 \equiv l_3$ поврежденного участка КЛ

На средней осциллограмме рисунка 4.12 прямая 1 – значение производной $3di_0(t_{01})/dt$ в момент 1-го перехода тока $3i_0(t)$ через нуль, найденное непосредственно по осциллограмме, прямая 2 – значение производной в момент перехода тока нулевой последовательности, вычисленное по аппроксимированной кривой тока. На нижней осциллограмме прямая 3 – значение индуктивности $L_3 \equiv l_3$ при вычислении значения производной по прямой 2, 4 – значение индуктивности, при вычислении значения производной по прямой 1, 5 – истинное значение индуктивности L_3 до места ОЗЗ.

Расчеты на имитационной модели показали, что применение для вычисления производной переходного тока аппроксимации кривой $3i_0(t)$ позволяет уменьшить погрешности расчета индуктивности $L_3 \equiv l_3$ по выражению (4.1) до 3-5% (например, рисунок 4.12), однако приводит к усложнению базового алгоритма.

4.3.4 Анализ влияния удаленности l_3 до места повреждения. Оценка влияния удаленности точки ОЗЗ на точность способа ДОМЗЗ при $l_3 = 0.05 \dots 3$ км для кабельной сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А и поврежденной КЛ, выполненной кабелем с алюминиевыми жилами сечением 240 мм^2 . На рисунке 4.13 показана зависимость погрешности расчета расстояния до места повреждения по (4.3) от удаленности l_3 места пробоя изоляции от шин источника питания. Точками обозначены замеры на модели, пунктирной кривой – аппроксимация кривой замеров полиномом 2 порядка.

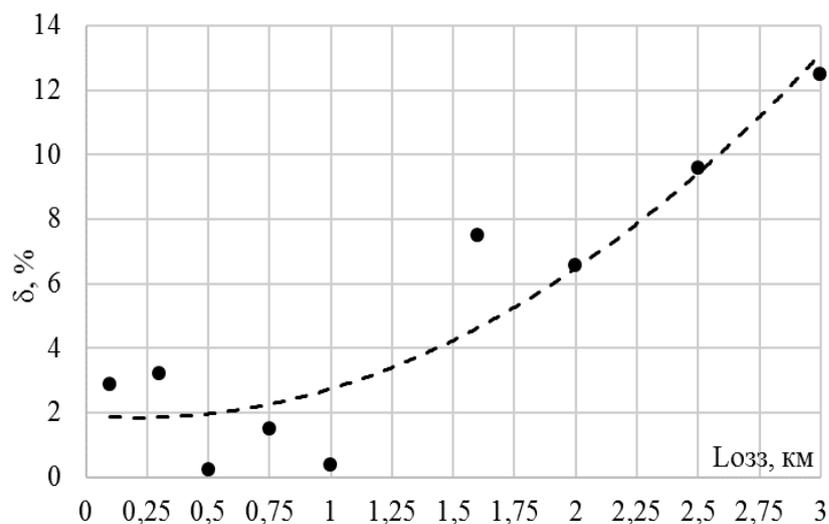


Рисунок 4.13 – Зависимость погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, поврежденный кабель ААБ-6-3х240

Анализ результатов вычислительных экспериментов на имитационной модели показал, что рассматриваемый способ ДОМЗЗ обеспечивает малые погрешности (не более 3–5 %) при удаленностях $l_3 \leq 1$ км. При больших удаленностях погрешность быстро увеличивается, достигая при $l_3 = 3$ км 20 %. Практически общая длина магистральных КЛ в кабельных сетях 6–10 кВ может достигать значений до 7 и более километров (таблица 1.2). При таких длинах КЛ погрешность расчета l_3 по (4.3) будет достигать нескольких десятков процентов.

Основной причиной таких больших погрешностей в оценке расстояния l_3 до места повреждения являются особенности распределения емкостных токов в поврежденной линии при ОЗЗ и измерения их кабельными ТТНП (рисунок 4.14).

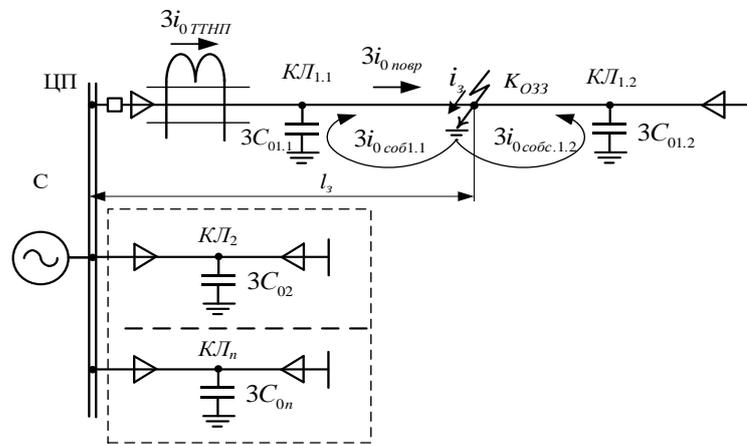


Рисунок 4.14 – Распределение и измерение кабельным ТТНП емкостных токов ОЗЗ

Из рис. 4.14 можно видеть, что ТТНП, установленный в начале КЛ₁, измеряет только часть тока ОЗЗ, протекающего через поврежденный участок линии. Собственный емкостный ток $3i_{0\text{собс.1.1}}$, протекая через поврежденную часть линии и создавая дополнительное падение напряжения на ней, ТТНП не измеряется. Потому наблюдаемое значение тока $3i_{0\text{ТТНП}}$ всегда будет меньше тока $3i_{0\text{КЛ1.1}}$ в поврежденной части линии, что приводит к занижению оценки значения производной $3di_0(t_{01})/dt$ в моменты перехода тока $3i_0(t)$ через нулевое значение и увеличению расчетного значения замера l_3 по (4.3). Так как $3i_{0\text{собс.1.1}}$ будет тем больше, чем больше l_3 , то и погрешность, обусловленная влиянием данного фактора, будет увеличиваться с возрастанием l_3 . Отметим также, что приведенная на рис. 4.13 зависимость $\delta = f(l_3)$ характеризует величину погрешности определения расстояния до места ОЗЗ по (4.3) только для конкретных расчетных условий,

определяемых суммарным емкостным током сети $I_{c\Sigma}$ и параметрами поврежденной КЛ. При изменении $I_{c\Sigma}$ и параметров КЛ, т.е. величины собственного емкостного тока погрешность δ будет также изменяться.

Исключить влияние рассматриваемого фактора можно только корректировкой рассчитанного по (4.3) значения $l_{з,расч}$ с учетом влияния $3i_{0\text{собс.1.1}}$. Приблизительно это можно сделать на основе следующих соотношений.

Из рисунка 4.14 получим:

$$3i_{0\text{повр}} \approx 3i_{0\text{ТТНП}} + 3i_{0\text{собс.1.1}} \approx 3i_{0\text{ТТНП}} + (3i_{0\text{собс.1.1}} + 3i_{0\text{собс.1.2}}) \frac{l_{з,расч}}{l_{КЛ1}}, \quad (4.4)$$

где $l_{з,расч}$ – значение расстояния до места повреждения, рассчитанное по (4.1); $l_{КЛ1}$ – общая длина поврежденной линии КЛ1.

Принимая, что формы переходных токов $3i_{0\text{ТТНП}}$ и $3i_{0\text{собс.1.1}}$ одинаковы, а распределение переходного тока ОЗЗ по неповрежденным линиям в первом приближении определяется их емкостями фаз на землю (т.е. их собственными емкостными токами, можно получить следующее приближенное соотношение между наблюдаемым переходным током $3i_{0\text{ТТНП}}$ и переходным током $3i_{0\text{повр}}$, протекающим на участке поврежденной линии до места ОЗЗ:

$$\begin{aligned} \frac{3i_{0\text{повр}}}{3i_{0\text{ТТНП}}} &= \frac{3i_{0\text{ТТНП}} + 3i_{0\text{собс.1.1}}}{3i_{0\text{ТТНП}}} \approx \frac{I_{c\Sigma} - I_{c\text{собс.1.2}}}{I_{c\Sigma} - (I_{c\text{собс.1.1}} + I_{c\text{собс.1.2}})} = \\ &= \frac{1 - I_{c\text{собс.1.2}^*}}{1 - (I_{c\text{собс.1.1}^*} + I_{c\text{собс.1.2}^*})} = \frac{1 - I_{c\text{собс}^*} \left(1 - \frac{l_{з,расч}}{l_l}\right)}{1 - I_{c\text{собс}^*}}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $I_{c\text{собс}^*} = I_{c\text{собс}}/I_{c\Sigma}$ – относительное значение собственного емкостного тока поврежденной КЛ; $l_{з,расч}$ – расчетное значение расстояния до места повреждения, определенное из (4.3) по наблюдаемому значению тока $3i_{0\text{ТТНП}}$; l_l – длина поврежденной КЛ.

Так как при близких формах токов $3i_{0\text{ТТНП}}$ и $3i_{0\text{собс.1.1}}$ различие между наблюдаемым током $3i_{0\text{ТТНП}}$ и действительным током $3i_{0\text{повр}}$, протекающим в поврежденной части линии, обуславливает только погрешность в оценке производной $3di_0(t_{0i})/dt$ в моменты перехода тока $3i_0(t)$ через нулевое значение, то погрешность расчета l_3 по (4.3) приближенно можно определить из выражений

$$l_3 \approx l_{3,расч} \frac{1 - I_{с\ собс*}}{1 - I_{с\ собс*} \left(1 - \frac{l_{3,расч}}{l_l}\right)} = l_{3,расч} (1 - \delta_{Ic}), \quad (4.6)$$

где δ_{Ic} - погрешность определения l_3 по (4.3), обусловленная влиянием собственного емкостного тока поврежденной КЛ

$$\delta_{Ic} = \frac{l_{3,расч} - l_3}{l_3} \approx \frac{I_{с\ собс*} \frac{l_{3,расч}}{l_l}}{1 - I_{с\ собс*}}, \quad (4.7)$$

При $l_{3,расч} = 0$ $\delta_{Ic} = 0$, при $l_{3,расч} = l_l$ $\delta_{Ic} = 1/(1 - I_{с\ собс*})$.

На рисунке 4.15 приведена структурная схема алгоритма ДОМЗЗ, обеспечивающего коррекцию расчетного значения $l_{3,расч}$ рассмотренным выше способом.

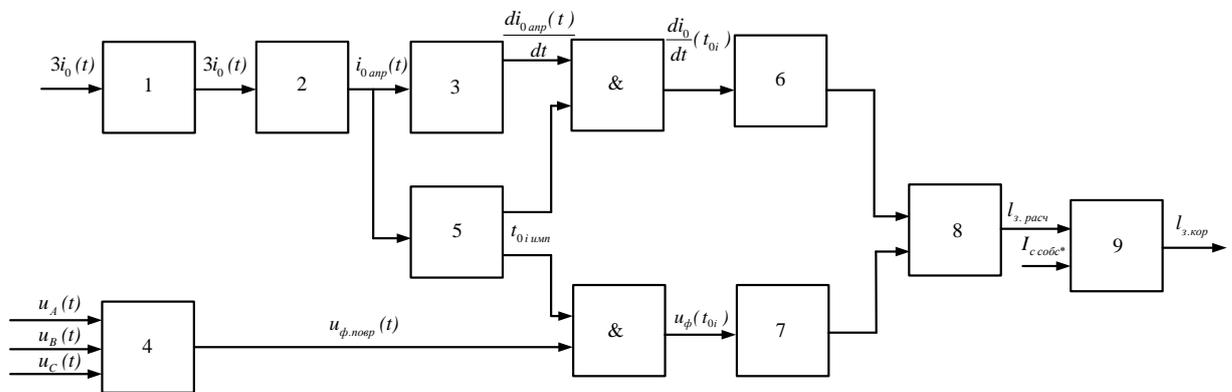


Рисунок 4.15 – Структурная схема алгоритма ДОМЗЗ с компенсацией влияния на замер собственного емкостного тока поврежденной КЛ:

- 1 – пороговый элемент; 2 – блок аппроксимации; 3 – дифференциатор;
 4 – избиратель напряжения поврежденной фазы; 5 – блок фиксации момента перехода сигнала через нуль; & – элементы логического умножения; 6, 7 – элементы памяти;
 8 – вычислитель $l_{3,расч}$ по (4.3); 9 – вычислитель $l_{3,кор}$ по (4.6) и (4.7)

Компенсация влияния на замер собственного емкостного тока поврежденной КЛ приводит к усложнению базового алгоритма (рисунок 4.1), но дает заметное повышение точности ДОМЗЗ при больших удаленностях места повреждения от шин (например, рисунок 4.16).

В дальнейшем при анализе других влияющих факторов принимается, что рассматриваемый способ реализован по схеме рисунка 4.15, т.е с учетом коррекции замера по величине собственного емкостного тока поврежденной КЛ.

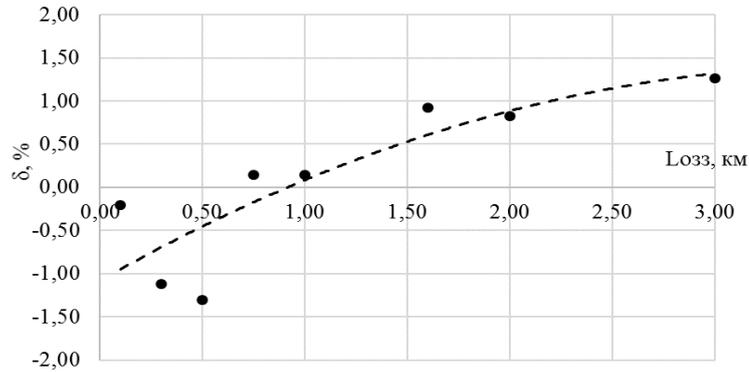


Рисунок 4.16 – Зависимость погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ для сети $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А при компенсации влияния собственного тока поврежденной КЛ

4.3.5 Анализ влияния величины суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$. Влияние $I_{c\Sigma}$, обусловленное прежде всего рассмотренными выше особенностями изменения токов нулевой последовательности ТТНП, будет проявляться при отсутствии коррекции результатов измерения $l_{3,\text{расч}}$ с учетом величины собственного емкостного тока поврежденной КЛ (рисунок 4.17).

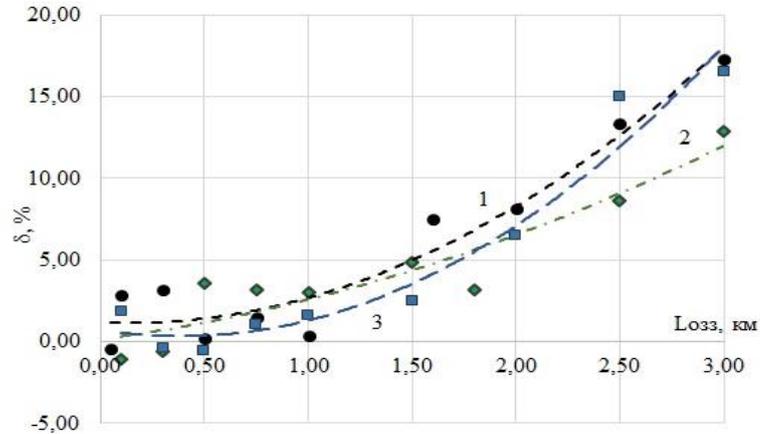


Рисунок 4.17 – Зависимости погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ для сети с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ при различных значениях $I_{c\Sigma}$ при отсутствии коррекции $l_{3,\text{расч}}$ по (4.6) и (4.7): 1 – $I_{c\Sigma} = 50$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 20$ А

Корректировка расчетного значения $l_{3,\text{расч}}$ с учетом величины $I_{c,\text{собс}}$ * поврежденной КЛ в значительной степени уменьшает влияние изменений $I_{c\Sigma}$, возможных в реальных условиях эксплуатации кабельных сетей 6–10 кВ (рисунок 4.18).

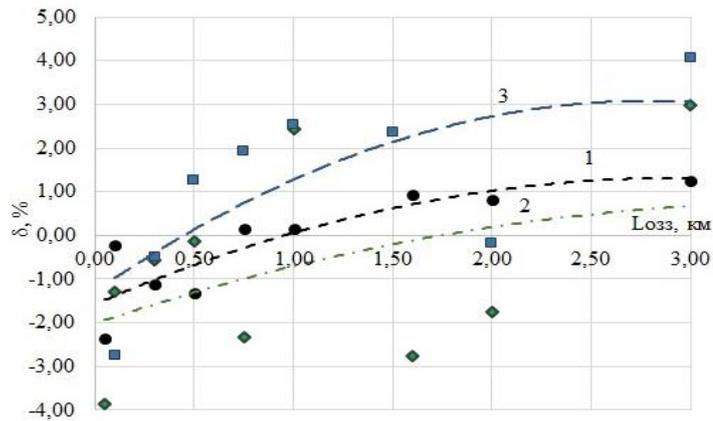


Рисунок 4.18 – Зависимости погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ при различных значениях $I_{с\Sigma}$ при корректировке расчетного значения $l_{3,расч}$ с учетом собственного емкостного тока поврежденной КЛ:

$$1 - I_{с\Sigma} = 50 \text{ А}; 2 - I_{с\Sigma} = 30 \text{ А}; 3 - I_{с\Sigma} = 20 \text{ А}$$

Из зависимостей рисунка 4.18 можно видеть, что компенсация влияния собственного емкостного тока уменьшает погрешности, обусловленные изменениям суммарного емкостного тока сети $I_{с\Sigma}$ до 3–4 %.

4.3.6 Анализ влияния переходного сопротивления в месте ОЗЗ. Активные потери в контуре тока ОЗЗ и, в частности, переходное сопротивление в месте повреждения, существенно влияют прежде всего на форму и параметры переходного тока за счет более быстрого затухания высокочастотных составляющих разрядного тока. Искажение формы разрядного тока, как было показано выше, может обусловить дополнительные погрешности замера расстояния l_3 до места повреждения.

В момент пробоя изоляции КЛ переходное сопротивление в месте повреждения определяется сопротивлением электрической дуги. По данным [19, 238, 239] падение напряжения на электрической u_d дуге в момент пробоя изоляции в кабельных сетях 6–10 кВ обычно не превышает значений 50–100 В, а динамическое сопротивление дуги имеет значения порядка сотых и даже тысячных доле Ом [239]. С учетом этого электрическую дугу в месте повреждения приближенно можно моделировать в виде постоянной противо-ЭДС $E_d = u_d$ и последовательно включенного активно сопротивления r_d (рисунок 4.19).

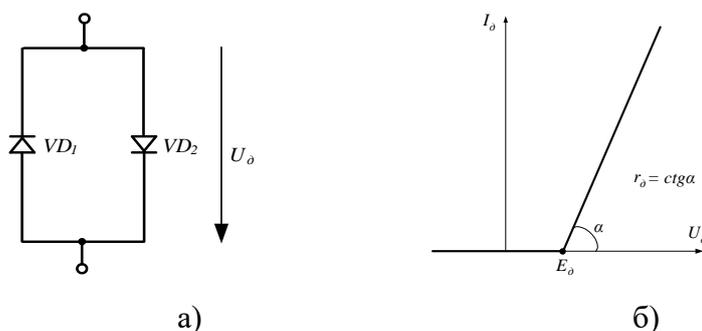


Рисунок 4.19 - Моделирование электрической дуги в Matlab:

а – схема замещения с использованием диодов; в - вольтамперная характеристика диода

В модели дуги величина E_0 при исследованиях принималась равной 50 ... 100 В, $r_0 = 0,01$ Ом. Результаты исследования на имитационной модели показали, что погрешности замера l_3 , обусловленные влиянием переходного сопротивления дуги, увеличиваются (рисунок 4.20).

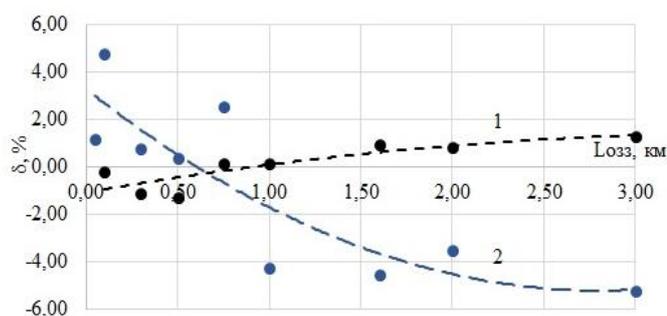


Рисунок 4.20 – Зависимость погрешности определения l_3 по (4.3) от удаленности ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 30$ А при $u_{пр} = U_{ф м}$: 1 – без переходного сопротивления; 2 – с переходным сопротивлением ($u_0 = 100$ В, $r_0 = 0,01$ Ом)

Из рисунка 4.20 можно видеть, что погрешности, обусловленные влиянием переходного сопротивления электрической дуги в месте повреждения, могут достигать значений до $\sim 5\%$. Так как параметры переходного сопротивления дуги в месте пробоя изоляции неизвестны, скомпенсировать влияние данного фактора на точность замера расстояния l_3 до места повреждения в общем случае нельзя.

4.3.7 Анализ влияния тока нагрузки поврежденной КЛ. Ток нагрузки обуславливает дополнительное падение напряжения на поврежденной линии, искажающее замер $u_{\phi}(t_{0i})$ с использованием уравнений (4.1) и (4.3). При анализе влияния данного фактора на точность определения l_3 максимальная величина нагрузки КЛ $S_{нагр}$ (при $\cos\varphi_{нагр} = 0,8$) принималась такой, чтобы обеспечивались условия термиче-

ской стойкости кабеля при заданном сечении, а минимальное напряжение на шинах приемных ТП было не меньше допустимого по требованиям [217] к качеству электрической энергии значения $0,95U_{ном}$.

Анализ результатов показал, что при малых удаленностях до места повреждения $l_3 \leq 0,5-0,75$ км нагрузка не оказывает существенного влияния на точность ДОМЗЗ по исследуемому способу (например, рисунок 4.21).

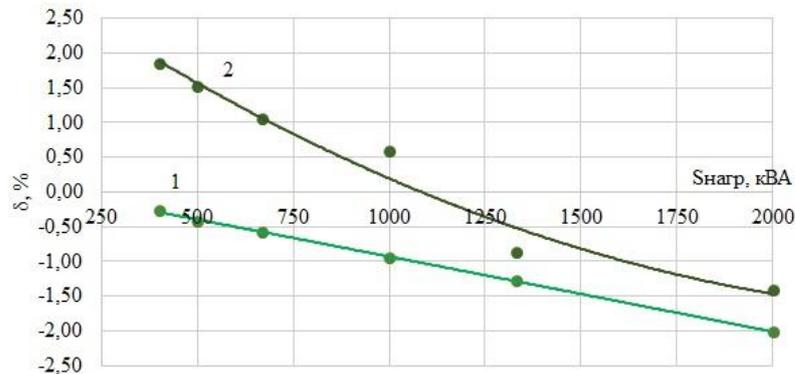


Рисунок 4.21 – Зависимость погрешности замера l_3 от величины нагрузки поврежденной КЛ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 30$ А при малых удаленностях ОЗЗ: 1 – $l_3 = 0,25$ км; 2 – $l_3 = 0,5$ км

При больших удаленностях места ОЗЗ ($l_3 > 1$ км) влияние нагрузки может приводить погрешностям замера расстояния до места повреждения до 10–15% (рисунок 4.22).

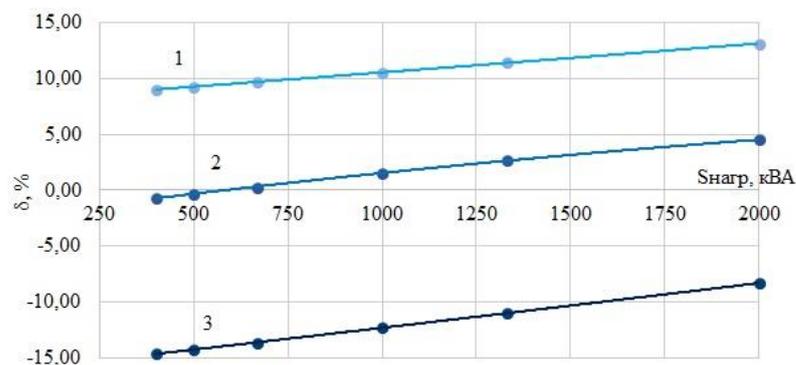


Рисунок 4.22 – Зависимости погрешности замера l_3 от величины нагрузки поврежденной ЛЭП для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 30$ А при больших удаленностях ОЗЗ:

$$1 - l_3 = 1 \text{ км}; 2 - l_3 = 1,5 \text{ км}; 3 - l_3 = 2 \text{ км}$$

Из анализа зависимостей рисунка 4.22 можно сделать вывод, что ток нагрузки поврежденной КЛ является наиболее существенным фактором, влияющим на точность ДОМЗЗ на основе исследуемого способа. Потому обеспечить приемлемую

точность определения l_3 на основе рассматриваемого способа ПАР можно только при условии компенсации дополнительной погрешности, обусловленной влиянием нагрузки, при $l_{3,расч} > 1$ км. Методика такой компенсации с использованием измерений текущих значений тока нагрузки контролируемой КЛ рассматривается ниже.

4.3.8 Анализ влияния величины напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя. В [10, 127, 239] показано, что в подавляющем большинстве случаев пробой изоляции фазы сети на землю в кабельных сетях 6–10 кВ (независимо от режима заземления нейтрали) происходит при напряжении, близком к максимуму напряжения на поврежденной фазе. Плотность распределения угла первого пробоя имеет два ярко выраженных пика, соответствующих $\pm U_{фm}$ [127]. В целом практически все первоначальные пробои изоляции КЛ возникают при напряжении на поврежденной фазе $u_{пр} = u_{ф}(t_{пр}) = (0,5–1)U_{фm}$.

На рисунке 4.23 показано влияние напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции $u_{пр}$ на точность замера расстояния до места повреждения с использованием рассматриваемого способа ДОМЗЗ.

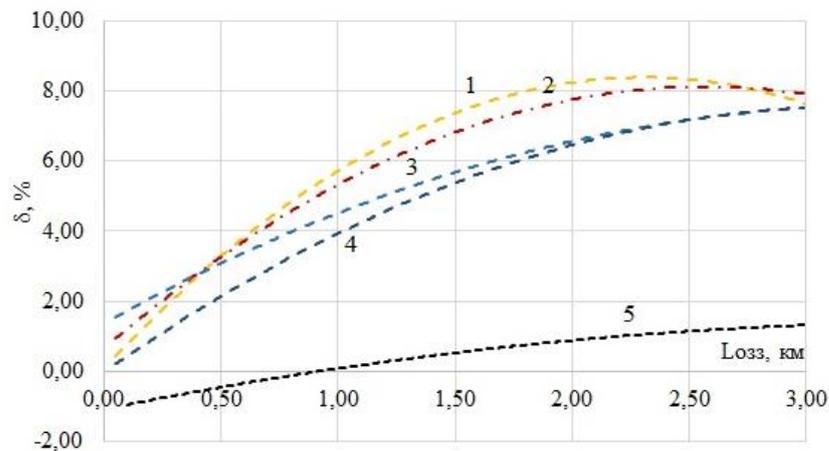


Рисунок 4.23 – Зависимости погрешностей расчета l_3 по (4.3) от удаленности ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{сз} = 30$ А при различных значениях напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции: 1 – $u_{пр} = 0,5U_{фm}$; 2 – $u_{пр} = 0,7U_{фm}$;
3 – $u_{пр} = 0,8U_{фm}$; 4 – $u_{пр} = 0,9U_{фm}$; 5 – $u_{пр} = U_{фm}$

Из анализа зависимостей рисунка 4.23 можно сделать вывод, что величина напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции так же, как и ток нагрузки КЛ, является фактором, оказывающим существенное влияние на точность

замера l_3 с использованием рассматриваемого способа ДОМЗЗ. Потому обеспечить приемлемую точность определения l_3 можно только при условии компенсации дополнительной погрешности, обусловленной величины напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции $u_{\phi}(t_{np}) = u_{np}$. Возможность использования такой компенсации обусловлена тем, что значение $u_{np.} = u_{\phi}(t_{01})$ в соответствии с алгоритмом способа ДОМЗЗ фиксируется (см. п. 4.1.2). Методика компенсации с использованием зафиксированных значений измерений u_{np} рассматривается ниже.

4.3.9 Анализ влияния зависимости продольных параметров КЛ от частоты тока переходного процесса. Изменение продольных параметров, прежде всего, собственных индуктивностей жилы и оболочки трехфазного кабеля, а также взаимных индуктивностей между жилами и между жилой и оболочкой в зависимости от частоты в принципе может влияние на значения контролируемых параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ. В [20, 144] при расчетах переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ индуктивности прямой L_1 и нулевой L_0 последовательностей КЛ, используемые при параметрировании блока Distributed Parameters Line системы моделирования Matlab, рекомендуется определять по скорости распространения электромагнитных волн в каналах "фаза-фаза" и "фаза-земля":

$$L_1^{(1 \text{ км})} \approx \frac{1}{V_1^2 C_1^{(1 \text{ км})}}; \quad (4.8)$$

$$L_0^{(1 \text{ км})} \approx \frac{1}{V_0^2 C_0^{(1 \text{ км})}}, \quad (4.9)$$

где $L_1^{(1 \text{ км})}$, $L_0^{(1 \text{ км})}$, $C_1^{(1 \text{ км})}$, $C_0^{(1 \text{ км})}$ – погонные параметры КЛ прямой и нулевой последовательности.

Скорости распространения электромагнитных волн в каналах "фаза – фаза" и "фаза – земля" для кабельных линий 6 – 10 кВ примерно одинаковы и равны $V_1 \approx V_0 = 150 – 160$ м/мкс [58]. Полученные по выражениям (4.8) и (4.9) значения индуктивностей соответствуют области высоких частот, измеряемых десятками и сотнями килогерц. Такой подход к определению параметров схемы замещения КЛ обеспечивает повышение точности расчета разрядных составляющих переходного

тока ОЗЗ и практически не влияет на точность расчета зарядной составляющей, частота и амплитуда которой в кабельных сетях 6–10 кВ в основном определяется индуктивностью источника питания [16, 26, 214, 215].

В рассматриваемых способах ДОМЗЗ с учетом частотных характеристики ТННП напряжением 6–10 кВ рабочий диапазон ограничен верхней частотой $f_g \approx 20$ кГц. Минимальные значения частоты основной разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, как правило, выше 3–5 кГц. В указанном диапазоне частот действительные значения погонных индуктивностей прямой $L_1^{(1\text{ км})}$ и нулевой $L_0^{(1\text{ км})}$ последовательностей КЛ 6–10 кВ могут отличаться от значений, определенных по (4.8) и (4.9).

Для оценки влияния данного фактора в работе использованы результаты исследований, выполненных в ЮРГПУ (НПИ) [113, 114]. В [113, 114] приведены расчетные зависимости удельных параметров кабеля (индуктивностей жил, оболочек, взаимных индуктивностей и др.) от частоты, в диапазоне частот от 0 до 500 кГц. С использованием указанных данных определена зависимость погонной индуктивности $L^{(1\text{ км})} = (2L_1^{(1\text{ км})} + L_0^{(1\text{ км})})/3$ в (4.2) от частоты (рисунок 4.24). Для удобства оценки влияния зависимости индуктивностей КЛ от частоты тока переходного процесса на точность замера l_3 по (4.3) на рисунке 4.24 действительные значения $L^{(1\text{ км})}$, определенные по данным [13, 114], отнесены к значениям $L^{(1\text{ км})}$, определенными по скорости распространения электромагнитных волн в кабелях 6–10 кВ с использованием выражений (4.8) и (4.9).

Из рисунка 4.24 можно видеть, что в диапазоне частот 5–20 кГц отклонения действительных значений $L^{(1\text{ км})}$ от рассчитанных с использованием выражений (4.8) и (4.9) не превышают ~10 %, что может обусловить погрешности в оценке частоты и амплитуды основной разрядной составляющей порядка 3%.

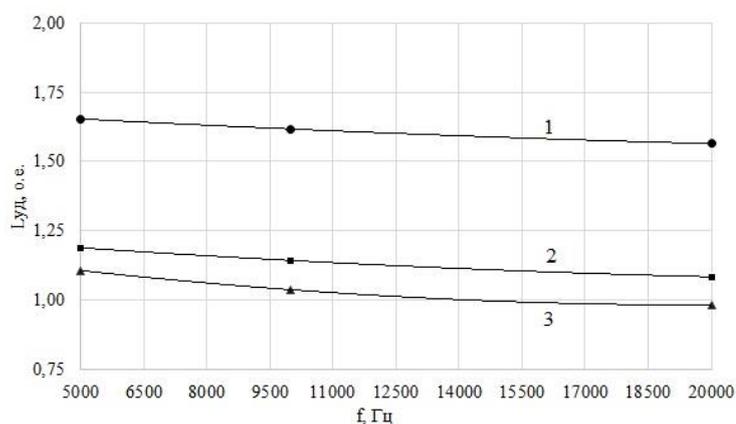


Рисунок 4.24 – Зависимость погонной индуктивности Кл 6 кВ в о.е. от частоты при различных сечениях: 1 – 10 мм²; 2 – 25 мм²; 3 – 240 мм²;

Учитывая это, погонные индуктивности Кл 6–10 кВ для решения задачи ДОМЗЗ допустимо определять по скорости распространения электромагнитных волн.

4.10 Комплексное влияние различных факторов на точность замера расстояния до места повреждения. Комплексное влияние всех рассмотренных выше факторов, а также погрешностей, вносимых первичными преобразователями тока и напряжения нулевой последовательности, исследовалось на имитационной модели реальной кабельной сети (рисунки 4.8, 4.9). В комплексной модели для формирования входных сигналов алгоритма ДОМЗЗ использовались модели кабельного ТННП и ТННП, разработанные в главе 3, а также ФНЧ, ограничивающие "верхнюю" частоту рабочего диапазона частот значением 20 кГц. При исследованиях принималось, что погрешность замера l_3 по (4.3), обусловленная влиянием собственного емкостного тока поврежденной Кл, компенсируется по схеме рисунка 4.15.

Исследования проводились для Кл (KL2), отходящих от шин секции 2 РП-13 (рисунок 4.8) при различных сочетаниях влияющих факторов. Присоединение KL2, питаемое от шин РП-13, содержит 5 участков Кл различных сечений (95, 120 и 150 мм²), длин (от 50 м до 395 м) и типов. Суммарная длина шлейфа Кл составила 875 м. Погрешность способа определялась для точек ОЗЗ, соответствующих середине и концу каждого участка Кл. Анализ результатов вычислительных экспериментов, проведенных на имитационной модели кабельной сети, показал, что погрешности замера l_3 , обусловленные комплексным влиянием некомпенсируемых факторов, та-

ких, как ток (мощность) нагрузки в момент возникновения ОЗЗ, напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции u_{np} (фаза пробоя φ_{np}), переходное сопротивление электрической дуги в месте повреждения при различных удаленностях места повреждения от шин может обуславливать погрешности до $\pm 15\text{--}20\%$. На рисунке 4.25 в качестве примера приведены результаты оценки суммарной погрешности замера при ОЗЗ на линии КЛ2 для модели реальной сети по рисунку 4.9.

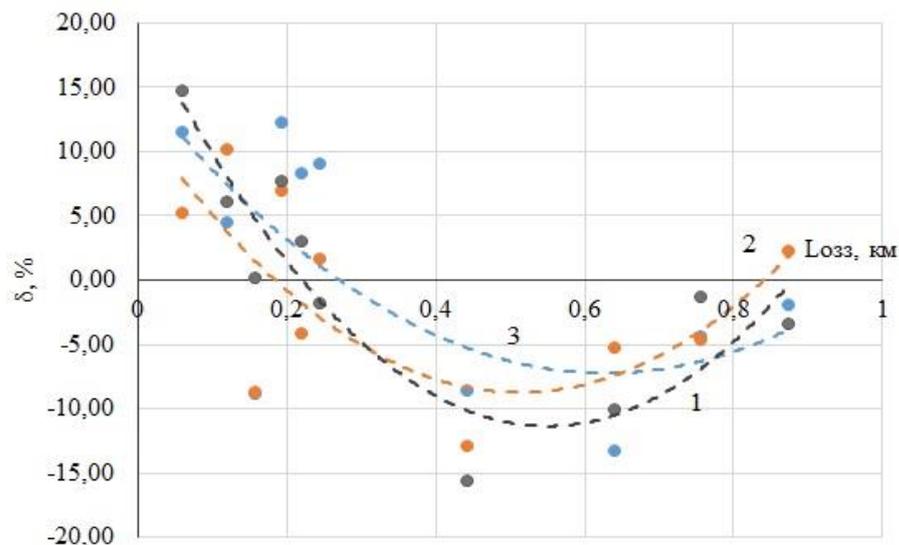


Рисунок 4.25 – Погрешности определения l_3 от удаленности от шин ОЗЗ на линии КЛ2 при $S_{нагр} = 1,6$ МВА, $u_{np} = 0,7 U_{фm}$ при различных параметрах дуги в месте повреждения:
1 – $u_d = 0$; 2 – $u_d = 50$ В; 3 – $u_d = 100$ В (во всех экспериментах $r_d = 0,01$ Ом)

Уменьшение суммарной погрешности замера l_3 возможно при применении компенсации ее составляющих, обусловленных влиянием факторов, значения которых можно измерить (контролировать). К таким факторам относятся, кроме собственно емкостного тока поврежденной линии, ток нагрузки в момент возникновения ОЗЗ и напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции u_{np} (фаза пробоя φ_{np}).

4.11 Методика компенсации погрешностей замера l_3 , обусловленных влиянием контролируемых факторов. Каждый из упомянутых выше контролируемых факторов оказывает определенное влияние на параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, и поэтому погрешности замера l_3 , обусловленные ими, в общем случае нельзя рассматривать как независимые друг от друга. Потому в общем случае величина суммарной погрешности, обусловленной комплексным влия-

нием нескольких факторов, будет являться сложной функцией параметров каждого из факторов

$$\delta_{\Sigma} = f(S_{нагр}, u_{нр}, I_{с\ собс}, \dots), \quad (4.10)$$

определение которой на основе результатов многочисленных вычислительных экспериментов на имитационной модели представляет сложную и громоздкую задачу. Решение задачи компенсации суммарной погрешности замера, обусловленной влиянием нескольких факторов, можно существенно упростить, если принять, что погрешность, обусловленная влиянием каждого отдельного фактора, в первом приближении не зависит от каждого другого влияющего фактора. Тогда суммарную погрешность замера при заданном значении $l_3 = l_{3,расч}$ приближенно можно представить как сумму погрешностей, обусловленных влиянием отдельных факторов

$$\delta_{\Sigma}(l_3) \approx \delta_{Ic}(l_3) + \delta_{нагр}(l_3) + \delta_{Uнр}(l_3), \quad (4.11)$$

где $\delta_{Ic}(l_3)$ – погрешность замера, обусловленная влиянием собственного емкостного тока поврежденной КЛ; $\delta_{нагр}(l_3)$ – погрешность, обусловленная влиянием тока (мощности) нагрузки КЛ в момент возникновения ОЗЗ; $\delta_{Uнр}(l_3)$ – погрешность, обусловленная влиянием величины напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции.

В сумму (4.11) каждая из погрешностей входит с учетом ее знака. В качестве аргумента l_3 в функции по (4.11) используется приближенное значение $l_{3,расч}$, определенное по 4.11. С учетом полученного по (4.11) значения суммарной погрешности производится корректировка $l_{3,расч}$ по выражению

$$l_{3,кор} = l_{3,расч} [1 - \delta_{\Sigma}(l_{3,расч})]. \quad (4.12)$$

Для применения данного подхода к компенсации суммарной погрешности замера l_3 для каждой КЛ контролируемой сети должны быть рассчитана зависимость $\delta_{Ic}(l_3)$ при заданном значении собственного емкостного тока контролируемого присоединения $I_{с.собс}^*$ и зависимости $\delta_{нагр}(I_{нагр})$ и $\delta_{Uнр}(u_{нр})$ при различных значениях l_3 . Расчеты зависимостей $\delta_{нагр}(I_{нагр})$ и $\delta_{Uнр}(u_{нр})$ могут быть выполнены с использованием имитационной модели контролируемой сети.

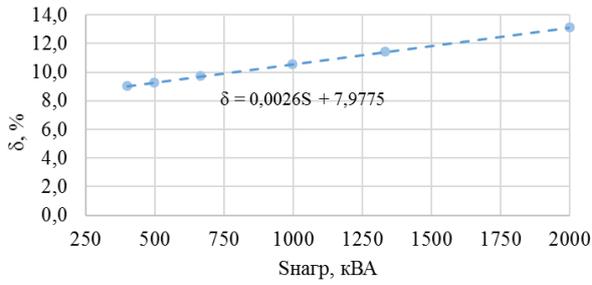
Таким образом, предлагаемая методика определения суммарной погрешности $\delta_{\Sigma}(l_3)$ включает следующие операции:

- 1) разработка имитационной модели контролируемой сети;
- 2) определение собственных емкостных токов КЛ сети $I_{c.собс*i}$;
- 3) расчет зависимостей $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, l_{zi})$ и $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, l_{zi})$ для дискретных значений $l_{zi} = \text{const}$ с шагом по l_3 , позволяющим с использованием простых методов аппроксимации полученных зависимостей получить значения $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, l_{zi})$ и $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, l_{zi})$ для значения $l_3 = l_{3,расч}$;
- 4) для вычисленного по (4.3) значения $l_3 = l_{3,расч}$ и известному для данного присоединения значению $I_{c.собс*i}$ по выражению (4.7) определяется величина погрешности $\delta_{I_c}(l_3)$;
- 5) для вычисленного по (4.3) значения $l_3 = l_{3,расч}$ и замеренного в момент ОЗЗ значения тока нагрузки $I_{нагр}$ с использованием полученного по пп. 3 семейства характеристик $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, l_{zi})$ вычисляется значение погрешности $\delta_{I_{нагр}} = \delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, l_{3,расч})$;
- 6) для вычисленного по (4.3) значения $l_3 = l_{3,расч}$ и замеренного в момент возникновения ОЗЗ напряжения на поврежденной фазе $u_{нр} = u_{ф}(t_{01})$ с использованием полученного по пп. 3 семейства характеристик $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, l_{zi})$ вычисляется значение погрешности $\delta_{U_{нр}} = \delta_{U_{нр}}(u_{нр}, l_{3,расч})$;
- 7) по выражению (4.11) вычисляется суммарная погрешность замера $\delta_{\Sigma}(l_3)$ при расчетном значении $l_3 = l_{3,расч}$, полученном по (4.3);
- 8) по выражению (4.12) производится корректировка полученного по (4.3) расчетного значения $l_{3,расч}$.

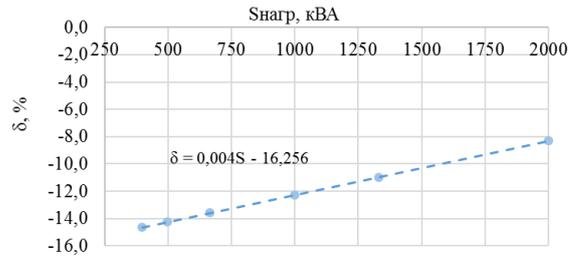
Для выполнения операций по пп. 4, 5 и 6 в алгоритме ДОМЗЗ (например, рис. 4.15) должен быть предусмотрен специальный вычислительный блок.

Рисунки 4.26 и 4.27 иллюстрируют принципы получения уравнений, аппроксимирующих зависимости $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, l_{zi})$ и $\delta_{U_{нр}}(u_{нр}, l_{zi})$, полученные на упрощенной имитационной модели сети для разных значений удаленности l_3 до места ОЗЗ на КЛ.

На рисунке 4.28 приведена структурная схема алгоритма ДОМЗЗ с компенсацией погрешности $\delta_{\Sigma}(l_{3,расч})$ с использованием рассмотренной выше методики.



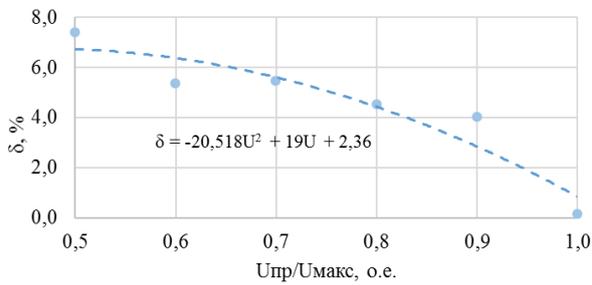
а)



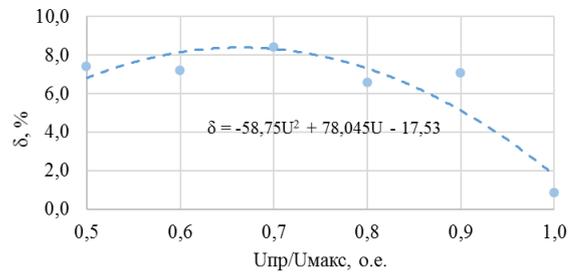
б)

Рисунок 4.26 – Пример аппроксимации зависимостей $\delta_{I_{нагр}}(I_{нагр}, l_3)$, полученных на имитационной модели кабельной сети по рис. 4.10 с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{с\Sigma} = 30$ А:

а – $l_3 = 1$ км; б – $l_3 = 2$ км



а)



б)

Рисунок 4.27 – Пример аппроксимации зависимостей $\delta_{U_{пр}}(u_{пр}, l_3)$, полученных на имитационной модели кабельной сети по рис. 4.10 с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{с\Sigma} = 30$ А:

а – $l_3 = 1$ км; б – $l_3 = 2$ км

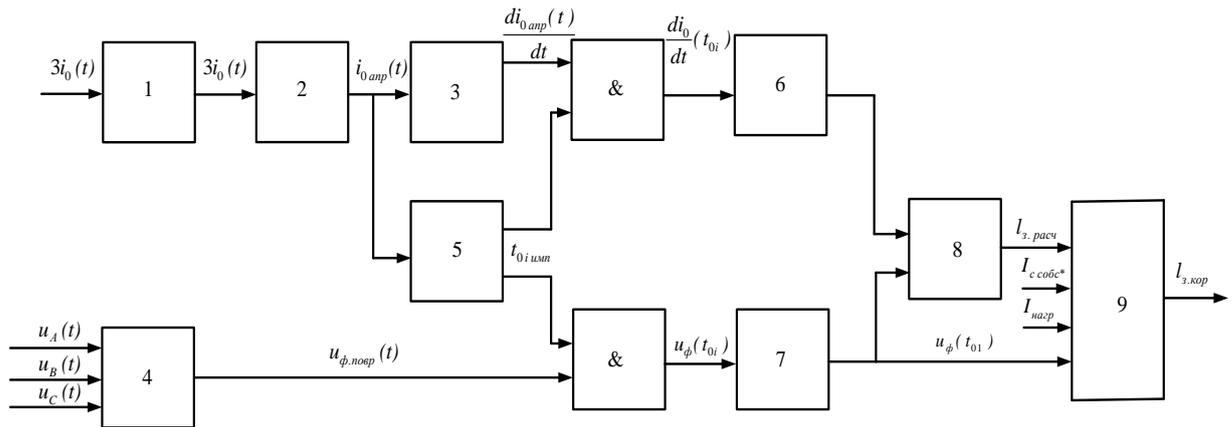


Рисунок 4.28 – Структурная схема алгоритма ДОМЗЗ с компенсацией влияния на замер l_3 суммарной погрешности, обусловленной влиянием собственного емкостного тока, тока нагрузки и начальной фазы пробоя изоляции: блоки 1–8 – то же, что и на рис. 4.15;

9 – блок вычисления суммарной погрешности $\delta_{\Sigma}(l_3)$

4.3.12 Комплексное влияние различных факторов на точность замера l_3 при использовании компенсации по суммарной погрешности. Как и в исследованиях по п. 4.3.10, комплексное влияние всех рассмотренных выше факторов с учетом компенсации суммарной погрешности по методике, рассмотренной в п. 4.3.11, проводилось на имитационной модели реальной кабельной сети (рисунки 4.8, 4.9). Исследования проводились для КЛ, отходящих от шин секции 2 РП-13 (рисунок 4.8) при различных сочетаниях влияющих факторов. Предварительно для указанных КЛ были определены зависимости $\delta_{\text{нагр}}(I_{\text{нагр}}, l_{3i})$ и $\delta_{\text{нагр}}(I_{\text{нагр}}, l_{3i})$ и получены аппроксимирующие их уравнения, используемые для расчета суммарной погрешности в блоке 9 алгоритма по рисунку 4.28. Компенсация погрешности, обусловленной влиянием собственного емкостного тока поврежденной линии, выполнялась в соответствии с выражением (4.7).

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что применение компенсации суммарной погрешности по методике п. 4.3.11 позволяет повысить точность замера в 2-3 раза и уменьшить погрешности расчета l_3 по (4.3) до 5–10 %.

На рисунке 4.29 в качестве примера приведены результаты оценки на модели сети по рисунку 4.9 суммарной погрешности замера при ОЗЗ на линии КЛ2 при использовании компенсации.

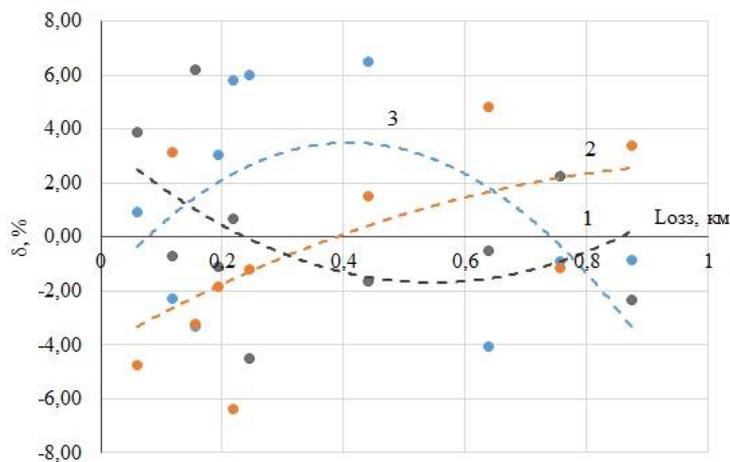


Рисунок 4.29 – Погрешности определения l_3 от удаленности от шин ОЗЗ на линии КЛ2 при $S_{\text{нагр}} = 1,6$ МВА, $u_{\text{нр}} = 0,7 U_{\text{фм}}$ с использованием компенсации по (4.12) при различных параметрах дуги в месте повреждения: 1 – $u_{\text{д}} = 0$; 2 – $u_{\text{д}} = 50$ В; 3 – $u_{\text{д}} = 100$ В (во всех экспериментах $r_{\text{д}} = 0,01$ Ом)

4.3.13 Общая оценка способа ДОМЗЗ, основанного на контроле параметров электрических величин аварийного переходного режима. Проведенный анализ показал, что на точность замера параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, используемых для определения расстояния до места повреждения, значительное влияние может оказывать большое число факторов. Указанные факторы можно разделить на две группы:

- 1) факторы, значения которых можно учитывать или контролировать и использовать для компенсации обусловленных ими погрешностей;
- 2) факторы, значения которых контролировать невозможно.

К первой группе факторов относятся величина собственного емкостного тока поврежденной КЛ, величина тока нагрузки КЛ, значение напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции. Без компенсации влияния указанных факторов погрешности замера расстояния до места повреждения могут достигать значений до 20 и более процентов. Компенсация погрешностей, обусловленных влиянием контролируемых факторов, приводит к существенному усложнению алгоритма ДОМЗЗ и требует предварительных расчетов параметров настройки вычислительного блока на имитационной модели сети, что является недостатком рассматриваемого способа. Даже при достаточно точной компенсации влияния контролируемых факторов погрешности замера по данному способу ДОМЗЗ могут достигать значений до 10 % от величины расстояния l_3 до места повреждения, что объясняется, во-первых, приближенностью методики компенсации погрешностей, а также влиянием факторов, значения которых невозможно контролировать или представляет весьма сложную задачу (переходное сопротивление в месте повреждения, распределенный характер параметров КЛ, зависимость продольных параметров КЛ от частоты переходного тока и др.).

Указанные недостатки снижают эффективность применения данного метода ДОМЗЗ. Следует отметить также, что рассмотренные недостатки в определенной степени относятся также и к другим способам ДОМЗЗ, основанным на измерении параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.

4.4 Исследование погрешностей способа дистанционного определения места замыкания на землю, основанного на использовании алгоритмической модели объекта

4.4.1 **Модели кабельной сети для анализа факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения способа ДМЗЗ, основанного на использовании АМО.** В рассматриваемом способе в качестве наблюдаемых величин так же, как и в рассмотренном в разделе 4.3 способе на основе ПАР, в качестве наблюдаемых величин используются фазные напряжения и ток нулевой последовательности (п. 4.1.3, рисунок 4.4). Поэтому на точность ДМЗЗ по данному способу оказывают влияние в основном те же факторы, что и на точность способа, основанного на контроле параметров электрических величин переходного процесса. С учетом этого для анализа факторов, влияющих на точность замера l_3 с использованием предложенного способа на основе АМО использовались та же методика и имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, что и в разделе 4.3.

Точность рассматриваемого способа зависит от числа используемых в нем моделей АМО – контролируемой КЛ – с различными значениями аварийного параметра l_3 (рисунок 4.4). При исследованиях за основу был принят вариант с 5 АМО, имитирующих ОЗЗ соответственно в точках с $l_{31*} = l_{31}/l_{\text{л}} = 0$; $l_{32*} = 0,25$; $l_{33*} = 0,5$; $l_{34*} = 0,75$ и $l_{35*} = 1$.

4.4.2 **Оценка невязки наблюдаемого $3i_0(t)$ и модельного $3\hat{i}_0(t)$ токов нулевой последовательности.** Для оценки невязки наблюдаемой и модельной величин можно использовать среднеквадратичное значение их разности на интервале времени наблюдения переходного процесса при ОЗЗ

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} [3i_0(t) - 3\hat{i}_0(t)]^2 dt}, \quad (4.13)$$

t_n – время наблюдения переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях.

По данным [10] время полного затухания свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ обычно составляет 3–5 мс, при

этом высокочастотные разрядные составляющие переходного тока затухают за время, как правило, не превышающее 1 мс. Так как частота и амплитуда зарядной составляющей переходного тока ОЗЗ в кабельных сетях практически не зависят от расстояния до места повреждения, то время наблюдения за переходным процессом целесообразно принять равным $t_n = 1$ мс.

Предварительный анализ показал, что оценка невязки по (4.13) из-за сложного многочастотного характера разрядной составляющей и угловых погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности может обусловить значительные погрешности в определении l_3 по минимуму значения ε . С учетом этого невязка ε наблюдаемого и модельного токов нулевой последовательности оценивалась по выражению

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} 3i_0^2(t) dt} - \sqrt{\frac{1}{t_n} \int_0^{t_n} 3\hat{i}_0^2(t) dt} = 3I_0(t_n) - 3\hat{I}_0(t_n), \quad (4.14)$$

где $3I_0(t_n)$ и $3\hat{I}_0(t_n)$ – соответственно среднеквадратичные значения наблюдаемого и модельного токов нулевой последовательности на интервале времени наблюдения t_n переходного процесса.

Так как с увеличением удаленности места повреждения от шин источника питания амплитуда переходного тока и его среднеквадратичное значение на интервале времени наблюдения уменьшаются, то уменьшается и значение невязки ε , а ее минимуму соответствует $\varepsilon = 0$. Это упрощает определение минимума невязки посредством аппроксимации зависимости $\varepsilon = f(l_3)$, полученной по результатам измерения модельного тока $3i_0(t)$ в 5 точках, соответствующих $l_{31^*} = 0$; $l_{32^*} = 0,25$; $l_{33^*} = 0,5$; $l_{34^*} = 0,75$ и $l_{35^*} = 1$.

4.4.3 Анализ влияния на точность замера l_3 удаленности ОЗЗ. Оценка влияния удаленности точки ОЗЗ на точность исследуемого способа ДОМЗЗ производилась на упрощенной модели (рисунок 4.10) для кабельной сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 30$ при варьировании l_3 в пределах от 0,05 до 2 км на поврежденной КЛ, выполненной кабелем с алюминиевыми жилами сечением 240 мм². На рисунке 4.30 в качестве примера приведены результаты расчетов зависимости $\delta = f(l_3)$

для сети с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А и поврежденной КЛ, выполненной кабелем с алюминиевыми жилами сечением 240 мм^2 . Точками обозначены замеры на модели, пунктирной кривой – аппроксимация кривой замеров полиномом второго порядка.

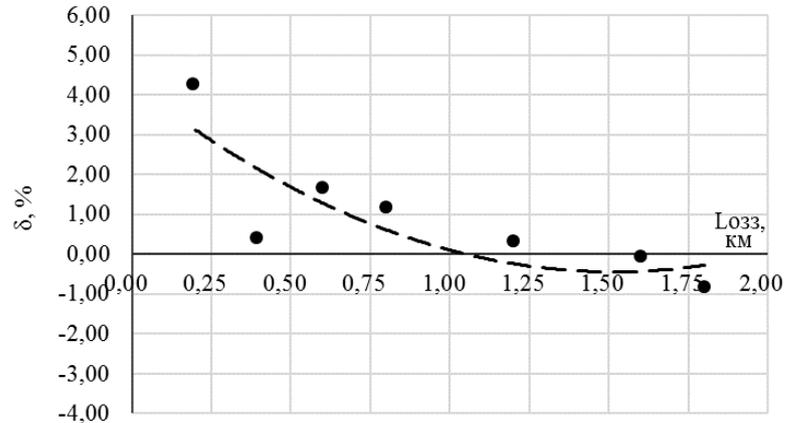


Рисунок 4.30 – Зависимость погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ

для сети с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А, поврежденный кабель ААБ-6-3х240

Из рисунка 4.30 можно видеть, что погрешность исследуемого способа ДОМЗЗ, основанного на использовании АМО, уменьшается с увеличением удаленности места ОЗЗ от шин. Наибольших значений, не превышающих 5 %, погрешность замера l_3 достигает при близких к началу КЛ повреждениях. Указанную погрешность замера в принципе можно уменьшить без увеличения числа используемых для реализации способа АМО с различными значениями аварийного параметра, если в моделях КЛ, имитирующих близкие ОЗЗ, значения l_3 задавать с меньшими, а в моделях, имитирующих удаленные ОЗЗ – с большими интервалами по l_3 .

Отметим также, что в отличие от рассмотренного в разделе 4.3 способа ДОМЗЗ, основанного на контроле параметров электрических величин переходного аварийного режима, на точность способа ДОМЗЗ на основе АМО не влияет значение собственного емкостного тока поврежденной КЛ.

4.4.4 Анализ влияния суммарного емкостного тока сети. Анализ влияния величины суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ на точность замера l_3 исследовалась на модели кабельной сети по рис. 4.9. На рисунке 4.31 приведены зависимости по-

грешности замера $\delta = f(l_3)$ для кабельной сети с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ при различных значениях $I_{c\Sigma} = 20, 30$ и 50 А.

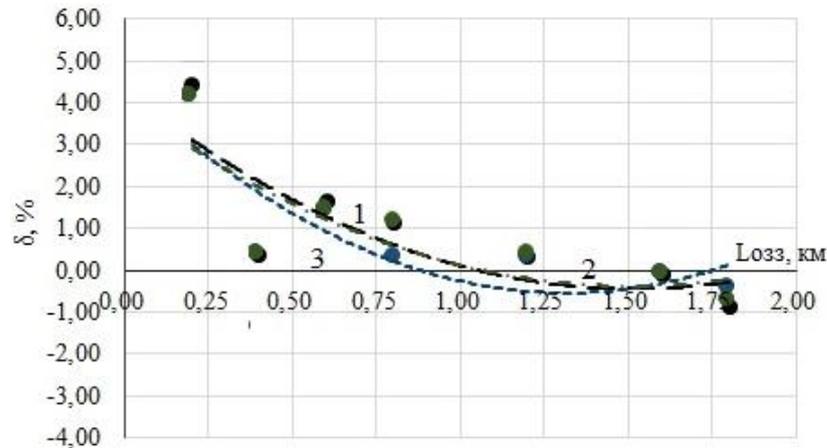


Рисунок 4.31 – Влияние величины суммарного емкостного тока сети на погрешность замера l_3 для сети с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ: 1 – $I_{c\Sigma} = 50$ А; 2 – $I_{c\Sigma} = 30$ А; 3 – $I_{c\Sigma} = 20$ А

Из рисунка 4.31 можно видеть, что в отличие от способа ДМЗЗ, основанного на контроле параметров электрических величин переходного процесса, в данном способе изменение $I_{c\Sigma}$ практически не оказывает влияния на точность замера l_3 .

4.4.5 Анализ влияния переходного сопротивления дуги в месте повреждения. При исследованиях величина u_d принималась в пределах $50 \dots 100$ В, $r_d = 0,01$ Ом. Наибольшее влияние на точность замера l_3 переходное сопротивление дуги оказывает при больших значениях u_d (рисунок 4.32, кривая 1).

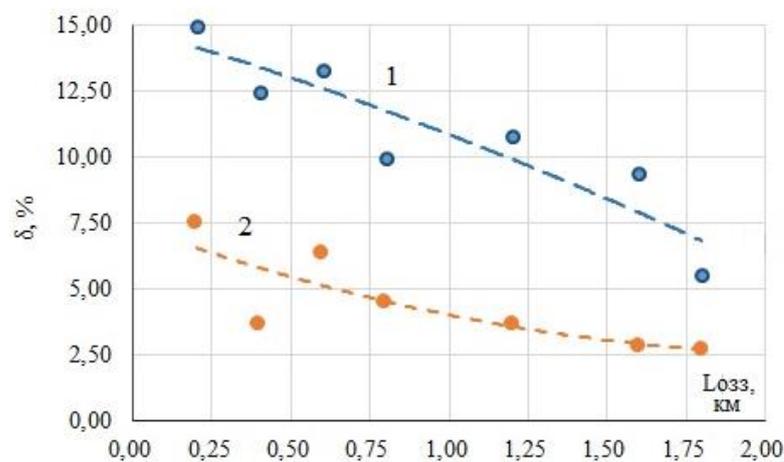


Рисунок 4.32 – Влияние переходного сопротивления электрической дуги в месте повреждения на точность замера l_3 для сети с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $I_{c\Sigma} = 30$ А:

1 – $u_d = 100$ В, $u_{d,\text{мод}} = 0$ В, $r_d = 0,01$ Ом; 2 – $u_d = 100$ В, $u_{d,\text{мод}} = 50$ В, $r_d = 0,01$ Ом

Из рисунка 4.32 можно видеть, что в способе ДОМЗЗ, основанного на использовании АМО, переходное сопротивление может оказывать даже большее влияние на точность замера, чем в способе на основе ПАР. Известно, что при пробое изоляции в кабелях 6–10 кВ в месте повреждения всегда образуется электрическая дуга, но параметры ее, прежде всего, значение u_d , может изменяться в определенных пределах. С учетом этого влияние рассматриваемого фактора на точность ДОМЗЗ можно несколько уменьшить, если наличие дуги учитывать и в АМО (например, кривая 2, рисунок 4.32).

Расчеты на имитационной модели сети показывают, что при изменении значения u_d в пределах 50–100 В [19] для компенсации вносимой дугой погрешностей в модели целесообразно принять $u_{d,mod}$ равной среднему значению в указанном диапазоне – $u_{d,mod} = 75$ В. В этом случае погрешность, обусловленная влиянием переходного сопротивления дуги в месте повреждения, при близких от шин ОЗЗ (порядка 100 м) достигает значений 7-8 % и при увеличении удаленности ОЗЗ от шин до 300 м и более уменьшается до 3-5 % (рисунок 4.33).

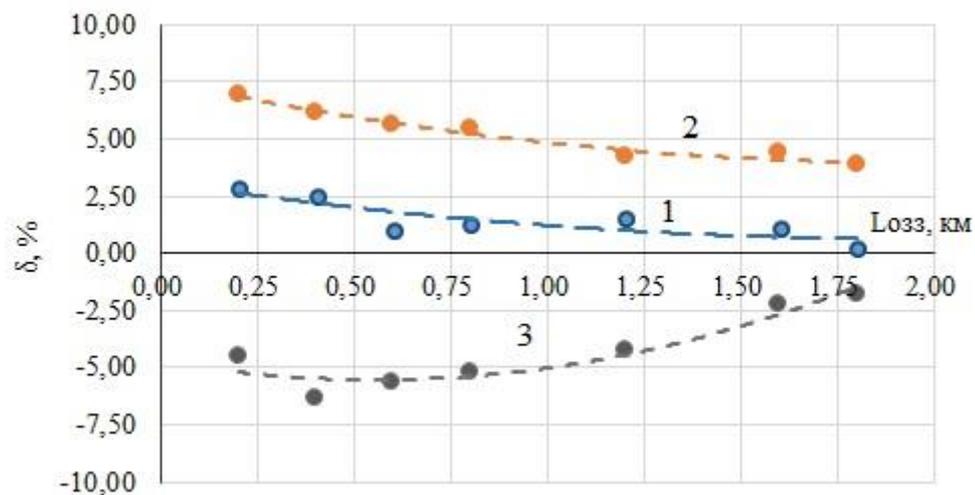


Рисунок 4.33 – Зависимость погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ для сети

с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 30$ А при $u_{d,mod} = 75$ В при параметрах дуги в месте повреждения:

1 – $u_d = 75$ В, $r_d = 0,01$ Ом; 2 – $u_d = 100$ В, $r_d = 0,01$ Ом; 3 – $u_d = 50$ В, $r_d = 0,01$ Ом

В целом же погрешности замера l_3 , обусловленные влиянием переходного сопротивления дуги в месте повреждения, даже при использовании рассмотренного способа компенсации могут достигать 7-8 % при близких к шинам ОЗЗ, уменьшаясь до 3-5 % при увеличении удаленности места повреждения до 2 км от шин.

4.4.6 Анализ влияния величины нагрузки поврежденной КЛ. Влияния величины электрической нагрузки на точность замера I_3 при использовании рассматриваемого способа ДОМЗЗ при различных удаленностях места повреждения от шин иллюстрируется зависимостями, приведенными на рисунке 4.33. Из зависимостей рисунка 4.33 можно видеть, что погрешность, обусловленная влиянием тока нагрузки при максимально допустимой по условиям термической стойкости КЛ и величине падения напряжения в линии может достигать значений до 10%. На рисунке 4.33 кривые 2 и 3 соответствуют максимальному значению и отсутствию нагрузки на КЛ (2000 кВА и 0), при этом в модели нагрузка принята за среднее значение (1000 кВА).

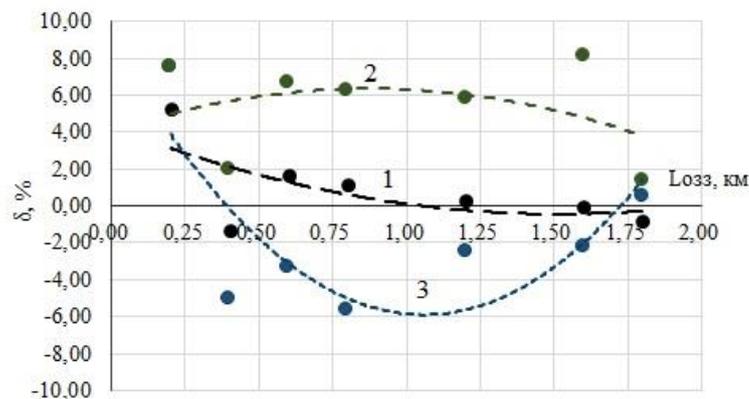


Рисунок 4.33 – Зависимость погрешности определения I_3 от удаленности ОЗЗ, для сети

$U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 50$ А при различных величинах нагрузки КЛ:

1 – $S_{нагр} = 0$, $S_{модель} = 0$; 2 – $S_{нагр} = 2000$ кВА, $S_{модели} = 1000$ кВА;

3 – $S_{нагр} = 0$, $S_{модели} = 1000$ кВА

Из приведенных зависимостей можно видеть, что в данном способе влияние нагрузки поврежденной КЛ на точность замера I_3 может быть скомпенсировано учетом ее в АМО, что позволяет уменьшить погрешность замера, обусловленную влиянием данного фактора.

Влияние тока нагрузки может быть также скомпенсировано с использованием рассмотренной в п. 4.3.11 методики.

4.4.7 Анализ влияния величины напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя. На рисунке 4.34 приведены погрешности исследуемого способа

ДОМЗЗ на основе АМО при различных значениях напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции: $u_{np} = U_{фm}$ и при $u_{np} = 0,5 U_{фm}$.

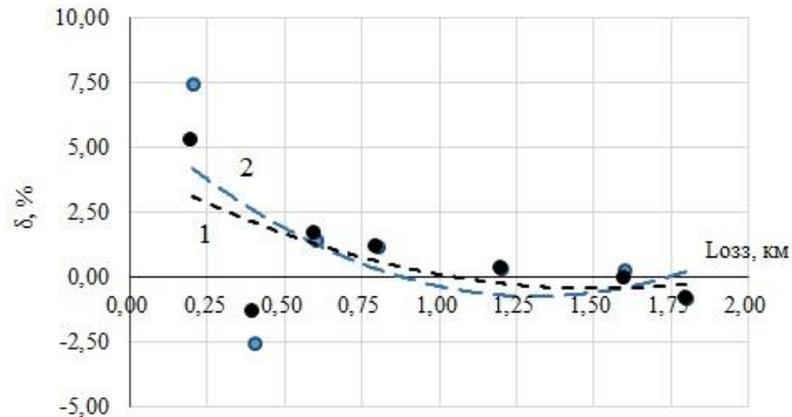


Рисунок 4.34 – Зависимость погрешности замера l_3 для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_{с\Sigma} = 30$ А:

$$1 - u_{np} = U_{фm}; 2 - u_{np} = 0,5 U_{фm}$$

Из рисунка 4.34 можно видеть, что значение u_{np} существенное влияние на точность замера l_3 может оказывать только при близких к шинам ОЗЗ, однако в абсолютных значениях это означает погрешность порядка нескольких десятком метров. При расстояниях от шин порядка 0,5 км и более погрешность не превышает 2 %, т.е. практически не влияет на точность способа ДОМЗЗ.

4.4.8 Комплексное исследование влияния искажающих замер факторов.

На комплексной модели сети, соответствующей схеме реальной кабельной сети (рисунки 4.8, 4.9), проводились вычислительные эксперименты, соответствующие п. 4.3.12.

На основе изложенного, определены факторы, вносящие наибольшие погрешности в определение места ОЗЗ в кабельных сетях 6-10 кВ с использованием АМО – электрическая нагрузка и переходное сопротивление в месте ОЗЗ.

На рисунке 4.35 приведена зависимость погрешности определения l_3 для присоединения KL2, питаемого от шин РП-13. Погрешность способа определялась для точек ОЗЗ, соответствующих середине каждого участка КЛ. В моделях ОЗЗ имитировалось в конце каждого участка КЛ и непосредственно на шинах РП.

Рассматривался режим работы, соответствующей мощности нагрузки $S_{нагр} = 0 \dots 2$ МВА при ОЗЗ через переходное сопротивление (рисунок 4.35), при установленной мощности нагрузки в модели $S_{нагр. мод} = 1$ МВА. Переходное сопротивление

ние в месте ОЗЗ и в модели принималось равным. В модели сети 6 кВ погрешности первичных преобразователей тока и напряжения учитывались моделями ТНКИ и ТТНП, описанными в главе 3.

Из рисунка 4.35 видно, что влияние нагрузки и погрешностей первичных преобразователей приводит к погрешностям способа ДОМЗЗ $\pm 7\%$.

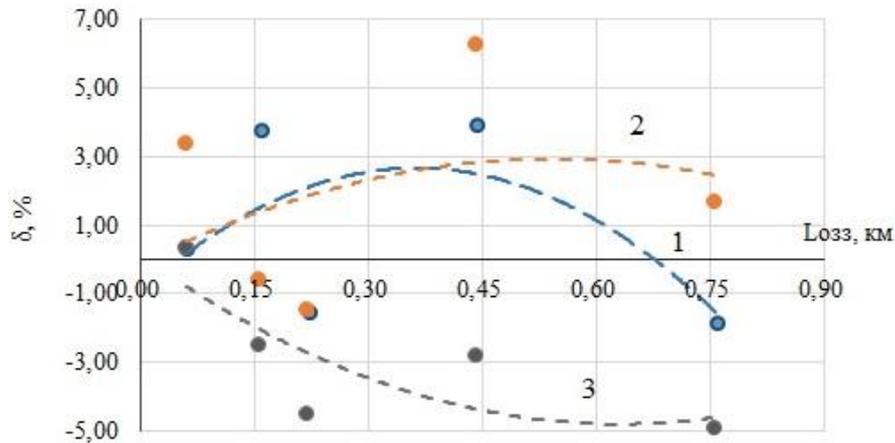


Рисунок 4.35 – Зависимость погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ, для сети

$U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$, $I_{c\Sigma} = 30 \text{ А}$, $S_{\text{нагр. мод}} = 1,0 \text{ МВА}$, $u_{\text{дуги}} = 75 \text{ В}$ (линия KL2):

1 – $S_{\text{нагр}} = 1,0 \text{ МВА}$; 2 – $S_{\text{нагр}} = 2,0 \text{ МВА}$; 3 – $S_{\text{нагр}} = 0$

Было рассмотрено влияние величины переходного сопротивления в месте пробоя на точность замера в режиме нагрузки $S_{\text{нагр}} = S_{\text{нагр. мод}} = 1 \text{ МВА}$ (рисунок 4.36). Наличие переходного сопротивления ведет к увеличению погрешности до 10%.

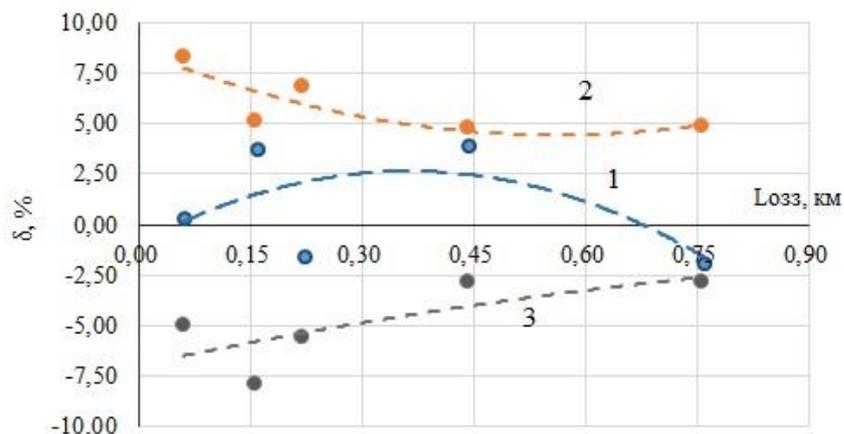


Рисунок 4.36 – Зависимость погрешности определения l_3 от удаленности ОЗЗ, для сети

$U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$, $I_{c\Sigma} = 30 \text{ А}$, $S_{\text{нагр}} = 1,0 \text{ МВА}$, $u_{\text{д.мод}} = 75 \text{ В}$ при напряжениях пробоя:

1 – $u_{\text{д}} = 75 \text{ В}$; 2 – $u_{\text{д}} = 100 \text{ В}$; 3 – $u_{\text{д}} = 50 \text{ В}$

4.4.9 Общая оценка способа ДОМЗЗ на основе АМО. Преимуществами предложенного метода ДОМЗЗ на основе АМО по сравнению с рассмотренным в разделе 4.3 методом на основе ПАР являются:

- практическое отсутствие зависимости замера I_3 от таких факторов, как собственный емкостный ток поврежденной линии, суммарный емкостный ток сети, величина напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции;
- меньшее влияние тока нагрузки на точность замера и относительная простота компенсации данного влияния;
- простота алгоритма ДОМЗЗ с точки зрения его технической реализации по сравнению с алгоритмом на основе способа ПАР.

Основным недостатком предложенного способа ДОМЗЗ в online-режиме является существенное влияние на его точность падения напряжения на электрической дуге в месте повреждения, обуславливающее погрешности замера до 15 %. Влияние дуги в месте повреждения может быть частично скомпенсировано учетом ее в моделях АМО, реализующих алгоритм данного способа, что позволяет уменьшить погрешности от влияния данного фактора до 7-8 %.

Комплексное влияние всех возможных факторов с учетом компенсации влияния тока нагрузки и частичной компенсации влияния переходного сопротивления дуги в месте повреждения обуславливает погрешности замера до 7-8%.

С учетом изложенного способ ДОМЗЗ, основанный на использовании АМО, на наш взгляд, является более перспективным для применения в кабельных сетях 6–10 кВ, чем способ, основанный на методе ПАР. Следует отметить также, что представляет интерес исследование возможностей совместного использования для решения задачи ДОМЗЗ способов на основе методов АМО и ПАР, и эта задача может представить предмет дальнейших исследований. В частности, подобный подход используется для совершенствования методов ОМКЗ в электрических сетях высокого напряжения [например, 208].

4.5 Выводы по главе 4

4.5.1 Предложен способ ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанный на измерении напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока $3i_0(t)$ в момент перехода последнего через нулевое значение, обеспечивающий уменьшение влияния суммарного емкостного тока сети и переходного сопротивления в месте повреждения на точность замера расстояния до места повреждения в online-режиме по сравнению с известными.

4.5.2 Предложен способ ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанный на использовании нескольких алгоритмических моделей контролируемого объекта, различающихся значениями аварийного параметра, обеспечивающий возможность определения расстояния до места повреждения в online-режиме (без предварительной регистрации наблюдаемых величин и последующих расчетов с использованием специальных программ для ЭВМ).

4.5.3 Впервые выполнен анализ всех факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ при использовании способов ДОМЗЗ, основанных на контроле электрических величин переходного процесса, и выявлены наиболее существенные из них.

4.5.4 На основе исследований на имитационных моделях обосновано минимально допустимое значение верхней частоты рабочего диапазона устройств ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса при ОЗЗ ($f_e = 20$ кГц), обеспечивающее приемлемую точность замера расстояния до места повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ.

4.5.5 На основе исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ показано, что при использовании способа ДОМЗЗ по п. 4.5.1 на точность замера расстояния до места повреждения наиболее существенное влияние могут оказывать такие факторы, как многочастотный характер разрядной составляющей переходного тока ОЗЗ, относительное (по отношению к суммарному емкостному току сети) значение собственного емкостного тока поврежденной КЛ, ток нагрузки

поврежденной линии, величина напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции. Показано, что погрешность замера расстояния до места повреждения, обусловленная суммарным влиянием всех указанных факторов, может достигать 20 и более процентов.

4.5.6 Предложена методика компенсации погрешности замера расстояния до места ОЗЗ, обусловленной суммарным влиянием факторов, значения которых заранее известны или могут контролироваться, и разработан алгоритм ДОМЗЗ по способу п. 4.5.1, использующий предложенный способ компенсации суммарной погрешности, позволяющий уменьшить ее до ~10 %.

4.5.7 На основе исследований на имитационных моделях показано, что способ ДОМЗЗ по п. 4.5.2 обладает рядом существенных преимуществ по сравнению со способом по п. 4.5.1 в части устойчивости замера расстояния до места ОЗЗ к влиянию различных факторов и простоты алгоритма и потому является более перспективным для применения в кабельных сетях 6–10 кВ.

Основные результаты исследований данной главы отражены в публикациях [88, 93, 103, 105, 106].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основе анализа особенностей определения места повреждения при замыканиях на землю на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, сформулированы задачи дистанционного определения места ОЗЗ в кабельных сетях, их место в мероприятиях по диагностированию повреждений в кабелях и основные требования к устройствам автоматики данного назначения.

2 С учетом особенностей распределительных кабельных сетей 6–10 кВ различного назначения, обоснованы подходы к решению задачи локализации зоны ОЗЗ на КЛ под рабочим напряжением в кабельных сетях систем промышленного и систем городского электроснабжения и обоснована область эффективного применения ДОМЗЗ

3 Показано, что наиболее перспективными для решения задачи ДОМЗЗ в кабельных сетях являются методы, основанные на контроле параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, а также методы, использующие сравнение наблюдаемых электрических величин переходного процесса и электрических величин, полученных с использованием имитационной алгоритмической модели контролируемого объекта.

4 На основе сравнительного анализа показано, что известные способы и предложения по выполнению устройств ДОМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанных на использовании переходного процесса при ОЗЗ, не учитывают в полной мере влияния на точность определения расстояния до места повреждения различных искажающих замер электрических величин факторов и нуждаются в совершенствовании. Определены основные задачи, связанные с совершенствованием методов ДОМЗЗ на кабельных линиях 6–10 кВ, находящихся под рабочим напряжением, и обоснованы методы их решения.

5 На основе исследований переходных процессов при ОЗЗ, выполненных с применением аналитической и имитационной моделей, выявлены информационные параметры переходных токов и напряжений, обладающие явно выраженной зависи-

мостью от удаленности места ОЗЗ от шин и наибольшей устойчивостью к влиянию искажающих замер факторов, таких, как суммарный емкостный ток сети, переходное сопротивление в месте повреждения, напряжение на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции.

6 Показано, что по принципу своего действия повышение устойчивости замера расстояния до места повреждения в условиях влияния искажающих факторов позволяют обеспечить способы ДМЗЗ, основанные на замере параметров электрических величин переходного процесса в моменты времени, соответствующие переходам тока $3i_0(t)$ через нулевые значения, а также способы ДМЗЗ, основанные на использовании алгоритмической модели контролируемого объекта – кабельной ЛЭП.

7 На основе экспериментальных исследований частотных характеристик первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, а также анализа спектров переходных токов при ОЗЗ показано, что верхняя частота рабочего диапазона частот устройств ДМЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ не может быть выше 20 кГц.

8 Разработаны математические модели кабельного трансформатора тока и трансформатора напряжения нулевой последовательности 6–10 кВ для комплексных исследований на имитационных моделях эффективности методов ДМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса. Показано, что модель ТТНП на основе уравнения динамики перемагничивания сердечника трансформатора тока обеспечивает более высокую точность расчета мгновенных значений вторичного тока при различных значениях нагрузки по сравнению с моделями с применением основной или средней кривых намагничивания.

9 Предложен способ ДМЗЗ, основанный на замере переходного напряжения поврежденной фазы и производной переходного тока в моменты времени, соответствующие переходу последнего через ноль, обеспечивающий повышение устойчивости замера к влиянию возможных в реальных условиях условий эксплуатации изменений суммарного емкостного тока сети и величины переходного сопротивления в месте повреждения.

10 Предложен способ ДМЗЗ, основанный на использовании нескольких алгоритмических моделей контролируемой ЛЭП с различными значениями аварийных

параметров, обеспечивающий возможность замера расстояния до места повреждения в online-режиме, т.е. без предварительной регистрации наблюдаемых величин и последующих расчетов с применением специальных программ.

11 Выполнен анализ факторов, влияющих на точность замера расстояния до места повреждения при использовании способов ДОМЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса.

12 На основе анализа по п. 11 и комплексных исследований на имитационных модели, имитирующей участок реальной городской кабельной сети напряжением 6 кВ, показано, что суммарное влияние различных искажающих замер факторов при выполнении ДОМЗЗ на основе способа по п. 9 может обусловить погрешности замера до 20 и более процентов.

13 Предложена методика компенсации суммарной погрешности, обусловленной влиянием факторов, параметры которых известны или контролируются в online-режиме (собственный емкостный ток контролируемой линии, ток нагрузки, значение напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции), позволяющая уменьшить суммарную погрешность способа по п. 9 до ~10 %. Применение компенсации приводит к существенному усложнению алгоритма и необходимости предварительного расчета зависимостей погрешностей, обусловленных влиянием контролируемых факторов, на имитационной модели контролируемой сети.

14 Способ ДОМЗЗ с использованием алгоритмических моделей контролируемой ЛЭП (по п. 10) обеспечивает значительно более высокую устойчивость замера в условиях влияния различных искажающих факторов и имеет более простой алгоритм по сравнению со способом, основанным на контроле параметров электрических величин переходного процесса (п. 9). На основе анализа факторов, влияющих на точность замера, и комплексных исследований на имитационных модели участка реальной городской кабельной сети, показано, что суммарное влияние различных искажающих замер факторов при выполнении ДОМЗЗ на основе способа по п. 10 может обусловить погрешности замера не более $\pm 15\%$ при малых расстояниях до места повреждения (порядка сотен метров) и не более $\pm 5-7\%$ при больших расстояниях (порядка единиц километров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.
2. Боков Г.С. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? / Г.С. Боков // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2002. – № 2(14). – Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/> / (Дата обращения 14.07.2005).
3. Лебедев Г.М. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6–10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 / Лебедев, Геннадий Михайлович. – Москва, МЭИ (Технический университет), 2007. – 410 с.
4. Положение о технической политике в распределительном электросетевом комплексе. – М.: ОАО «РОСЭП» – 2006. – 73 с.
5. Доклад по силовым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 1-10 кВ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://refdb.ru/look/2602057.html> (Дата обращения 04.05.15).
6. Крутов А. Класс средних и низких напряжений вообще забыт / А. Крутов // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2002. – № 1(13). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2002/13/04.php> (Дата обращения 29.04.15).
7. Курыло Д.А. Показатели надежности кабельных линий 6-10 кВ / Ю.Д. Сибиркин, В.А. Яшков, Д.А. Курыло // Промышленная энергетика. – 1979 –№ 7. – С. 27–28.
8. Симнишкис Б.И. Аварийная повреждаемость кабельных линий 6 кВ, переведенных на напряжение 10 кВ / Б.И. Симнишкис, Ю.И. Тункявичус // Опыт эксплуатации кабельных линий. – Л.: Энергия, 1974. – С. 111–113.
9. Беляков Н.Н. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях / Н.Н. Беляков // Электрические станции. – 1952. – № 6. – С. 40 – 43.

10. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. - М.: Энергия. – 1971. – 152 с.
11. Вильгейм Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – 416 с.
12. Обердорфер Г. Замыкания на землю и борьба с ними / Г. Обердорфер. – М.: Энергоиздат. – 1932. – 203 с.
13. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах / Л.И. Сиротинский. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – 268 с.
14. Жидков В.О. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Шуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 152 с.
15. Дударев Л.Е. Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях / Л.Е. Дударев, С.И. Запорожченко, Н.М. Лукьянцев // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64 – 66.
16. Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3-35 кВ: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Шуин Владимир Александрович. – М.: ВНИИЭ. – 1994. – 523 с.
17. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss / W. Petersen. – ETZ. – 1917. - Н. 37, 38.
18. Peters I.E. Voltage Induced by Arcing Ground / I.E. Peters, J. Slepian. – Tr. AIEE. – 1923. – P. 478
19. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью / Н.Н. Беляков // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31–36.

20. Шадрикова Т.Ю. Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шадрикова Татьяна Юрьевна. – Иваново, ИГЭУ, 2016. – 204 с.

21. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. – 272 с.

22. Повреждаемость КЛ в ОАО "Ленэнерго" и влияние на неё перенапряжений в электрических сетях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ruscable.ru/print.html?p=/article/Povrezhdaemost_kl_v_oao_lenenergo_i_vliyaniye_na_neyo_pereparnyazhenij/ (Дата обращения 16.05.2016).

23. Шалыт Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях / Г.М. Шалыт // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – С. 77–97.

24. Шалыт Г.М. Профилактические испытания изоляция под нагрузкой в кабельных сетях 6-10 кВ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шалыт Герман Михайлович. – М.: ВНИИЭ, 1959.

25. Определение места кратковременного замыкания на землю при помощи электронного реле (реферат статьи Н. Hegebauer) // Энергетическое обозрение. – 1936 – № 11. – С. 10–20.

26. Шуин В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ / А.В. Гусенков, В.А. Шуин. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик». – 2001. – 104 с.

27. Кадомская К.П. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Ю.А. Лавров, А.Г. Овсянников, В.А. Сахно // Электротехника. – № 11. – 2000. – С. 48 – 51.

28. Качесов В.Е. Мониторинг аварийных событий в городских кабельных сетях 10 кВ / В.Е. Качесов, В.Н. Ларионов, А.Г. Овсянников // Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования: Вып.11. – СПб.: ПЭИПК. – 2000.

29. Качесов В.Е. On-line диагностика распределительных сетей: подзадача распознавания однофазных замыканий на землю в сетях с резонансно-заземленной нейтралью / В.Е. Качесов, Л.В. Квриришвили // Электричество. – 2010. – № 12. – С. 8–18.

30. Квриришвили Л.В. Исследование и разработка методов локации однофазных замыканий на землю в распределительных сетях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.12, 05.14.02 / Квриришвили Любовь Витальевна. – Томск, НИ ТПУ. – 2012. – 178 с.

31. Двадцать пять лет изучения энергосистем Франции. Обзор работ национального энергетического управления. – Л.: Энергия. – 1977. – 129 с.

32. Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

33. Айзенфельд А.И. Методы определения мест короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи при помощи фиксирующих приборов / А.И. Айзенфельд. – М.: Энергия, 1974. – 80 с.

34. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима / Г.М. Шалыт, А.И. Айзенфельд, А.С. Малый. Под. ред. Г.М. Шалыта. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

35. Айзенфельд А.И. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями / А.И. Айзенфельд, Г.М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

36. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике при замыканиях на землю / Е.А. Аржанников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.

37. Аржанников Е.А. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, А.М. Чухин. – М.: НТФ "Энергопрогресс", 1998. – 64 с.

38. Аржанников Е.А. Определение мест короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов; под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
39. Арцишевский Я.Л. ОМП линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью / Я.Л. Арцишевский. – М.: Высш. шк., 1988. – 94 с.
40. Аржанников Е.А. Методы и средства автоматизированного анализа аварийных ситуаций в электрической части энергообъектов / Е.А. Аржанников, М.Г. Марков, М.Ш. Мисриханов. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 284 с.
41. Белотелов А.К. Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждений линий электропередачи / А.К. Белотелов, А.С. Саухатас, И.А. Иванов, Д.Р. Любарский // Электрические станции. – 1997. – № 12. – С. 7–12.
42. Борухман В.А. Устройства для определения места повреждения на линиях электропередачи / В.А. Борухман, А.А. Кудрявцев, А.П. Кузнецов. – М.: Энергия, 1980. – 87 с.
43. Кузнецов А.П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи / А.П. Кузнецов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 94 с.
44. Куликов А.Л. Дистанционное определение мест повреждений высоковольтных линий электропередачи средствами цифровой обработки сигналов: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Куликов Александр Леонидович. – Иваново, ИГЭУ, 2007. – 380 с.
45. Куликов А.Л. Цифровое дистанционное определение повреждений ЛЭП / Куликов А.Л.; под ред. М.Ш. Мисриханова. – Н.Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии гос. службы, 2006. – 315 с.
46. Лямец Ю.Я. Адаптивные реле: теория и приложение к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Лямец Юрий Яковлевич. – М.: ВНИИЭ, 1994. – 538 с.

47. Антонов В.И. Определение места повреждения линии электропередачи по компонентам свободного процесса / Ю.А. Лямец, В.И. Антонов, С.Х. Ахметзянов // Электротехника. – 1993. – № 3. – С. 60–66.

48. Антонов В.И. Диагностика линий электропередачи / Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов, Г.С. Нудельман, Н.В. Подшивалин // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чувашск. ун-та, 1992. – С. 9–32.

49. Розенкоп М.П. Методика определения места замыкания на землю по токам и напряжениям нулевой последовательности в сетях разной конфигурации / М.П. Розенкоп. – М.: Энергия, 1964. – 33 с.

50. Саухатас А.С. Синтез и оптимизация измерительных органов микропроцессорных устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики линий электропередачи: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / А. С. Саухатас. – Новочеркасск, 1991. – 37 с.

51. Blackburn J.L. Protective Relaying: Principles and Applications / J.K. Blackburn. – Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 638 p.

52. Gilbert J.G. High speed transmission line fault impedance calculation using a dedicate minicomputer / J.G. Gilbert, R.J. Shovlin // IEEE Trans., 1975, PAS 94, 1975. – P. 544–550.

53. Girgis, A. A. A new fault location technique for two-and three-terminal lines / A.A. Girgis, D.G. Hart, W.L. Peterson // IEEE Transactions on Power Delivery. – №7(1). – P. 98–107.

54. Kohlas J. Estimation of fault location on power lines /J. Kohlas // 3rd IF AC Symp., Hague/Delft, The Netherlands, 1973. – P. 393–402.

55. Rockefeller G.D. Fault protection with digital computer / G.D. Rockefeller // IEEE Trans., 1969, PAS-88. – P. 438–464.

56. Christopoulos C. Electrical power System Protection / A. Wright, C. Christopoulos. – Chapman & Hall, London, 1993. – 530 p.

57. Agarval R.A. A technique for estimating transmission line fault location from digital impedance relay measurements / M.S. Sachdev, R.A. Agarval. – IEEE Trans. Power Deliv., 3. – 1988. – P. 121–129.

58. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения линий импульсными методами / Г.М. Шалыт. – М.: Энергия, 1968. – 216 с.

59. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г.М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с.

60. Кофман Б.Л. Прибор для определения места повреждения кабелей Р5-9 / В.А. Половников, В.Н. Милованов, Б.Л. Кофман, Г.М. Шалыт // Электрические станции. – 1976. – № 2. – С. 86–88.

61. Брауде Л.И. Устройство для определения мест сложных повреждений кабельных линий / Л.И. Брауде, В.П. Коваленко, С.Н. Окнин, Г.М. Шалыт // Электрические станции. – 1975. – № 11. – С. 77–79.

62. Афонин А.Н. Локационный автоматический искатель повреждений ВЛ Р5-7 / Г.М. Шалыт, С.Е. Сидорчук, А.Н. Афонин, А.Я. Красюк // Определение мест повреждения воздушных линий электропередачи. – М.: Энергия, 1977. – С. 131–139.

63. Байбурин Э.Р. Повышение надежности сельских электрических сетей 6(10) кВ на основе оперативного определения места повреждения при однофазных замыканиях на землю по параметрам переходного процесса без отключения потребителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / Байбурин Эдуард Рамилович. – Уфа, БГАУ. – 2006. – 222 с.

64. Петрухин А.А. Совершенствование методов и технических средств определения мест повреждений воздушных ЛЭП 6-35 кВ на основе активного зондирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Петрухин Андрей Алексеевич. – Иваново, ИГЭУ, 2009. – 176 с.

65. Закамский Е.В. Локационный метод обнаружения повреждений в электрических распределительных сетях напряжением 6-35 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Закамский Евгений Владимирович. – Казань, КГЭУ. – 2004. – 168 с.

66. Латипов А.Г. Комплекс методик определения места повреждения в распределительных электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ по параметрам установившихся и переходных режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Латипов Альмир Гамирович. – Казань: КГЭУ. – 2012. – 212 с.

67. Ильиных М.В. Определение места замыкания на землю на воздушных линиях 6-35 кВ / Л.И. Сарин, А.И. Шалин, М.В. Ильиных, А.Б. Пичхадзе, А.А. Михель // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ». – 2006. – С. 189–197.

68. Технический отчёт ОАО «Транснефтьналадка». Разработка измерительного комплекса для определения мест однофазных замыканий на землю на ВЛ-10 кВ и технических мероприятий по его внедрению. Шифр работы: 03.4.6.9.054. Инв.№ 452. – 41 с.

69. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением / В.Е. Качесов // Электричество. – 2005. – №6. – С. 9–18.

70. Качесов В.Е. Параметрический метод определения расстояния до места повреждения в распределительных сетях / В.Е. Качесов, В.Ю. Лавров, А.Б. Черепанов // Электрические станции. – 2003. – № 8. – С.37–43.

71. Патент на изобретение № 2222026 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания в распределительных сетях / Качесов В.Е. – Приоритет изобретения от 11.01.2002 г.

72. Белянин А.А. Исследование и разработка средств локации замыканий на землю фидера распределительной сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Белянин Андрей Александрович. – Чебоксары, ЧГУ, 2015. – 110 с.

73. Лебедев В.Д. Определение параметров и характеристик трансформаторов тока нулевой последовательности с использованием NI технологий / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: Сборник трудов IX Научно-практической конференции. – М.: РУДН. – 2010 – С. 418–419.

74. Лебедев В.Д. Математическое моделирование трансформатора тока в программе MATLAB на основе экспериментальных данных / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: материалы V Международной научной конференции / сост. В.В. Замаруев. – Харьков: ФЛП Шейнина Е.В. – 2011. – С. 652–658.

75. Лебедев В.Д. Исследование процессов перемагничивания сердечников трансформаторов тока / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2011». – Иваново: ИГЭУ. – 2011. – Т. 3. – С 74–78.

76. Лебедев В.Д. Разработка математической модели кабельного трансформатора тока нулевой последовательности на основе экспериментальных данных / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М: Издательский дом МЭИ. – 2012. – Т. 4. – С. 392.

77. Лебедев В.Д. О подходах к моделированию трансформаторов тока нулевой последовательности / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия-2012» – Иваново: ИГЭУ. – 2012. – Т.3. – С. 86–92.

78. Филатова Г.А. Разработка модели кабельного трансформатора тока нулевой последовательности / Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодёжи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – Т. 2. – С. 289–294.

79. Филатова Г.А. Модель для исследования трансформаторов тока нулевой последовательности в установившихся и переходных режимах / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XIX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013. – Т. 4. – С. 284.

80. Лебедев В.Д. Сравнительный анализ способов выполнения измерительных преобразователей тока нулевой последовательности / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Восьмая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2013. – Т. 3. Ч. 1– С. 134–139.

81. Лебедев В.Д. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики / В.Д. Лебедев, А.Е. Нестерихин, Г.А. Филатова // IV международная научно-техническая конференция "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем": электронный ресурс. – 2013.

82. Лебедев В.Д. Математическая модель кабельного трансформатора тока нулевой последовательности / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // IV международная научно-техническая конференция "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем": электронный ресурс. – 2013.

83. Филатова Г.А. Применение уравнения динамики перемагничивания для моделирования трансформаторов тока нулевой последовательности / Г.А. Филатова // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2013. – Т. 1. – С. 140–143.

84. Филатова Г.А. Исследование работы кабельных трансформаторов тока в переходных режимах замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодежи: Научные труды IV международной научно-технической конференции. В 2 т.– Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). – 2013. –Т. 2. – С. 196–199.

85. Лебедев В.Д. Моделирование кабельных трансформаторов тока для защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 10 кВ / В.Д. Лебедев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып.1 – С 25–32.

86. Филатова Г.А. Исследование работы кабельных трансформаторов тока в переходных режимах замыкания на землю в сетях 6-10 кВ / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М: Издательский дом МЭИ. – 2014. – Т. 4. – С. 313.

87. Филатова Г.А. О способах дистанционного определения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ, основанных на использовании переходного процесса / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. –Иваново: ИГЭУ. – 2014. – Т. 3. Ч. 1 – С. 190–196.

88. Filatova G. Study of Possibility of Digital Voltage Transformers Usage in Fault Location Determination / G. Filatova, V. Lebedev, V. Shuin // Proceedings of 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). - 2016. – P. 1–4.

89. Filatova G.A. Study and Modeling of Zero Sequence Current Sensors in the Transient Modes in Matlab / G.A. Filatova, V.D. Lebedev, V.A. Shuin // Proceedings of Tenth International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC). – 2014. – P. 1-2.

90. Филатова Г.А. Модели кабельных трансформаторов тока для исследования защит от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ в широком диапазоне частот / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике: в 5 т. – Т. 4. – Казань: КГЭУ, 2014. – С 68–77.

91. Филатова Г.А. Оценка методов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ на основе электрических величин переходного процесса / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. – Иваново: ИГЭУ. – 2014. – № 4. – Т. 1. – С. 278–285.

92. Филатова Г.А. Модели кабельных трансформаторов тока на основе частотных характеристик / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. – Иваново: ИГЭУ. – 2014. – № 4 – Т. 1. – С. 285–292.

93. Воробьева Е.А. Определение частотных характеристик индуктивностей трехжильных кабелей 6-10 кВ / Е.А. Воробьева, Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. тр. V Международной молодежной научно-технической конференции. – Томск. – 2014. – Т.1. – С. 558–563.

94. Воробьева Е.А. Использование электрических величин переходного процесса для определения зоны однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / Е.А. Воробьева, Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. тр. V Международной молодежной научно-технической конференции. – Томск. – 2014. – Т. 1. – С. 569 – 574.

95. Filatova G. Modeling of magnetization reversal processes in magnetic circuits of measuring transformers / G. Filatova, V. Lebedev, A. Makarov, A. Yablokov // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015. – S05.3.

96. Filatova G. Information Parameters of Electrical Quantities of the Transient for Determining the Single-Phase Earth Fault Location in Cable Medium-Voltage Systems / G. Filatova, V. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015. – P01.3.

97. Filatova G. Modeling of measuring current and voltage transformers in dynamic modes / G. Filatova, V. Lebedev, V. Shuin, A. Yablokov // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2014. – P. 1–7.

98. Филатова Г.А. Определение места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // РАДИОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: XXI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. – М: Издательский дом МЭИ. – 2015. – Т. 4. – С. 299.

99. Филатова Г.А. Влияние частотных характеристик трансформаторов напряжения трансформаторов тока и напряжения нулевой последовательности на точность замера электрических величин переходного процесса для решения задачи определения места однофазного замыкания на землю / Г.А. Филатова, В.А.

Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т. 3. – С. 108–110.

100. Филатова Г.А. Определение места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ. – 2015. – Т. 1. – С. 21–22.

101. Филатова Г.А. Частотные характеристики и модель трансформатора напряжения в аспекте задачи определения места замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и тепло-технологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т. 3. – С. 438–441.

102. Дистанционное определение места однофазного замыкания на землю в кабельных распределительных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса / В.А. Шуин, Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. В 2 т. – Иваново: ИГЭУ. – 2015. – Т.2. – С. 193–198.

103. Воробьева Е.А. Методика определения индуктивностей трехфазных силовых кабелей при расчетах переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ / Е.А. Воробьева, А.В. Куванов, В.К. Слышалов, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 6. – С. 17–22.

104. Винокурова Т.Ю. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, С.Н. Пашковский, Г.А. Филатова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин // Релейщик. – 2015. – № 2. – С.23 – 29.

105. Заявка на патент № 2016125792 (РФ). Способ дистанционного определения места однофазного замыкания на землю / Ганджаев Д.И., Филатова Г.А., Шуин В.А.– Приоритет изобретения от 28.06.2016 г.

106. Воробьева Е.А. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6-10 кВ / Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев, Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 2. – С. 34–42.

107. Нормы испытаний электрооборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1997. – 303 с.

108. ГОСТ 20911-96. Техническая диагностика. Термины определения. М.: Изд. стандартов. – 1997.

109. СО 153-34.20.561-2003. Инструкция по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем /Утверждена приказом Минэнерго России от 30.06.2003 № 289. – М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2004.

110. Руководство по определению мест повреждения кабелей: В сб. руководств по наладочным работам. – М.: Энергия, 1975. – 312 с.

111. Методы контроля состояния кабельной линии. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Раздел 13. – М.: СПО ОР-ГРЭС, 1997.

112. Арцишевский Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью: Учеб. пособие для ПТУ / Я.Л. Арцишевский. – М.: Высш. шк., 1989. – 87 с.

113. Быкадоров В.Ф. Совершенствование методов и средств диагностирования повреждений силовых кабельных линий и комплектных токопроводов: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Быкадоров Владимир Фёдорович. – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 1998. – 421 с.

114. Березкин Е.Д. Анализ характеристик и разработка испытательных моделей силовых кабельных линий 6–10 кВ для диагностических лабораторий электрических сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Березкин Евгений Данилович. – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 264 с.

115. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

116. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.

117. Вайнштейн, Р.А. Режимы нейтрали в электрических системах: уч. пособие / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин, Н.В. Коломиец. – Томск: ТПИ, 1981. – 79 с.

118. Ягудаев, Б.М. Высокоомное заземление нейтрали подземных электрических сетей напряжением 10 кВ: Сб. науч. тр./ Б.М. Ягудаев, Ю.А. Дикий; под ред. Ю.А. Дикого. – Донецк: ВНИИВЭ. – 1985. – С. 19–26.

119. Обабков, В.К. Сравнительный анализ способов заземления нейтрали в задаче подавления дуговых замыканий на землю / В.К. Обабков, Э.Р. Осипов // Известия вузов. Горный журнал. – 1988. – № 3. – С. 94–97.

120. Евдокунин, Г.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ / Г.А. Евдокунин, С.В. Гладилин, А.А. Корепанов // Электричество. – 1998. – № 12. – С. 8–22.

121. Евдокунин, Г.А. Основные характеристики различных способов заземления нейтрали сетей 6–35 кВ / Г.А. Евдокунин // Защита от однофазных замыканий на землю в электроустановках 6–35 кВ: Сб. статей и информации кафедры релейной защиты и автоматики ПЭИпк. – СПб. – 1999.

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

123. Лисицын, Н.В. К обоснованию выбора режима заземления нейтрали / Н.В. Лисицын // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 22–25.

124. 4 режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Объявим изолированную нейтраль вне закона // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2003. – № 5. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/05.php> (Дата обращения: 01.02.2015).

125. Целебровский Ю.Б. Области применения различных систем заземления нейтрали // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2004. – № 5. – С. 28–31. – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2011/etf/minakova/library/article4.htm> (Дата обращения: 08.06.2015).

126. Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 - 10 кВ дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром» // СТО Газпром 2-1.11-070-2006.

127. Буянов Э.В. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали / Э.В. Буянов, М.В. Ильиных, Л.И. Сарин, В.Н. Шамко, А.И. Ширковец // Энергоэксперт. – 2008. – № 1. – С. 56–64.

128. О повышении надежности систем 6 кВ собственных нужд энергоблоков. Эксплуатационный циркуляр № Ц-10-83(3) от 15.08.83. – Главное техническое управление по эксплуатации энергосистем Минэнерго СССР.

129. О проектировании сетей собственных нужд энергоблоков / Решение главного технического управления Минэнерго СССР № 8/8-8 от 17.06.86.

130. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС / Эксплуатационный циркуляр № Ц-01-97(7) – М.: Росэнергоатом – 1997.

131. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС / Эксплуатационный циркуляр Минэнерго СССР № Ц-01-83 от 23.09.88.

132. Гусенков А.В. Влияние способа заземления нейтрали сети 6 кВ собственных нужд на надежность работы энергоблока / А.В. Гусенков, В.А. Шуин // Повышение эффективности работы Энергосистем: Труды ИГЭУ, Вып. V; под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова, А.В. Мошкарина. – М: Энергоатомиздат. – 2004. – С. 258–264.

133. Ефимов Ю.К. Опыт эксплуатации сетей собственных нужд блоков 500 МВт с заземлением нейтрали через резистор / Ю.К. Ефимов, В.И. Шилов, О.Г. Шишкина // Электрические станции. – 1992. - №5. – С. 68–71.

134. Кадомская К. П. Перенапряжения в сетях среднего и высокого напряжения. Проблемы внедрения нового силового оборудования / К.П. Кадомская // Новости Электротехники [Электронный ресурс]. – 2009. – № 2 (56) – С. 28–31. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/56/05.php> (Дата обращения: 02.03.2017).

135. Тодирка С. Желание производителей адаптировать оборудование к требованиям эксплуатации – основа плодотворного сотрудничества /С. Тодирка // Новости Электротехники [Электронный ресурс]. – 2009. – № 6(60). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/60/05.php> (Дата обращения: 05.03.2015).

136. Емельянов Н.И. Актуальные вопросы применения резистивного и комбинированного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ / Н.И. Емельянов, А.И. Ширковец // Энергоэксперт. – 2010. – №2. – С. 44–51.

137. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Учебное пособие / Г.Н. Ополева. – М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. – 480 с.

138. Сербиновский, Г.В. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Г.В. Сербиновский. – М. Энергия, 1980. – 576 с.

139. Барыбин, Ю.Г. Справочник по проектированию электроснабжения / Ю.Г. Барыбин, Л.Е. Федоров, М.Г. Зименков, А.Г. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

140. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров – М.: Энергия, 1972. – 416 с.

141. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б.Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 366 с.

142. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 414 с.

143. Добрягина О.А. Исследование и разработка методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит от замыканий

на землю в сетях 6-10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Добрягина Ольга Александровна. – Иваново, ИГЭУ, 2012. – 179 с.

144. Шагурина, Е.С. Повышение эффективности функционирования в переходных режимах устройств релейной защиты на основе высших гармоник: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шагурина Елена Сергеевна. – Иваново, ИГЭУ, 2012. – 212 с.

145. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем / А.М. Федосеев. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.

146. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 4-е изд., перераб. и доп. – 350 с.

147. Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем / В.А. Семенов, Н.В. Чернобровов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

148. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.

149. Кискачи, В.М. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.М. Кискачи, Ю.Г. Назаров // В кн.: Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Под ред. В.И. Иоэльсона. - М.: Госэнергоиздат. – 1962. – С. 39–66.

150. Кискачи, В.М. Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / В.М. Кискачи, Ю.Г. Назаров // Труды ВНИИЭ. Вып. 16. – М.: Госэнергоиздат. – 1963. – С. 219–251.

151. Кискачи, В.М. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина и др. // Электрические станции. – 1972. – № 4. – С. 69–72.

152. Кужеков С.Л., Гончаров С.В. Городские электрические сети: Учебное пособие – Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2001. – 256 с.

153. Инструкция по проектированию городских электрических сетей. РД.34.20.185–94. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 48 с.

154. Борковский С.О. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / С.О. Борковский, Т.С. Горева, Т.И. Горева // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 9-5. – С. 954–959.

155. Pundt H. Untersuchung der Ausgleichvorgaunge bei Erdschluss in Hochspannungsnetzen mit isoliertem Sternpunkt und induktiefer Sternpunktterdung als Grundlage zur selektiver Erdschlusserfassung / Diss. Zur Erlangung des`Grades eines Dr.-Ing. – TU Dresden, 1963.

156. Gegner, L. Elektronisches Erdschlussrelays TRER zur selektiver Erdschlusserfassung / L. Gegner // *Elektro-Apparate Mitteilungen*. – 1967. – № 1. – S. 14–17.

157. Попов И.Н. О принципах выполнения защиты от замыканий на землю с импульсным реле направления мощности / И.Н. Попов // *Электричество*. – 1962. – № 2. – С. 14-19.

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

159. Попов, И.Н. Импульсная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС / И.Н. Попов, Г.В. Соколова, В.И. Махнев // *Электрические станции*. –1978. – № 4. – С. 69–73.

160. Соколова, Г.В. Защита от замыканий на землю ИЗС / Г.В. Соколова // *Электрические станции*. – 1984. – № 1. – С. 59–62.

161. Лачугин В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Лачугин Владимир Фёдорович. – Иваново, ИГЭУ, 2016. – 437 с.

162. Лачугин, В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю / В.Ф. Лачугин // *«Энергетик»*. – 1997. № 9. – С. 21.

163. Лачугин В.Ф. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных сетей с компенсированной нейтралью / В.Ф. Лачугин // *Электрические станции*. – 2005. – № 8. – С. 58 – 63.

164. Лачугин В.Ф. Опыт разработки импульсных защит от замыканий на землю / В.Ф. Лачугин // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 77–79.

165. Устройство направленной волновой защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ типа УЗС-01. – Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Казань: Энергосоюз. – 1998. – 12 с.

166. Дроздов А.И. Централизованное направленное устройство сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов / А.И. Дроздов, А.В. Гусенков, В.А. Шуин // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 53 – 57.

167. Гусенков А.В. Устройства сигнализации и защиты от однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях / А.В. Гусенков, А.Ю. Мурзин, В.А. Шуин и др. // Энергетическое строительство. – 1993. – № 10. – С. 35– 39.

168. Гусенков А.В. Устройство типа «Спектр» для селективной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6 - 10 кВ / А.В. Гусенков, А.Ю. Мурзин, В.А. Шуин // Тр. ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново. – 1997. – С. 200 – 203.

169. Гусенков А.В. Режимы заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, основанные на использовании переходных процессов, в электрических сетях 6-10 кВ / А.В. Гусенков, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. – 2001. – № 1. – С. 32– 41.

170. Бухтояров, В.Ф. Централизованное устройство селективной сигнализации замыканий на землю типа СЗВИ / В.Ф. Бухтояров, В.Е. Поляков, А.Н. Зырянов // Электрические станции. – 1968. – № 11. – С. 78–80.

171. Шуляк, В.Г. Исследование релейных защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.14.06 / Шуляк Виктор Григорьевич. – Новочеркасск: Новочеркасск. политехн. ин-т, 1968. – 22 с.

172. Микропроцессорная селективная защита от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ «ИЗН-01». – [Электронный ресурс] // URL: <http://www.ic-bresler.ru>.

173. Иванов С.В. Новое микропроцессорное устройство для воздушных и кабельных линий 6 – 35 кВ / В.Ф. Лачугин, С.В. Иванов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2011. – № 6. – С. 150–151.

174. Дударев, Л.Е. Комплексная защита от замыканий на землю / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электрические станции. – 1981. – № 7. – С. 59–61.

175. Дударев, Л.Е. Устройство универсальной комплексной защиты от замыканий на землю для сетей 6–35 кВ / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Промышленная энергетика. – 1982. – № 4. – С. 36–38.

176. Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю / А.А. Белянин, С.В. Иванов, В.Ф. Лачугин В.Ф. // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 3. – С. 44–50.

177. Белянин, А. А. Селективная защита от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ – Опыт внедрения / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Оперативное управление в электроэнергетике. – 2014. – № 5. – С. 49–53.

178. Dobryagina O.A. Selective complex single-phase earth fault protection for distribution medium-voltage networks / O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin T.Yu. Vinokurova // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit. – Dortmund. – 2015. – P01.6.

179. Винокурова, Т.Ю. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, Г.А. Филатова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин, С.Н. Пашковский // Сборник докладов 5-й международной научно-технической конференции "Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cigre.ru/activity/conference/relayprotect5/participants/materials/> (Дата обращения: 04.04.15).

180. Винокурова, Т.Ю. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, Г.А. Филатова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин, С.Н. Пашковский // Релейщик, 2015. Москва: Вся энергетика. Вып. 2. – М.: Вся энергетика. – 2015. – С. 23–29.

181. Лямец Ю.Я. Алгоритмические модели электрических систем / Ю.Я. Лямец, Г.С. Нудельман, А.О. Павлов // Труды АЭН ЧР. – 1999. – № 1-2. – С. 10–21.

182. Бычков Ю.В. Алгоритмические модели в релейной защите / Ю.В. Бычков, Д.С. Васильев, А.О. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26–31.

183. Лямец Ю.Я. Диагностика линий электропередачи / Ю.Я. Лямец и др. // Электротехн. микропроц. устр. и сист. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 1992. – С. 9–32.

184. Борухман В.А. Устройства для определения мест повреждения на воздушных линиях электропередачи 6-750 кВ / А.П. Кузнецов, А.А. Кудрявцев, В.А. Борухман. – М.: Энергия, 1980. – 104 с.

185. Куликов А. Л. Определение мест повреждений ЛЭП 6-35 кВ методами активного зондирования / А.Л. Куликов, М.Ш. Мисриханов, А.А. Петрухин. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 161 с.

186. Пашковский С.Н. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в электрических сетях с комбинированным заземлением нейтрали: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Пашковский Сергей Николаевич. – Новосибирск, НГТУ, 2010. – 208 с.

187. Патент на изобретение № 2532760 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи / Куликов А.Л. – Приоритет изобретения от 05.04.2013 г.

188. Патент на изобретение № 2521790 Российская Федерация, МПК G01R31/00. Способ определения места повреждения разветвленной линии элек-

тропередачи / Куликов А.Л, Петрухин А.А. – Приоритет изобретения от 29.01.2013 г.

189. He Z. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points / Z. He, X. Jiang, Y.Liu, G. Sheng // Prz. elektrotechn. – 2012. – Vol.88. – № 3а. – С. 254–258.

190. Чекарьков Д.М. Повышение эффективности методов определения мест повреждения в сетях с изолированной нейтралью: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Чекарьков Дмитрий Михайлович. – Москва, Моск. энерг. ин-т, 1989. – 290 с.

191. Патент на изобретение № 2372624 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю в разветвленной воздушной линии электропередач, способ определения места междуфазного короткого замыкания в разветвленной воздушной линии электропередач и устройство контроля тока и напряжения для их осуществления / Хузяшев Р.Г., Кузьмин И.Л. – Приоритет изобретения от 12.03.2008 г.

192. Патент на изобретение № 2293342 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения места и расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью / Фастунов В.А. – Приоритет изобретения от 22.04.2005 г.

193. Патент на изобретение № 2258233 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в электрической сети / Левченко И.И., Засыпкин А.С., Сацук Е.И. (RU), Шовкопляс С.С. (RU) – 31.12.2003 г.

194. Патент на изобретение № 2096795 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Устройство для определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в сетях 6 - 35 кВ электрических систем с изолированной или компенсированной нейтралью (варианты) / Пупынин В.Н.; Нгуен В.Х. – Приоритет изобретения от 20.11.1997 г.

195. Патент на изобретение № 2446533 Российская Федерация, МПК H02H3/16, G01R31/08. Способ определения места однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью /Мустафин Р.Г. – Приоритет изобретения от 27.03.2012 г.

196. Винокурова, Т.Ю. Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 31–38.

197. Вайнштейн, В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю / В.Л. Вайнштейн // Промышленная энергетика. – № 1. – 1986. – С. 39–40.

198. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.

199. Качесов В.Е. Метод определения зоны однофазного замыкания в распределительных сетях под рабочим напряжением / В.Е. Качесов // Электричество. – 2005. – №6. – С. 9–18.

200. Качесов В.Е. Распознавание однофазных замыканий на землю в распределительных сетях / В.Е. Качесов, Л.В. Квривишвили // Электричество. – 2010. – № 12. – С. 8–18.

201. Шалин А.И. Определение места замыкания на землю на воздушных линиях 6-35 кВ / А.И. Шалин и др. // Новости Электротехники. – 2005. – № 1 (31). – С. 73–75.

202. Майборода В.Н. Внедрение устройств полного подавления дуговых замыканий на землю в сети 6 кВ Тюменской ТЭЦ-1 на основе резонансного заземления нейтрали / В.Н. Майборода, В.К. Обабков // УралВНИПИЭНЕРГОПРОМ, г. Екатеринбург, Россия, ООО ВП "Наука, техника, бизнес в энергетике", 2003. — С. 28–37.

203. Патент на изобретение № 2033622 (РФ). Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием ее моделей /

Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. – Приоритет изобретения от 03.05.1989 г.

204. Патент на изобретение № 2033623 (РФ). Способ определения места и характера повреждения в электрической системе с использованием моделей входящих в нее линий электропередачи / Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Нудельман Г.С. – Приоритет изобретения от 05.12.1989 г.

205. Пат. на изобретение 2542745 РФ, МПК H02H3/40, G01R31/08. Способ определения места однофазного замыкания фидера на землю / Лямец Ю. Я., Белянин А. А.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013142540/07; заявл. 17.09.2013; опубл. 27.02.2015, Бюл. № 6. – 11 с.

206. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.

207. Черных И.В. Simulink инструмент моделирования динамических систем / Черных И.В. – 2008. – 252 с.

208. Обалин М.Д. Применение имитационного моделирования для адаптации алгоритмов определения места повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Обалин Михаил Дмитриевич. – Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 181 с.

209. Сирота И.М. Переходные процессы при замыканиях на землю в компенсированной сети при замыкании фазы на землю. Вопросы устойчивости и автоматики энергетических систем / И.Н. Сирота. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – С. 55–76.

210. Масляник В.В. Свободные костные токи замыкания на землю в сетях малыми токами замыкания на землю / В.В. Масляник, И.М. Сирота // Электричество. – 1977. - № 3. – С. 38–43.

211. Цапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ / Е.Ф. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.

212. Дударев Л.Е. Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6-35 кВ и использование их для средств релейной

защиты / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электрические станции. – 1978. - № 6. – С. 68–71.

213. Шуляк В.Г. Переходные процессы в сетях с изолированной нейтралью при замыкании на землю / В.Г. Шуляк // Известия вузов. Энергетика. – 1969. – № 1. – С. 1–6.

214. Шуин В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин // Электричество. – 1991, № 10. – С. 58-61.

215. Добрягина О.А. О выборе схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / О.А. Добрягина, Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Межд. науч.-техн. конф. СИГРЭ, Екатеринбург, 3-7 июня 2013 г.

216. Шуин В.А. Защита от замыкания на землю компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ с использованием принципа сравнения амплитуд переходных токов в присоединениях: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шуин Владимир Александрович. – Москва, МЭИ. – 1974. – 300 с.

217. РД 153-34.0-15.501-00: Метод, указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Ч. 2. Анализ качества электрической энергии. – Москва, 2009.

218. Лымарь О.В. Исследование частотных свойств трансформаторов напряжения НОМ-6 / О.В. Лымарь, О.Г. Широков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, 2009, № 2. – С. 98–104.

219. Смирнов А.Н. Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110-220 кВ: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Смирнов Александр Николаевич. – Иваново, ИГЭУ, 2016. – 158 с.

220. Дехтерев А. Кабельные трансформаторы тока. Способы улучшения характеристик / А. Дехтерев, А. Шалин // Новости Электротехники [Электронный ресурс]. – № 6 (48). – 2008. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/48/09.php> (Дата обращения: 12.04.2017).

221. Шуин В.А. Влияние разряда емкости поврежденной фазы на переходный процесс при замыканиях на землю в кабельных сетях 3-10 кВ / В.А, Шуин // Электричество, 1981. – С. 4–9.

222. Cundeva S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis / S. Cundeva // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2008. – Vol. 5, No. 1. – Pp. 21–30.

223. Atherton D. L. Theory of Ferromagnetic Hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61. – P. 48–60.

224. Devine M. K. Numerical Determination of Hysteresis Parameters for Modeling of Magnetic Properties using The Theory of Ferromagnetic Hysteresis / M.K. Devine, D.C. Jiles, J.B. Thoeke // IEEE Transactions on Magnetics. – 1992. – Vol. 28, No. 1. – P. 27–34.

225. Володин В. Я. Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи Spice-симулятора LTspice/SwCADIII/ В.Я. Володин // Компоненты и технологии. – 2008. – № 4. – С 175–182.

226. Chan J.H. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation / J.H. Chan, A. Vladimirescu // IEEE Transactions on Computer-Aided Design –1991. – Vol. 10 №4 – P. 476-482.

227. Афанасьев В.В. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.

228. Казанский В.Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты / В.Е. Казанский. – М.: Энергия, 1969. – 183 с.

229. Подгорный Э. В. О выборе расчетной характеристики трансформаторов тока в переходных режимах / Э.В. Подгорный, С.Д. Хлебников // Электричество. – 1966. – № 9. – С. 87–90.

230. Дроздов А.Д. Исследование формы вторичного тока защитных трансформаторов тока в переходных и установившихся режимах / А.Д. Дроздов, С.Л. Кужеков // Электричество. – 1971. – № 1. – С. 27–31.

231. Королев Е.П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е.П. Королев, Э.М. Либерзон. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.
232. Сирота И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности / И.М. Сирота. – Киев: Наукова Думка, 1993. – 267 с.
233. Кадочников А.И. Динамические петли магнитного гистерезиса / А.И. Кадочников. – Екатеринбург, 2007. – 268 с.
234. Бутырин П.А. Автоматизация физических исследований и эксперимента: компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7 Express / П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская, В.В. Каратаев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 264 с.
235. Дроздов А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А.Д. Дроздов. – М.: Энергия, 1965. – 240 с.
236. Гонсалес-Гарсия К. Модель трансформатора в широком частотном диапазоне для силовой электроники (перевод) / К. Гонсалес-Гарсия, Х. Плейт // Компоненты и технологии. – 2013. – № 12. – С. 102–108.
237. Воробьева, Е.А. Эквивалентирование схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при замыканиях на землю / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Десятая международная молодежная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: материалы конференции. В 7 т. Т.3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2015. – С. 112–114.
238. Р. Рюденберг. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг. – М.: Издательство иностранной литературы, 1955. – 716 с.
239. Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги / А.И. Ширковец // Релейная защита. – 2011. – №4. – С. 14–19.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ООО НПО «ЦИТ»



Лебедев Владимир Дмитриевич

Лебедев В.Д.

» марта 2017 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Филатовой Г.А.
 «Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места
 однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам
 переходного процесса»

Настоящим актом подтверждается внедрение в научно-исследовательскую деятельность ООО НПО "ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ" результатов диссертационной работы Филатовой Г.А., а именно математических моделей первичных преобразователей тока и напряжения (трансформаторов тока нулевой последовательности и трансформаторов напряжения контроля изоляции), а также результатов экспериментальных исследований работы указанных датчиков в переходных режимах.

Руководитель научно-исследовательского отдела, к.т.н. А.А. Яблоков

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
_____ А.В. Гусенков

«29» мая 2017 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры «Автоматическое управление
электроэнергетическими системами» Филатовой Г.А.

Настоящим актом подтверждается, что результаты кандидатской диссертационной работы Филатовой Галины Андреевны на тему: «Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6-10 кВ по параметрам переходного процесса», используются на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» в учебном процессе подготовки магистрантов по профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» направления 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника. Разработанные математические модели датчиков тока и напряжения, а также имитационные модели кабельных сетей 6-10 кВ используются при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплине «Моделирование объектов электроэнергетики и устройств автоматического управления».

Декан электроэнергетического
факультета, к.т.н., доц.

Сорокин А.Ф.

Заведующий кафедрой АУЭС,
к.т.н., доц.

Лебедев В.Д.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТТНП РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Таблица В.1 – Технические характеристики ТЗЛМ

Номинальное напряжение, кВ / номинальная частота, Гц	0,66 / 50
Испытательное одномоментное напряжение, кВ	3
Коэффициент трансформации	25/1
Односекундный ток термической стойкости вторичной обмотки, А	140

Таблица В.2 – Параметры ТЗЛМ

Тип стали магнитопровода	Длина средней силовой линии L, см	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	Число витков вторичной обмотки
3411	33,9	7,2	25



Рисунок В.1 – Внешний вид трансформатора тока типа ТЗЛМ

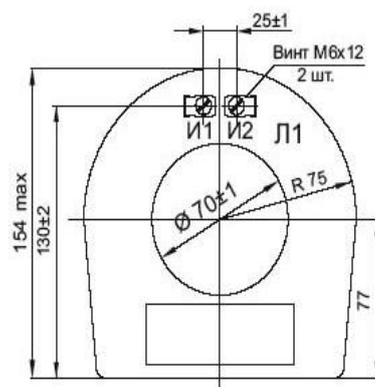


Рисунок В.2 – Габаритные размеры трансформатора тока типа ТЗЛМ

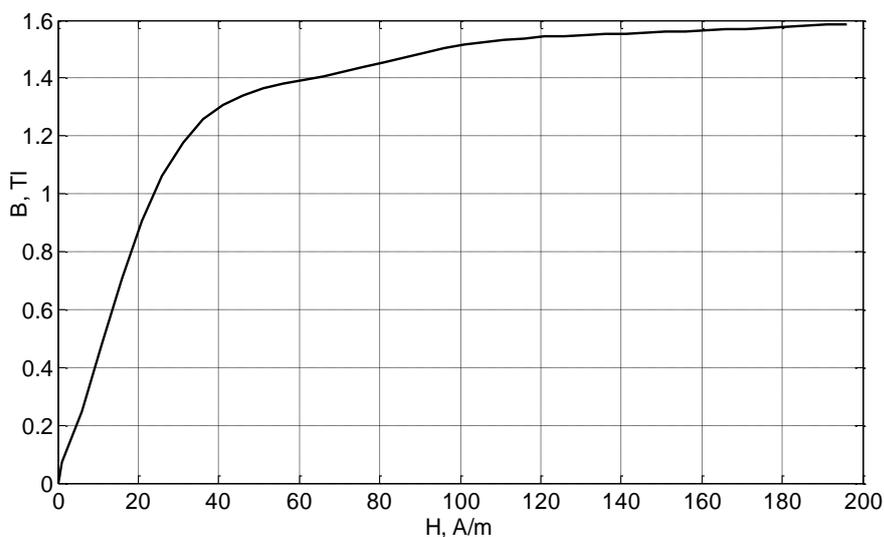


Рисунок В.3 – Экспериментально снятая основная кривая намагничивания ТЗЛМ

При построении математических моделей потери в стали сердечника на гистерезис и вихревые токи приближенно учитывались постоянным активным сопротивлением, подключенным параллельно ветви намагничивания. Величина сопротивления определялась по формуле [235]:

$$r = 12\rho \frac{S^2 \omega^2}{d^2 V}, \quad (\text{В. 1})$$

где ρ – удельное сопротивление материала листа, Ом·м;

d – толщина листа, м;

V – объем сердечника, м³.

$$V = 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,339 = 2,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$r = 12 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \frac{(7,2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 25^2}{(0,35 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2,44 \cdot 10^{-4}} = 52,03 \text{ Ом}.$$

Также потери в стали можно оценить по величине удельных потерь. По [235] удельные магнитные потери в стали 3411 (толщина листа 0,35 мм) на частоте 50 Гц при индукции 1,5 Тл не более 1,75 Вт / кг. Учитывая, что

$$P = \frac{U^2}{r}, \quad r = \frac{U^2}{P}.$$

Примерная масса стали сердечника трансформатора типа ТЗЛМ (при общей массе до 3,3 кг):

$$m_{\text{серд}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{серд}} = 7650 \cdot 2,44 \cdot 10^{-4} = 1,9 \text{ кг}.$$

Т.к. согласно ОКН (рисунок В. 3) индукции 1,5 Тл соответствует вторичное напряжение 8 В (в режиме холостого хода)

$$r = \frac{8^2}{1,75 \cdot 1,9} = 19,24 \text{ Ом}.$$

Как было отмечено выше, величину активного сопротивления может быть определена по площади петель гистерезиса. Для начального участка ОКН оно составляет 18-20 Ом

Для трансформатора тока типа ТЗЛМ активное сопротивление потерь в последующих математических моделях принято равным 20 Ом.

Были сняты аналогичные характеристики для ТТНП других типов.

Таблица В. 3 – Технические характеристики ТЗЛ – 1 1 05.1

Номинальное напряжение, кВ / номинальная частота, Гц	0,66 / 50
Испытательное одноминутное напряжение, кВ	3
Коэффициент трансформации	25/1
Односекундный ток термической стойкости вторичной обмотки, А	140

Таблица В.4 – Параметры ТЗЛ – 1 1 05.1

Тип стали магнитопровода	Длина средней силовой линии L, см	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	Число витков вторичной обмотки
3408	35,33	6,65	25



Рисунок В. 4 – Внешний вид трансформатора тока типа ТЗЛ

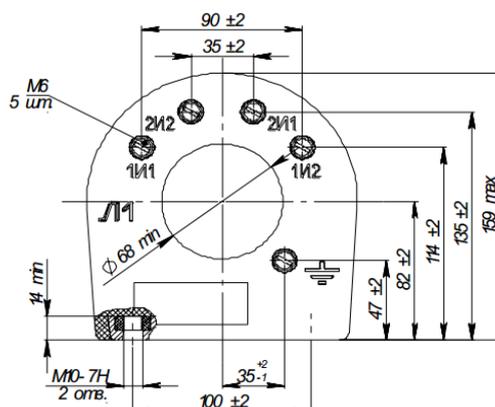


Рисунок В. 5 – Габаритные размеры трансформатора тока типа ТЗЛ

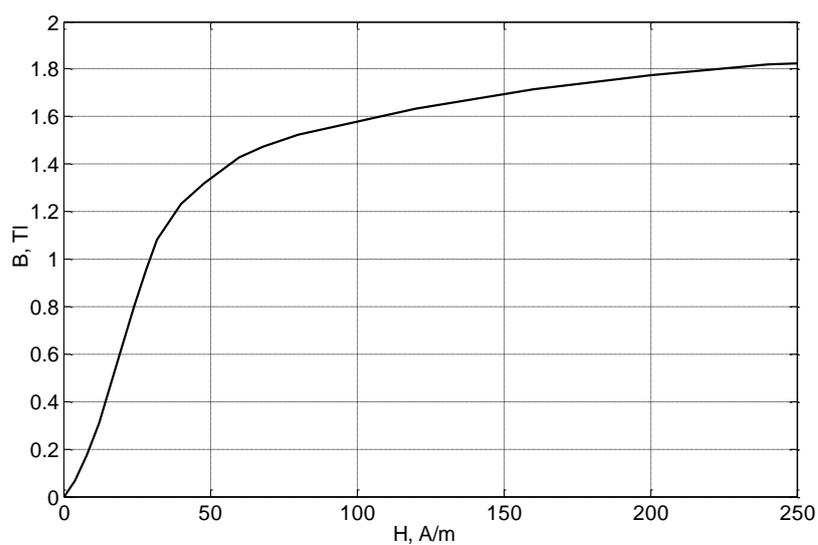


Рисунок В.6 – Экспериментально снятая основная кривая намагничивания ТЗЛ

Аналогично ТТНП типа ТЗЛМ для построения математических моделей было определено активное сопротивление ветви намагничивания. По (В.1)

$$V = 6,65 \cdot 10^{-4} \cdot 0,3533 = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$r = 12 \cdot 0,45 \cdot 10^{-6} \frac{(6,65 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 25^2}{(0,35 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 51,85 \text{ Ом.}$$

Также потери в стали можно оценить по величине удельных потерь. По [235] удельные магнитные потери в стали 3408 (толщина листа 0,35 мм) на частоте 50 Гц при индукции 1,7 Тл не более 1,3 Вт / кг.

Примерная масса стали сердечника трансформатора типа ТЗЛ (при общей массе до 3,3 кг):

$$m_{\text{серд}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{серд}} = 7650 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} = 1,78 \text{ кг.}$$

Т.к. согласно ОКН (рисунок В. 6) индукции 1,7 Тл соответствует вторичное напряжение примерно 6,7 В (в режиме холостого хода):

$$r = \frac{6,7^2}{1,3 \cdot 1,78} = 60,88 \text{ Ом.}$$

Величина активного сопротивления по площади петель гистерезиса для начального участка ОКН ТТНП типа ТЗЛ составляет 50 Ом.

Для трансформатора тока типа ТЗЛ активное сопротивление потерь в последующих математических моделях принято равным 50 Ом.

Таблица В.5 – Технические характеристики ТЗЛ-200

Номинальное напряжение, кВ	0,66
Номинальная частота, Гц	50
Испытательное одномоментное напряжение, кВ	3
Коэффициент трансформации	60/1
Односекундный ток термической стойкости вторичной обмотки, А	140

Таблица В.6 – Параметры ТЗЛ-200

Тип стали магнитопровода	Длина средней силовой линии L, см	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	Число витков вторичной обмотки
3408	81,64	5,415	60



Рисунок В.7 – Внешний вид трансформатора тока типа ТЗЛ-200

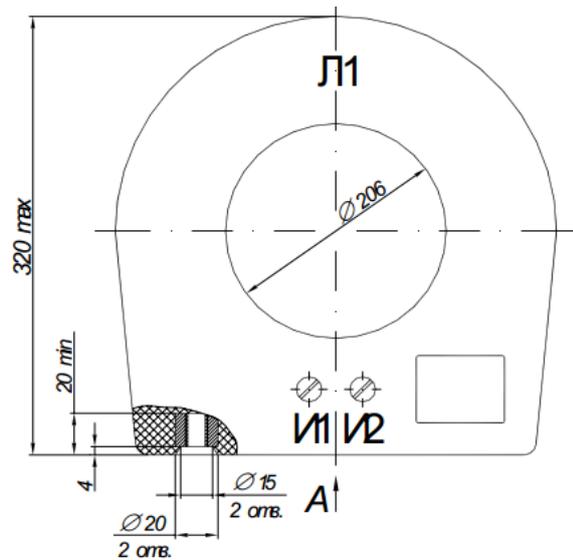


Рисунок В. 8 – Габаритные размеры трансформатора тока типа ТЗЛ-200

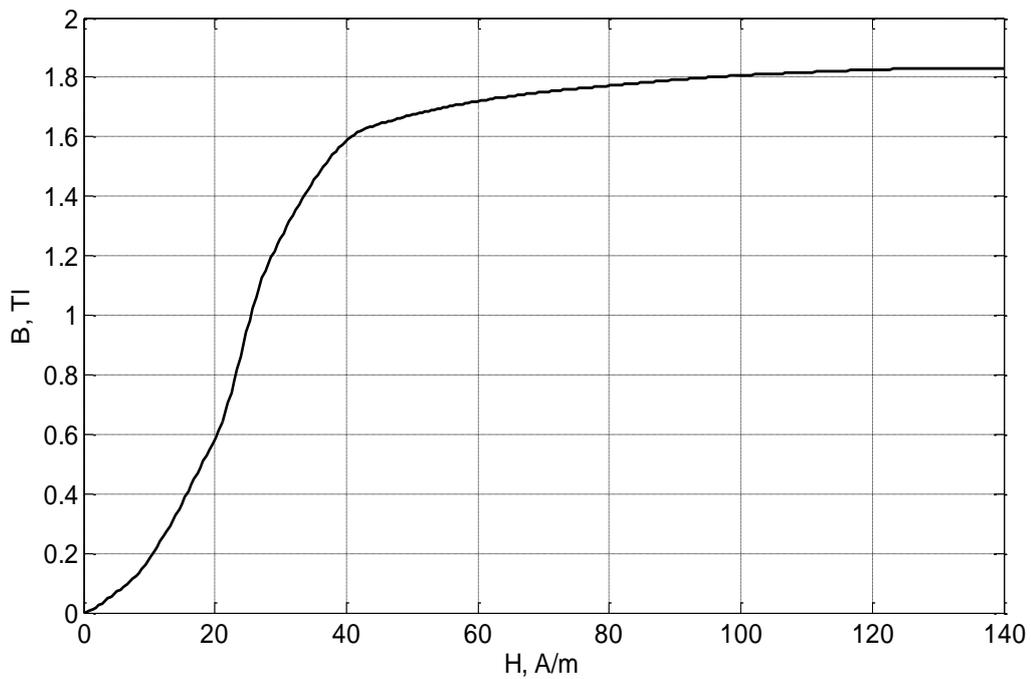


Рисунок В.9 – Экспериментально снятая основная кривая намагничивания ТЗЛ-200

Аналогично ТТНП типа ТЗЛМ для построения математических моделей было определено активное сопротивление ветви намагничивания. По (В.1)

$$V = 5,415 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8164 = 4,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$r = 12 \cdot 0,45 \cdot 10^{-6} \frac{(5,415 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 60^2}{(0,35 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4,42 \cdot 10^{-4}} = 105 \text{ Ом.}$$

Также потери в стали можно оценить по величине удельных потерь. По [235] удельные магнитные потери в стали 3408 (толщина листа 0,35 мм) на частоте 50 Гц при индукции 1,7 Тл не более 1,3 Вт / кг.

Примерная масса стали сердечника трансформатора типа ТЗЛ-200 (при общей массе до 9,8 кг):

$$m_{серд} = \rho_{ст} \cdot V_{серд} = 7650 \cdot 4,42 \cdot 10^{-4} = 3,38 \text{ кг.}$$

Т.к. согласно ОКН (рисунок В. 9) индукции 1,7 Тл соответствует вторичное напряжение примерно 14 В (в режиме холостого хода):

$$r = \frac{14^2}{1,3 \cdot 3,38} = 45 \text{ Ом.}$$

Величина активного сопротивления по площади петель гистерезиса для начального участка ОКН ТТНП типа ТЗЛ-200 составляет 50 Ом.

Для трансформатора тока типа ТЗЛ-200 активное сопротивление потерь в последующих математических моделях принято равным 50 Ом.

Таблица В. 7 – Технические характеристики ТЗЛМ-600

Номинальное напряжение, кВ	0,66
Номинальная частота, Гц	50
Испытательное одномоментное напряжение, кВ	3
Коэффициент трансформации (И1-И2)	460/1
Односекундный ток термической стойкости вторичной обмотки, А	20

Таблица В.8 – Параметры ТЗЛМ-600

Тип стали магнитопровода	Длина средней силовой линии L, см	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	Число витков вторичной обмотки
3408	196,25	2,375	460



Рисунок В. 10 – Внешний вид трансформатора тока типа ТЗЛМ-600

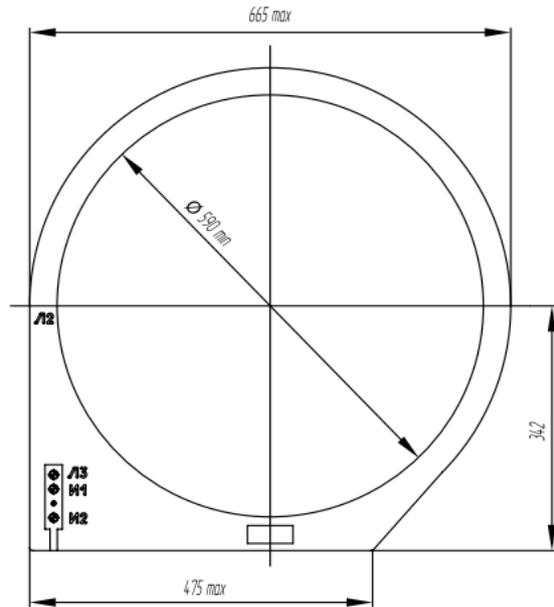


Рисунок В. 11 – Габаритные размеры трансформатора тока типа ТЗЛМ-600

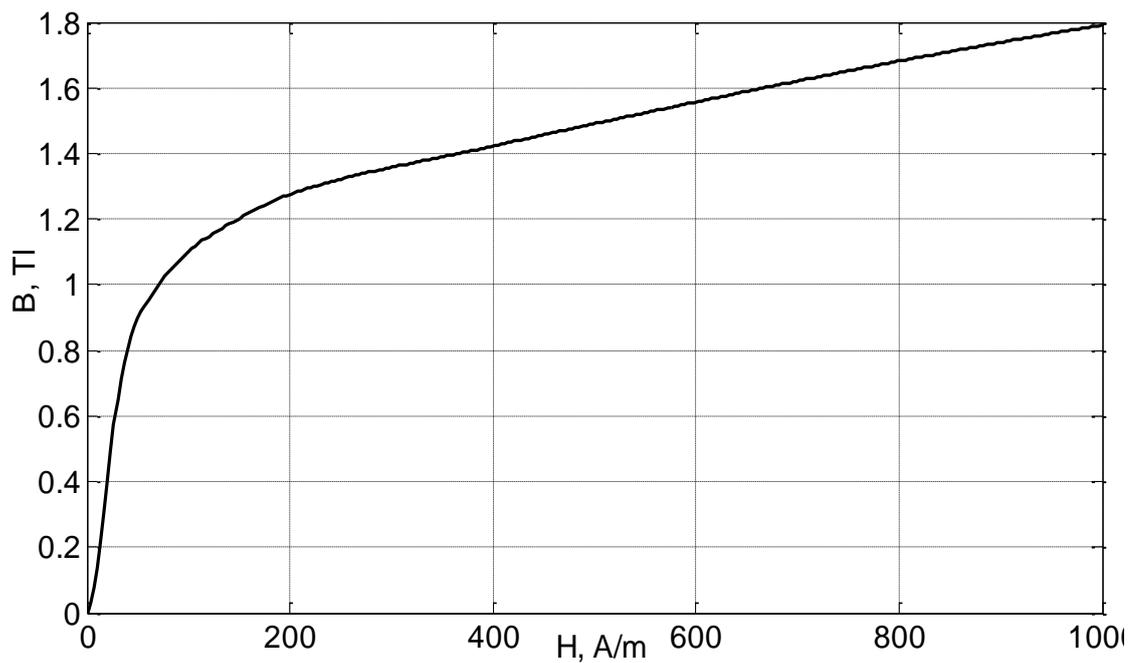


Рисунок В. 12 – Экспериментально снятая основная кривая намагничивания ТЗЛМ-600

Аналогично ТТНП типа ТЗЛМ для построения математических моделей было определено активное сопротивление ветви намагничивания. По (В.1)

$$V = 2,38 \cdot 10^{-4} \cdot 1,9625 = 4,67 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$r = 12 \cdot 0,45 \cdot 10^{-6} \frac{(2,38 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 460^2}{(0,35 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 4,67 \cdot 10^{-4}} = 1131 \text{ Ом.}$$

Также потери в стали можно оценить по величине удельных потерь. По [235] удельные магнитные потери в стали 3408 (толщина листа 0,35 мм) на частоте 50 Гц при индукции 1,7 Тл не более 1,3 Вт / кг.

Примерная масса стали сердечника трансформатора типа ТЗЛ-200 (при общей массе до 12 кг):

$$m_{\text{серд}} = \rho_{\text{ст}} \cdot V_{\text{серд}} = 7650 \cdot 4,67 \cdot 10^{-4} = 3,58 \text{ кг.}$$

Т.к. согласно ОКН (рисунок В. 9) индукции 1,7 Тл соответствует вторичное напряжение примерно 37 В (в режиме холостого хода):

$$r = \frac{37^2}{1,3 \cdot 3,58} = 294 \text{ Ом.}$$

Величина активного сопротивления по площади петель гистерезиса для начального участка ОКН ТТНП типа ТЗЛМ-600 составляет 200 Ом.

Для трансформатора тока типа ТЗЛМ-600 активное сопротивление потерь в последующих математических моделях принято равным 200 Ом.

Таблица В. 9 – Технические характеристики ТЗЛЭ-125

Номинальное напряжение, кВ	0,66
Номинальная частота, Гц	50
Испытательное одноминутное напряжение, кВ	3
Коэффициент трансформации	30/1
Односекундный ток термической стойкости вторичной обмотки, А	140

Таблица В. 10 – Параметры ТЗЛЭ-125

Тип стали магнитопровода	Длина средней силовой линии L, см	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	Число витков вторичной обмотки
3408	54,95	11,875	30

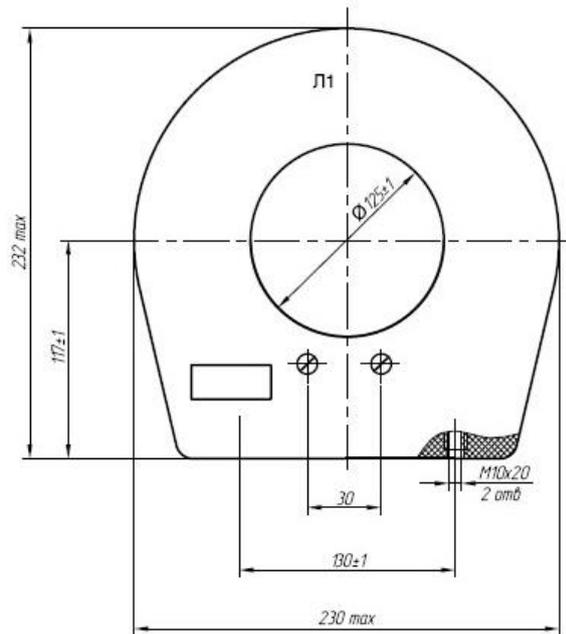


Рисунок В. 13 – Внешний вид трансформатора тока типа ТЗЛЭ-125

Рисунок В. 14 – Габаритные размеры трансформатора тока типа ТЗЛЭ-125

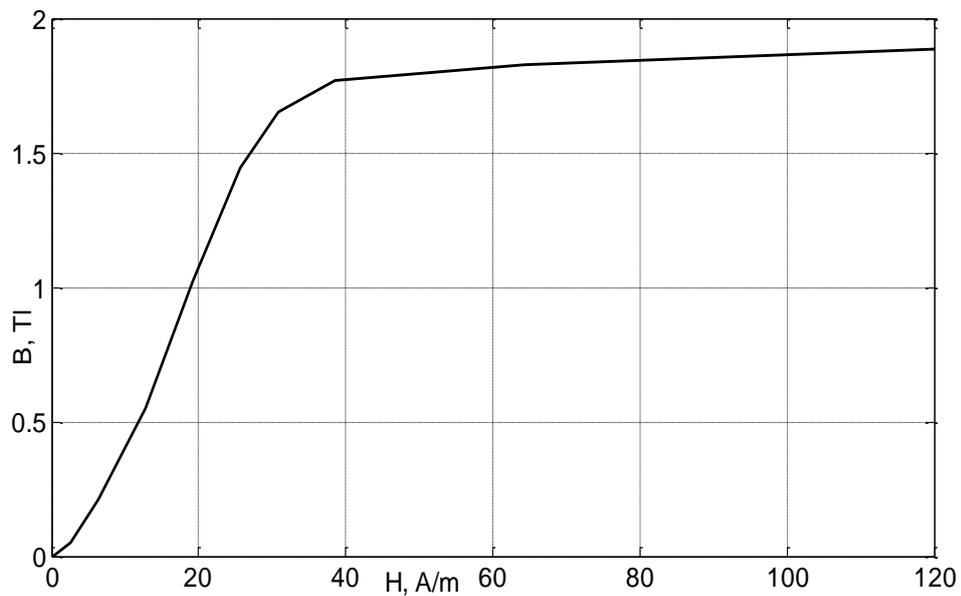


Рисунок В. 15 – Экспериментально снятая основная кривая намагничивания ТЗЛЭ-125

Аналогично ТТНП типа ТЗЛЭ-125 для построения математических моделей было определено активное сопротивление ветви намагничивания. По (В.1)

$$V = 11,875 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5495 = 6,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3;$$

$$r = 12 \cdot 0,45 \cdot 10^{-6} \frac{(11,875 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 30^2}{(0,35 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6,52 \cdot 10^{-4}} = 85,8 \text{ Ом.}$$

Также потери в стали можно оценить по величине удельных потерь. По [235] удельные магнитные потери в стали 3408 (толщина листа 0,35 мм) на частоте 50 Гц при индукции 1,7 Тл не более 1,3 Вт / кг.

Примерная масса стали сердечника трансформатора типа ТЗЛЭ-125 (при общей массе до 8,5 кг):

$$m_{серд} = \rho_{ст} \cdot V_{серд} = 7650 \cdot 6,52 \cdot 10^{-4} = 4,98 \text{ кг.}$$

Т.к. согласно ОКН (рисунок В. 15) индукции 1,7 Тл соответствует вторичное напряжение примерно 37 В (в режиме холостого хода):

$$r = \frac{15^2}{1,3 \cdot 4,98} = 35 \text{ Ом.}$$

Величина активного сопротивления по площади петель гистерезиса для начального участка ОКН ТТНП типа ТЗЛЭ-125 составляет 50 Ом.

Для трансформатора тока типа ТЗЛЭ-125 активное сопротивление потерь в последующих математических моделях принято равным 50 Ом.