

На правах рукописи



КУТУМОВ Юрий Дмитриевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ТОКОВ
ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ
6–10 кВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ НА ТОК ПОВРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Шуин Владимир Александрович**

Официальные оппоненты:

Лачугин Владимир Фёдорович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, АО «НТЦ ФСК ЕЭС», главный эксперт отдела разработки преобразовательной техники;

Лоскутов Антон Алексеевич, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск.

Защита состоится « 24 » июня 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен:

http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Kutumov_Yu.D._0.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время через электрические кабельные сети напряжением 6–10 кВ распределяется ~50% вырабатываемой в стране электроэнергии. Поэтому надежность электроснабжения потребителей в значительной мере определяется эксплуатационной надежностью распределительных кабельных сетей 6–10 кВ.

В кабельных сетях 6–10 кВ преобладающим видом повреждений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), составляющие 70–90% общего числа электрических повреждений и часто являющиеся первопричиной нарушений электроснабжения потребителей, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. В целях повышения надежности электроснабжения потребителей кабельные сети 6–10 кВ, как правило, работают с режимами заземления нейтрали, обеспечивающими малые токи ОЗЗ и возможность работы сети в течение достаточно длительного времени (как правило, до 2-х часов) с замыканием фазы на землю. К режимам заземления нейтрали, обеспечивающим возможность работы сети с замыканием фазы сети на землю, относятся прежде всего изолированная нейтраль (~80% кабельных сетей 6–10 кВ) и резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), называемое также компенсацией емкостных токов ОЗЗ (~20% кабельных сетей 6–10 кВ).

Основным недостатком кабельных сетей, работающих с изолированной нейтралью, является высокая вероятность возникновения дуговых перемежающихся ОЗЗ (ДПОЗЗ), сопровождающихся опасными перенапряжениями и значительным увеличением среднеквадратичного значения тока в месте повреждения. Большинство специалистов в области режимов заземления нейтрали, как в России, так и во многих других странах, рассматривает резонансное заземление нейтрали как наиболее эффективный и перспективный метод борьбы с указанными последствиями ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения. Тем не менее опыт эксплуатации показывает, что значительная часть компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ имеет показатели эффективности режима заземления нейтрали, характеризующиеся долей ОЗЗ перешедших в короткие замыкания (КЗ), сопоставимые или иногда даже худшие, чем для сетей с изолированной нейтралью. Основными причинами не всегда высокой эффективности работы компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ являются:

- большие значения остаточного тока в месте ОЗЗ, способствующие длительному горению заземляющей дуги, перегреву изоляции кабелей и увеличению вероятности переходов ОЗЗ в междуфазные КЗ;

- не всегда достаточное техническое совершенство методов и средств локации ОЗЗ, применяемых в настоящее время в компенсированных кабельных сетях.

Остаточный ток ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях в общем случае обусловлен некомпенсируемыми ДГР активной составляющей основной частоты, высшими гармониками, а также возможными в реальных условиях эксплуатации расстройками компенсации емкостной составляющей основной частоты. Практически до 2000-х годов было принято считать, что основной причиной снижения эффективности компенсации тока ОЗЗ является составляющая, обусловленная активными потерями в изоляции кабельных линий (КЛ) и ДГР, в среднем в кабельных сетях 6–10 кВ составляющие 5–7% от реактивных потерь в емкостях фаз на землю сети. В современных распределительных кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, систем электроснабжения крупных промышленных предприятий и городов, существенно большее влияние на величину остаточного тока ОЗЗ и,

соответственно, эффективность компенсации могут оказывать высшие гармоники (ВГ) тока ОЗЗ. По данным, полученным на основе экспериментальных измерений в действующих кабельных сетях 6–10 кВ, процентное содержание ВГ в токах ОЗЗ может достигать значений до 40% и более, а по оценкам на математических имитационных моделях – до ~50% от емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$. что в несколько раз больше относительного уровня активной составляющей. Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что для повышения эффективности функционирования кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с резонансно-заземленной нейтралью, актуальной проблемой является разработка и/или совершенствование методов полной компенсации тока ОЗЗ, включая не только емкостную и активную составляющих основной частоты, но и высших гармонических составляющих.

Повышение эффективности компенсации токов ОЗЗ и их составляющих в кабельных сетях 6–10 кВ связано также с необходимостью решения ряда взаимосвязанных с ней задач. Так, при полной компенсации ВГ в токе устойчивого ОЗЗ, потребуются новые методы решения проблемы селективной сигнализации ОЗЗ в сетях с резонансным заземлением нейтрали. Следует принять во внимание также факт, что в кабельных сетях 6–10 кВ, выполненных кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) и работающих с полной компенсацией тока ОЗЗ, практически все замыкания будут иметь характер кратковременных самоустраивающихся пробоев изоляции (КрОЗЗ). Это приведет к кумулятивному накоплению мест ослабленной изоляции и снижению надежности функционирования кабельных сетей. Поэтому полная компенсация тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ может быть эффективной только при одновременном решении проблемы локализации КрОЗЗ, включающей не только селективное определение поврежденного присоединения (селективная сигнализация КрОЗЗ), но и зоны повреждения (поврежденного участка КЛ) с использованием средств дистанционного определения места замыкания (ДМОЗЗ). Известно, что решение задачи локализации КрОЗЗ могут обеспечить только алгоритмы, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, возникающего при пробое изоляции фазы сети на землю.

Степень разработанности темы исследования. Выпускаемые в настоящее время предприятиями и фирмами России и других стран исполнения ДГР и автоматических регуляторов обеспечивают эффективное решение проблемы компенсации емкостной составляющей основной частоты тока ОЗЗ (КЕС). В России разработаны также автоматические двухканальные регуляторы, позволяющие получить достаточно эффективное решение проблемы компенсации как емкостной, так и активной составляющих основной частоты тока ОЗЗ (КЕС и КАС), обеспечивающих при резонансной настройке ДГР подавление дуговых замыканий. Большой вклад в развитие методов КЕС и КАС внесли советские и российские ученые Трухан А.П., Степанчук Д.Н., Петров О.А., Ершов А.М., Обабков В.К., Миронов И.А., Козлов В.Н., Булычев А.В. и др.

Исследования и разработки методов компенсации высших гармонических составляющих и полной компенсации тока ОЗЗ получили активное развитие в России и других странах только в последние годы. Большая часть указанных исследований связана с разработкой технических решений, обеспечивающих компенсацию ВГ или полную компенсацию тока ОЗЗ, как правило, с применением активных методов (вспомогательного источника тока или напряжения). Однако до сих пор не решены важные задачи, связанные с оценками влияния ВГ на эффективность компенсации тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

Автор выражает благодарность д.т.н., проф. Мизонову В.Е. и к.т.н., доц. Шадриковой Т.Ю. за научные консультации по вопросам диссертационных исследований.

Целью работы является исследование и разработка методов повышения эффективности компенсации токов ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ в условиях влияния на ток замыкания высших гармонических составляющих.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решается комплекс **задач**, включающий:

- аналитический обзор методов и устройств компенсации токов ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ;
- исследование влияния высших гармоник тока ОЗЗ на условия гашения и повторного зажигания заземляющих дуг в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ;
- исследование электротепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП 6–10 кВ при наличии в токе замыкания на землю высших гармонических составляющих;
- исследование условий полной компенсации ОЗЗ и разработка методов повышения ее эффективности;
- исследование особенностей использования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с компенсацией высших гармоник, для селективной сигнализации КрОЗЗ и дистанционного определения зоны повреждения на кабельных ЛЭП.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы». *В части формулы специальности:* «... В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии ...». Результаты теоретических исследований и исследований на имитационных математических моделях позволяют увеличить эффективность компенсации тока ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ и на этой основе повысить надежность электроснабжения потребителей.

В части области исследования:

- п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствует разработка комплекса имитационных моделей для решения задач, связанных с исследованиями влияния ВГ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и электротепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ токами высших гармоник при различных видах замыканий на землю;
- п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработки нового способа автоматической компенсации составляющих переходного процесса при ОЗЗ и усовершенствованных алгоритмов локации ОЗЗ на кабельных ЛЭП в сетях, работающих с полной компенсацией тока замыкания на землю.

Научную новизну работы представляют:

1. Результаты исследований на имитационных моделях ОЗЗ через перемежающуюся дугу в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, позволяющие оценить степень влияния высших гармоник в токе замыкания на кратность дуговых перенапряжений на неповрежденных фазах и действующее значение тока в месте повреждения.

2. Комплекс имитационных моделей для решения взаимосвязанных задач, возникающих при исследовании процессов нагрева кабельных ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией, проложенных в грунте, токами высших гармоник при различных видах ОЗЗ (устойчивых и дуговых перемежающихся) в компенсированных сетях 6–10 кВ, включающий модель на ос-

нове цепи Маркова, модель на основе электротепловой схемы замещения и модели в программных комплексах COMSOL Multiphysics и PSCAD.

3. Результаты исследований на имитационных моделях электротепловых процессов нагрева кабельных ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией при различных видах ОЗЗ, позволяющие определить опасный уровень высших гармоник в токе замыкания на землю, время нагрева кабелей до критической по условиям термической стойкости междуфазной изоляции температуры и обосновать необходимость и область применения компенсации высших гармоник в кабельных сетях 6–10 кВ.

4. Математическое описание условий полной компенсации тока ОЗЗ, включая высшие гармонические составляющие, и подавления дуговых замыкания на землю с применением вспомогательного источника тока, подключенного к нейтрали сети, в кабельных сетях 6–10 кВ.

5. Способ компенсации переходных токов ОЗЗ, обеспечивающий уменьшение в несколько раз действующего значения тока в месте повреждения и ограничение перенапряжения при замыканиях через перемежающуюся дугу в кабельных сетях 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР.

6. Результаты исследований существующих различных подходов к определению параметров аналитических и имитационных моделей кабельных ЛЭП среднего напряжения при расчетах переходных процессов при ОЗЗ, позволяющие определить область их применения и повысить точность расчетов параметров переходных токов и напряжений.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующими положениями:

– **сформулированы** основные задачи, решение которых обеспечивает повышение эффективности компенсации тока ОЗЗ и его составляющих в кабельных сетях 6–10 кВ;

– **изучено** влияние высших гармоник в токе ОЗЗ на кратности перенапряжений и действующее значение тока в месте повреждения при замыканиях на землю через перемежающуюся дугу и нагрев изоляции кабельных ЛЭП при устойчивых и дуговых замыканиях;

– **доказано**, что вследствие развития технологий в промышленности, транспортных системах, коммунально-бытовом хозяйстве крупных городов и других отраслях народного хозяйства, характеризующегося значительным увеличением доли нелинейных потребителей в составе комплексной нагрузки центров питания распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, высшие гармоники в токе ОЗЗ оказывают существенно большее влияние на эффективность компенсации, чем активная составляющая основной частоты;

– **обоснованы** расчетные условия при исследованиях процессов нагрева кабельных ЛЭП токами высших гармоник в остаточном токе замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, включающие разновидности учитываемых ОЗЗ, способ прокладки кабеля, теплофизические характеристики грунта, параметры кабельной сети и ЛЭП; критерии устойчивого горения заземляющей дуги в месте повреждения и перехода замыкания на землю в междуфазное КЗ, основанные на оценке температуры в канале пробоя;

– **изложены** математические условия компенсации всех составляющих тока ОЗЗ как в установившемся, так и в переходном режимах, и условия подавления дуговых замыканий после гашения заземляющей дуги при применении вспомогательного источника тока, подключенного к нейтрали сети;

– **установлена** возможность компенсации составляющих переходного тока ОЗЗ с применением импульсного источника тока, подключенного к нейтрали сети;

– **обоснована** необходимость применения частотно-зависимых моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ для обеспечения достоверности и требуемой для решения задачи ДОМЗЗ точности результатов расчетов параметров переходных токов и напряжений;

– **предложены** способ компенсации переходного тока ОЗЗ, обеспечивающий уменьшение действующего значения тока в месте повреждения и ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ; модификация способа ДОМЗЗ, основанного на измерении параметров переходного напряжения поврежденной фазы, обеспечивающая повышение точности определения место повреждения на кабельной ЛЭП.

Практическую значимость имеют следующие **результаты** работы:

– обоснование уровня высших гармоник в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, при котором по условия нагрева кабелей требуется их компенсация – порядка 20–25 А и более;

– принципы построения и методика применения комплекса математических моделей для исследования процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ при ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, которые могут быть использован для исследования электротепловых процессов при замыканиях на землю в кабельных линиях другого типа (например, с изоляцией из сшитого полиэтилена), другого класса напряжения или в сетях с другими режимами заземления нейтрали;

– результаты исследований на имитационных моделях разработанных в России способа полной компенсации тока ОЗЗ и подавления дуговых замыканий (ООО ВП «НТБЭ») и системы управляемого заземления нейтрали для полной компенсации тока замыкания на землю ООО НПП «Бреслер»), позволяющие оценить их основные достоинства и недостатки и перспективы широкого внедрения в кабельных сетях 6–10 кВ;

– рекомендации по выбору параметров имитационных моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ для исследований переходных процессов при ОЗЗ, позволяющие повысить точность расчетов и исключить грубые ошибки при определении параметров переходных токов и напряжений;

– варианты модификации разработанной ИГЭУ и НПП «ЭКРА» универсальной (для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ) мультимодальной адмиттансной защиты для обеспечения возможности ее применения в сетях, работающих с полной компенсацией тока ОЗЗ.

Методы исследований. Учитывая особенности процессов в кабельных сетях 6–10 кВ при ОЗЗ различных типов, в работе в качестве основного метода исследования было использовано математическое моделирование с применением имитационных и аналитических моделей. Для решения ряда задач были применены также методы теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах.

Достоверность и обоснованность результатов определяются и подтверждаются:

– корректностью принятых допущений, использованием методов классической теории электрических цепей и теории электромагнитных переходных процессов;

– физической непротиворечивостью результатов исследований;

– сходимостью результатов, полученных с применением различных аналитических методов и на математических моделях, с результатами исследований других авторов, опубликованными в авторитетных источниках.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты аналитического обзора методов и устройств компенсации тока ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ, позволяющие оценить степень разработанности проблемы в России и обосновать направления их совершенствования;

– результаты исследований на имитационных моделях влияния высших гармоник тока ОЗЗ на условия гашения и повторного зажигания заземляющих дуг в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, определяющих кратности перенапряжений и действующее значение тока в месте повреждения при дуговом характере замыкания;

– комплекс имитационных моделей для решения взаимосвязанных задач, возникающих при исследовании процессов нагрева кабельных ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией, проложенных в грунте, токами высших гармоник при различных видах ОЗЗ.

– результаты исследований на имитационных моделях процессов нагрева кабельных ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией при различных видах ОЗЗ, позволившие определить опасный уровень высших гармоник в токе замыкания на землю и область применения их компенсации;

– математическое описание условий полной компенсации тока ОЗЗ, включая высшие гармонические составляющие, и подавления дуговых замыкания на землю с применением вспомогательного источника тока, подключенного к нейтрали сети, в кабельных сетях 6–10 кВ;

– способ компенсации переходных токов ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с нейтралью, заземленной через ДГР;

– результаты исследований и рекомендации по применению различных подходов к определению параметров аналитических и имитационных моделей кабельных ЛЭП среднего напряжения при расчетах переходных процессов при ОЗЗ;

– модификация способа ДОМЗЗ, основанного на измерении параметров переходного напряжения поврежденной фазы, повышающая точность определения места повреждения на кабельной ЛЭП.

Внедрение результатов работы. Рекомендации по расчёту продольных пассивных параметров кабельных ЛЭП напряжением 6–10 кВ для исследования переходных и установившихся режимов при ОЗЗ, а также результаты исследования динамической устойчивости функционирования существующих устройств релейной защиты от ОЗЗ на основе измерения параметров переходного процесса, представляющие собой одни из результатов выполнения научно-исследовательской работы по теме «Исследование повреждений кабельных линий 6–10 кВ с целью повышения надежности распределительных сетей в филиале ОАО «ИЭСК» «Южные электрические сети», были использованы в деятельности ООО «Центр инновационных технологий Иркутского государственного технического университета».

Положения диссертационной работы, имеющие теоретическую и практическую значимость, а также имитационные модели кабельных ЛЭП и кабельных сетей 6–10 кВ внедрены в учебном процессе на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ИГЭУ им. В.И. Ленина при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

На способ автоматической компенсации переходных токов однофазного замыкания на землю в сети с дугогасящим реактором в нейтрали была подана 09.03.2022 г. заявка на патент № 2022106342.

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в постановке цели и задач исследования, выполнении аналитического обзора известных методов и устройств автоматической компенсации ёмкостных токов основной частоты, способов компенсации активной составляющей тока ОЗЗ, методов и способов компенсации высших гармонических составляющих в токе устойчивого ОЗЗ, принципов выполнения и устройств защиты от ОЗЗ и методов ДОМЗЗ в компенсированных кабельных сетях, проведении исследований на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ влияния ВГ на усло-

вия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги при дуговых замыканиях, разработке имитационных моделей кабельных ЛЭП и проведении на них исследований процессов их нагрева при ОЗЗ различных видов, получении аналитических условий для решения отдельных задач исследования, разработке способов компенсации составляющих переходного процесса в токе ОЗЗ и усовершенствовании существующего способа ДОМЗЗ, подготовке научных публикаций и докладов по теме исследования.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях всероссийского и международного уровня: II, III и IV Международных молодежных научно-технических конференциях «Релейная защита и автоматика» (IEEE International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation) (НИУ МЭИ, Москва; 2019, 2020, 2021 гг.); XV Всероссийской (международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2020» (ИГЭУ им. В.И. Ленина, Иваново; 2020, 2022 г.); IEEE Power and Energy Student Summit (PESS-2020 и PESS-2021) (ФРГ – участие в режиме «онлайн»; 2020, 2021 гг.); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения), посвященной 140-летию изобретения сварки Н.Н. Бенардосом (ИГЭУ им. В. И. Ленина, Иваново, 2021 г.); VI научно-технической конференции молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021» (Чебоксары, 2021 г.).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 20 работах, из них 7 в изданиях по перечню ВАК, 4 статья, индексируемых в международной базе Scopus, а также 8 статья и тезисах докладов международных и всероссийских научно-технических конференций; 1 патенте РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по работе, списка литературы из 255 наименований и трёх приложений. Общий объём работы составляет 275 страниц, из них основной текст 271 страницы, содержащий 128 рисунков и 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** дан аналитический обзор методов и устройств компенсации ёмкостной составляющей основной частоты тока ОЗЗ (КЕС), компенсации активной составляющей тока ОЗЗ (КАС), а также методов и устройств компенсации высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ (КВГ) и опыта их эксплуатации и применения. Показано, что необходимость в применении КАС дополнительно к КЕС практически возникает только в кабельных сетях 6–10 кВ с большими значениями ёмкостного тока сети $I_{c\Sigma} > 150\text{--}200$ А, доля которых в общем числе кабельных сетей составляет в России около 5%. Основной причиной не всегда высокой эффективности КЕС в кабельных сетях 6–10 кВ с ёмкостными токами $I_{c\Sigma} < 100$ А даже при резонансной настройке ДГР являются ВГ, процентное содержание которых в токе замыкания на землю значительно возросло в связи с увеличением доли нелинейных потребителей в составе комплексной нагрузки центров питания распределительных кабельных сетей и может достигать значений до 45–50% от величины $I_{c\Sigma}$. На основе обзора дана общая оценка состояния проблемы компенсации составляющих основной частоты и высших гармоник в токе ОЗЗ и обосновано направление исследования, поставлены его задачи.

В **главе 2** на основе теорий дуговых прерывистых ОЗЗ, разработанных W. Petersen'ом, Беляковым Н.Н., с применением имитационной модели кабельной сети 6 кВ в программном

комплексе Matlab исследовано влияние ВГ на условия гашения и повторного зажигания заземляющей дуги как при резонансной настройке ДГР, так и при возможных в реальных условиях эксплуатации расстройках компенсации. Установлено, что наличие ВГ в токе ОЗЗ при уровне до 50% от $I_{сз}$ приводит к увеличению пика гашения напряжения на поврежденной фазе, определяющего максимальное значение дуговых перенапряжений, до ~20–22%, времени горения дуги на 1–3 полупериода колебаний переходного тока, кратности переходных перенапряжений на неповрежденных фазах до ~13–14%, амплитуды броска переходного тока и его среднеквадратичного значения до ~10%. Компенсация ВГ в токе ОЗЗ позволяет уменьшить указанное негативное влияние на эффективность резонансного заземления нейтрали сети. На основе анализа спектров токов ОЗЗ, полученных при экспериментальных измерениях в действующих сетях и исследованиях на имитационных моделях установлено, что основная часть энергии высших гармоник (до 90% и более) в токе устойчивого замыкания сосредоточена в диапазоне частот до ~1,5 кГц, поэтому компенсация только отдельных высших гармонических составляющих, как правило, не эффективна. При предельном для кабельных сетей 6–10 кВ уровне высших гармоник в токе устойчивого ОЗЗ до 50% от $I_{сз}$ мощность вспомогательного источника, необходимого для их компенсации, не превышает 5% от мощности ДГР, что существенно упрощает решение данной задачи.

Произведен анализ гармонического состава составляющих переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Показано, что основная часть энергии (95% и более) высших гармонических составляющих броска переходного тока ОЗЗ сосредоточена в более широком диапазоне частот (до ~5 кГц), чем при УОЗЗ (до ~1–1,5 кГц), а импульсная мощность броска переходного тока ОЗЗ может достигать значений порядка сотен киловольт-ампер. Таким образом, компенсация ВГ при бросках переходного тока ОЗЗ с точки зрения технической реализации в принципе возможна, но представляет собой более сложную задачу, чем компенсация ВГ в токе устойчивого замыкания на землю.

В **главе 3** исследованы процессы нагрева кабельных ЛЭП 6–10 кВ при наличии в токе замыкания на землю высших гармонических составляющих с целью определения опасного уровня высших гармоник в токе ОЗЗ и области применения их компенсации.

В **разделе 3.1** сформулированы расчетные условия, задачи и методы исследований процессов нагрева кабелей при ОЗЗ в компенсированных сетях 6–10 кВ. Расчетные условия включают расчетные виды ОЗЗ (устойчивое металлическое, устойчивое замыкание через переходное сопротивление; устойчивое дуговое; замыкание через перемежающуюся дугу); конструктивное исполнение и тип изоляции кабельной ЛЭП (трехфазный кабель с БПИ); способ прокладки кабеля (в грунте); теплофизические характеристики грунта и др.

В **разделах 3.2 и 3.3** для выбранного способа прокладки кабелей 6–10 кВ решены задачи, связанные с определением геометрических размеров расчетной области, которые обеспечивают корректный расчет процессов, связанных с нагревом кабельной ЛЭП токами ОЗЗ, и начальных тепловых условий (начального нагрева кабельной ЛЭП) до возникновения ОЗЗ при заданных граничных условиях (температуре грунта и токе нагрузки).

Для решения первой из указанных задач разработана численная имитационная модель на основе «цепей Маркова» (рис. 1), реализованная в программном комплексе Matlab. С увеличением мощности источника тепловой энергии (проводник поврежденной фазы или место повреждения при ОЗЗ) температура ячейки с кабелем существенно повышается. Критерием достаточных для обеспечения корректности расчетов тепловых процессов в кабеле и окружающем его грунте геометрических размеров расчетной области является практическое отсутствие повышения температуры самой глубокой ячейки цепи Маркова.

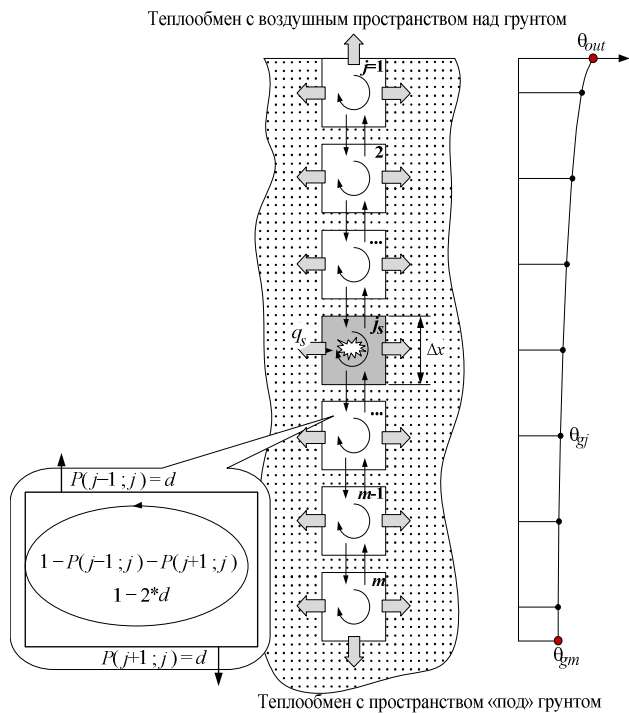


Рисунок 1. Исследуемая «цепь Маркова», моделирующая слой грунта и кабельную ЛЭП

В разделе 3.4 исследованы процессы нагрева кабельных ЛЭП токами высших гармоник при «металлическом» ОЗЗ с применением 2D-модели в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Применение 2D-модели обусловлено тем, что источником тепловой мощности при данном виде ОЗЗ являются активные потери в проводниках кабельной ЛЭП. При расчетах дополнительного нагрева кабеля в рассматриваемом режиме емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$ принимался равным от 50 А до 400 А, процентное содержание ВГ в токе УОЗЗ – 50% от $I_{c\Sigma}$, исследуемые сечения кабельной ЛЭП – 70 и 240 мм².

Установлено, что при даже при времени поиска и ликвидации повреждения в сети до 6 час температура поврежденной фазы кабельной ЛЭП не превышает максимально допустимой по условию термической стойкости бумажно-пропитанной изоляции (90–105°C). Нагрев кабельной ЛЭП, близкий к границе ее термической стойкости, может возникнуть в кабеле с сечением жил 70 мм² и менее при токе предшествующего режима, соответствующем длительно допустимой токовой нагрузке (180 А при прокладке в грунте), при больших значениях ёмкостного тока сети $I_{c\Sigma} = 300\text{--}400$ А и суммарной доле ВГ в токе ОЗЗ, соответствующей максимально возможным значениям (~50% от $I_{c\Sigma}$).

При других рассматриваемых в данной работе разновидностях ОЗЗ – дуговых и через переходное сопротивление в месте повреждения – для исследования нагрева кабельной ЛЭП была использована трёхмерная (3D) модель, подход к формированию которой описан в разделе 3.5. Необходимость её применения была обусловлена тем, что основным источником теплоты указанных видах ОЗЗ являются локальные активные потери в месте повреждения. При составлении 3D-модели было принято, что канал пробоя перпендикулярен оси проводника (идеализированная модель); в работе показано, что температура нагрева междуфазной изоляции кабельной ЛЭП зависит только от мощности источника тепловой энергии, но не от конфигурации канала пробоя.

По результатам серии экспериментов в программном комплексе COMSOL Multiphysics было установлено, что в кабельных сетях с $I_{c\Sigma} = 50\text{--}100$ А и уровне высших гармоник в токе ОЗЗ от 20% до 50% от $I_{c\Sigma}$ температура в канале пробоя определяется в значительной сте-

Установлено, что при заданных теплофизических характеристиках грунта достаточной для выполнения вышеупомянутого условия является «глубина», равная ~6 м. Кроме этого, установлено также, что глубина прокладки кабельной ЛЭП не оказывает существенного влияния на температурный переходный процесс и на температуру в кабеле.

Для вычисления начальных тепловых условий разработана модель системы «кабельная ЛЭП – окружающее пространство (грунт)» в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Верификация модели в COMSOL Multiphysics, как в стационарных режимах, так и в переходных режимах (при симметричной перегрузке проводников по току), выполнена с применением модели на основе эквивалентной тепловой «цепи», составленной с использованием подхода Ф.Н. Van Wormer'a.

пени диаметром канала пробоя. Снижение температуры в канале пробоя замедляется с увеличением диаметра канала, начиная со значений $d \approx 1,0\text{--}3,0$ мм. С учетом этого при исследованиях процессов нагрева кабельной ЛЭП значение d принято равным 2 мм.

Практический интерес представляет также время с момента возникновения ОЗЗ до перехода его в междуфазное КЗ. Максимальная температура нагрева жил кабеля ААБл-3х240 при токе КЗ составляет 200°C . Нагрев изоляции выше данной температуры приводит к ее необратимой деградации и переходу ОЗЗ в КЗ. Поэтому в качестве критерия перехода ОЗЗ в междуфазное КЗ может являться достижение проводниками неповрежденных фаз температуры в 200°C .

Результаты расчёта температуры кабельной ЛЭП при устойчивых ОЗЗ через переходное сопротивление в разделе 3.6 показали (например, рис. 2), что даже при средних значениях суммарного емкостного тока сети $I_{\Sigma} = 50\text{--}100$ А и среднем уровне ВГ в токе металлического УОЗЗ $I_{ВГ\Sigma} = 0,2I_{\Sigma}$ возможен нагрев неповрежденной фазы кабельной ЛЭП до 200°C , при которых становится возможным переход замыкания на землю в междуфазное КЗ (менее, чем через 20 мин) при $I_{\Sigma} = 50$ А и менее, чем через 8 мин при $I_{\Sigma} = 100$ А.

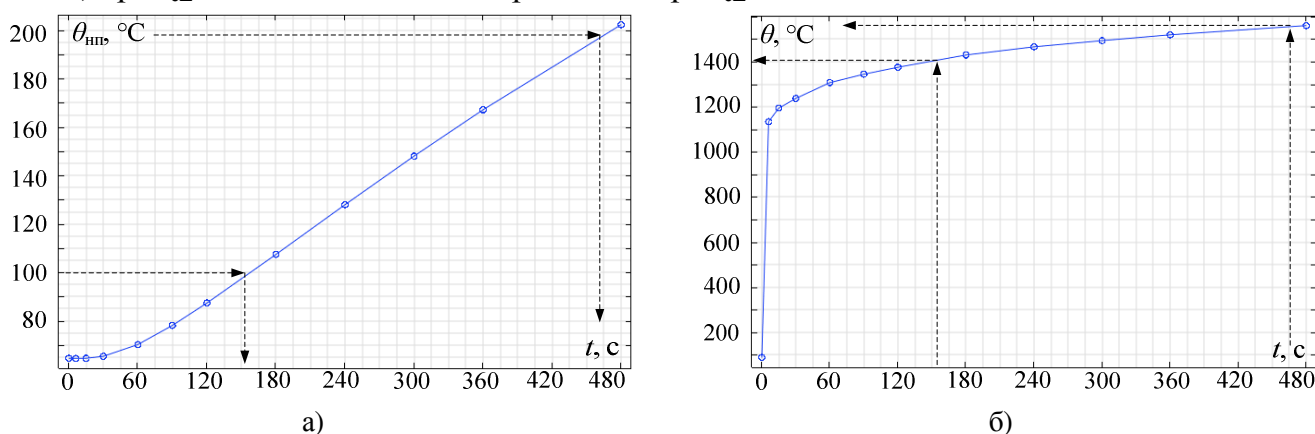


Рисунок 2. Изменение температуры при УОЗЗ через переходное сопротивление $R_{\text{пер}} = 0,25X_{\Sigma}$ в сети 6 кВ с $I_{\Sigma} = 100$ А и уровне ВГ в токе ОЗЗ $I_{ВГ\Sigma} = 20$ А (20% от I_{Σ}): а – температура в канале пробоя; б – температура неповрежденной фазы

При исследовании процесса нагрева кабельной ЛЭП токами *устойчивого дугового ОЗЗ* в разделе 3.7 был составлен и использован комплекс имитационных моделей, включающий, кроме модели для расчёта температуры кабельной ЛЭП в программном комплексе COMSOL Multiphysics, модель исследуемой электрической сети 6 кВ в программном комплексе PSCAD, предназначенную для вычисления тепловой мощности, выделяющейся в канале пробоя. Установлено, что при резонансной настройке ДГР в сетях с $I_{\Sigma} = 30\text{--}50$ А температура в канале пробоя не превышает 2000°C , т.е. устойчивое горение дуги невозможно.

При таких условиях после погасания дуги, образовавшейся в момент пробоя изоляции, ОЗЗ может перейти в устойчивое замыкание через переходное сопротивление. Нагрев канала пробоя изоляции высшими гармониками тока УОЗЗ до температуры устойчивого горения дуги при резонансной настройке ДГР возможен только с сетях с $I_{\Sigma} \geq 100$ А и при уровне ВГ выше среднего. Таким образом, ВГ в токе ОЗЗ при резонансной настройке компенсации могут обусловить устойчивое горение заземляющей дуги и достаточно быстрый (в течение нескольких минут) переход замыкания на землю в междуфазное КЗ только в кабельных сетях 6–10 кВ с достаточно большими значениями $I_{\Sigma} \geq 100$ А и уровнями ВГ, превышающими средний (20% от I_{Σ}).

При работе сети со значительными расстройками компенсации (до $\pm 20\text{--}25\%$) значение остаточного тока ОЗЗ в месте повреждения возрастает за счет некомпенсированной

ДГР емкостной составляющей основной частоты 50 Гц, что приводит к увеличению температуры в канале пробоя и уменьшению времени нагрева кабельной ЛЭП до критической температуры 200°C.

Полученные в разделе 3.7 результаты позволяют также оценить действующее значение остаточного тока в месте ОЗЗ, при котором становится возможным устойчивое горение заземляющей дуги. Из зависимости (рис. 3) можно видеть, что температура в канале пробоя достигает значения, при котором становится возможным устойчивое горение дуги в канале пробоя (>2000°C), при действующих значениях тока I_{RMS} в месте повреждения порядка 15...25 А и выше. Таким образом, необходимость в компенсации высших гармонических составляющих в токе ОЗЗ возникает при уровне последних в токе ОЗЗ порядка 20–25 А.

В разделе 3.7 исследуется также нагрев кабельной ЛЭП токами *дугового прерывистого ОЗЗ*. Результаты вычислительных экспериментов показали, что при резонансной настройке ДГР дуговые прерывистые замыкания ($\Delta t = 100\text{--}200$ мс и более) могут обусловить недопустимый нагрев изоляции кабельной ЛЭП и переход в междуфазное КЗ только при сохранении такого характера ОЗЗ в течение длительного времени (несколько десятков минут).

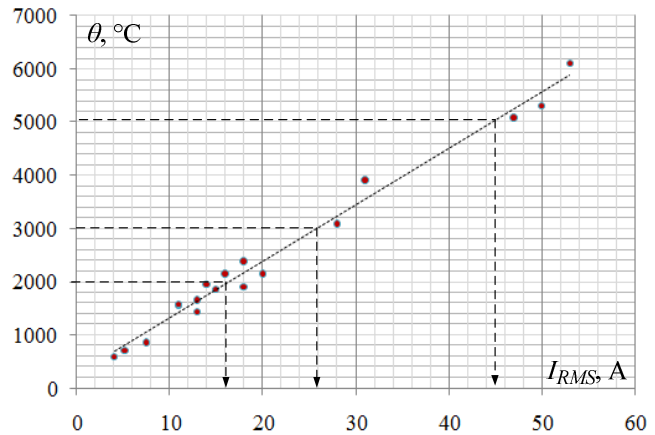


Рисунок 3. Зависимость температуры в канале пробоя от действующего значения тока ОЗЗ I_{RMS} в сети с резонансным заземлением нейтрали (устойчивое дуговое ОЗЗ)

Экспериментальные исследования в действующих кабельных сетях 6–10 кВ показывают, что при резонансной или близкой к ней настройке ДГР, как правило, происходит 2–4 повторных пробоя изоляции, после чего дуга окончательно гаснет и происходит самоустранение ОЗЗ. Таким образом, при работе сети с резонансной настройкой ДГР дуговые прерывистые ОЗЗ, учитывая ограниченную длительность их существования, не представляют опасности с точки зрения недопустимого нагрева изоляции КЛ. Только при достаточно больших расстройках компенсации ($\pm 20\text{--}25\%$), сопровождающихся уменьшением интервала между пробоями до $\sim 30\text{--}50$ мс, температура в канале пробоя изоляции может достигать значений, достаточных для устойчивого горения дуги и перегрева изоляции КЛ. Практически это имеет место только в сетях с емкостными токами I_{Σ} порядка 100 А и более. В таких сетях время перехода ОЗЗ в междуфазное КЗ из-за перегрев изоляции может составить 4–5 минут.

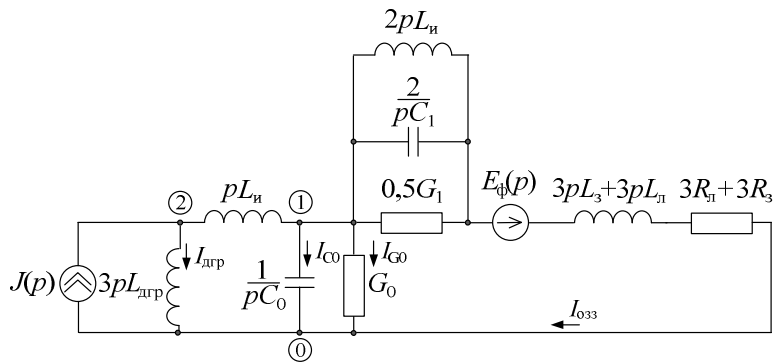
В **главе 4** для электрической сети с заземлением нейтрали через ДГР с применением комплексной схемы замещения электрической сети (рис. 4) получено общее математическое описание условий полной компенсации тока в месте ОЗЗ, включая высшие гармонические составляющие и составляющие переходного тока, с применением вспомогательного источника компенсирующего тока, включенного в нейтраль сети.

Полученное расчётное выражение тока компенсирующего источника имеет вид:

$$j(t) = -\frac{C_0 \cdot [L_n + 3L_{ДГР}]}{3L_{ДГР}} \cdot \delta(t) \cdot \sum_{k \in N} U_{mk} \cdot \sin \varphi_k - \sum_{k \in N} \frac{U_{mk}}{\omega_k \cdot 3L_{ДГР}} \cdot \cos \varphi_k + \sum_{k \in N}^M \left(\frac{U_{mk}}{\omega_k \cdot 3L_{ДГР}} - \frac{U_{mk} \cdot C_0 \cdot \omega_k \cdot [L_n + 3L_{ДГР}]}{3L_{ДГР}} \right) \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k) - \sum_{k \in N} \frac{U_{mk} \cdot G_0 \cdot [L_n + 3L_{ДГР}]}{3L_{ДГР}} \cdot \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (1)$$

где N обозначает принадлежность к множеству натуральных чисел; k – порядок гармонической составляющей; M – число существующих в фазном напряжении гармоник.

Рисунок 4. Комплексная схема замещения для получения условий полной компенсации тока ОЗЗ: L_n – индуктивность источника питания, $L_{л}, R_{л}$ – индуктивность и активное сопротивление прямой последовательности кабельной ЛЭП; C_1, C_0 – суммарная ёмкость прямой и нулевой последовательности сети; $L_{дгр}$ – индуктивность ДГР; L_3, R_3 – индуктивность и активное сопротивление «земли»; $J(p)$ – источник компенсирующего тока; $E_{\Phi}(p)$ – источник фазной ЭДС

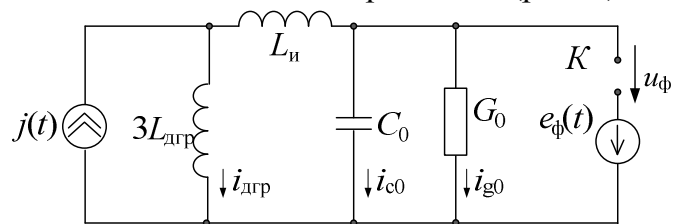


На основе общего математического описания условий полной компенсации тока ОЗЗ разработан алгоритм и предложен способ компенсации разрядной и зарядной составляющих переходного тока, основанный на применении импульсного источника тока, возбуждающего колебания в контуре нулевой последовательности, обеспечивающий ограничение кратности перенапряжений до значений, не превышающих кратность перенапряжений при первоначальном пробое изоляции, и уменьшение в несколько раз действующего значения тока в месте повреждения при замыканиях через перемежающуюся дугу в условиях расстройки компенсации емкостного тока основной частоты.

Показано, что существующий алгоритм компенсации ВГ в токе устойчивого ОЗЗ (разработанный в НПП «Бреслер»), основанный на формировании тока компенсирующего источника с использованием производной высших гармоник напряжения, измеряемого на нейтрали сети, в достаточной степени эффективен.

Также в главе 4 для сети с заземлением нейтрали через ДГР получено математическое описание условий компенсации потенциала поврежденной фазы, обеспечивающих подавление повторных пробоев изоляции после первого гашения заземляющей дуги, т.е. подавление дуговых прерывистых и дуговых перемежающихся замыканий, с применением вспомогательного источника компенсирующего тока, включенного в нейтраль сети (рис. 5).

Рисунок 5. Упрощенная комплексная схема замещения для исследования условий компенсации потенциала поврежденной фазы после гашения заземляющей дуги



Полученное с применением схемы на рис. 5 расчётное выражение тока компенсирующего источника имеет следующий вид:

$$j(t) = \frac{-U_m \cos \varphi}{3\omega L_{дгр}} + i_{дгр}(0) - \frac{u_{C_0}(0) \cdot C_0 \cdot (3L_{дгр} + L_n)}{3L_{дгр}} \cdot \delta(t) - \frac{U_m \cdot G_0 (3L_{дгр} + L_n)}{3L_{дгр}} \sin(\omega \cdot t + \varphi) - \frac{U_m \cdot [\omega^2 \cdot C_0 (3L_{дгр} + L_n) - 1]}{3\omega L_{дгр}} \cos(\omega \cdot t + \varphi). \quad (2)$$

Установлено, что система компенсации потенциала поврежденной фазы после гашения заземляющей дуги, предложенная научной школой под руководством В.К. Обабкова (ООО ВП «НТБЭ»), при значительных расстройках компенсации за счет биений напряжения на поврежденной фазе, способна усложнить условия подавления дуговых ОЗЗ, повышая веро-

ятность возникновения повторных пробоев. Метод компенсации потенциала поврежденной фазы, предложенный НПП «Бреслер», лишен такого недостатка и способен устойчиво поддерживать уровень напряжения поврежденной фазы $u_{\phi} \rightarrow 0$ даже при наличии расстройек компенсации.

В главе 5 сформулированы требования к средствам локации ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с полной компенсацией тока ОЗЗ. Показано, что в кабельных сетях с полной компенсацией тока замыкания на землю важное значение приобретает не только селективная определение поврежденного присоединения при КрОЗЗ, но и дистанционное определение места (зоны) повреждения. В целях уменьшения числа функций защиты от ОЗЗ на различных принципах, предусматриваемых в составе функций релейной защиты современных микропроцессорных терминалов РЗА для электрических сетей среднего напряжения 6–35 кВ, в качестве основного (базового) решения предложено использовать разработанную ИГЭУ и НПП «ЭКРА» универсальную (для компенсированных и некомпенсированных сетей) мультисоставную адмиттансную защиту, основанную на использовании как электрических величин переходного процесса, так и установившегося режима ОЗЗ. На основе исследований алгоритма мультисоставной адмиттансной защиты на имитационной модели кабельной сети 6 кВ установлено, что компенсации составляющих переходного процесса в токе ОЗЗ может привести к нарушениям устойчивости ее функционирования. В связи с этим предложена модификация алгоритма функционирования мультисоставной адмиттансной защиты, обеспечивающая возможность селективной фиксации кратковременных однократных пробоев изоляции в сетях, работающих с полной компенсацией тока ОЗЗ, включая составляющие переходного процесса. В последнем случае защита действует по принципу импульсной направленной защиты, реагирующей на начальную стадию переходного процесса в момент пробоя изоляции.

На основе сравнительного обзора известных методов локации места (зоны) ОЗЗ, включая КрОЗЗ, показано, что в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ с учетом особенностей их конфигурации наиболее перспективными являются методы ДОМЗЗ, основанные на одностороннем замере параметров электрических величин переходного процесса. Предложена модификация способа ДОМЗЗ, основанного на измерении параметров переходного напряжения поврежденной фазы, повышающая точность определения место повреждения на кабельной ЛЭП. Модификация способа основана на измерении и анализе первого после пробоя изоляции экстремума мгновенного значения производной напряжения поврежденной при ОЗЗ фазы:

$$du_{\text{п.ф.}}^{\text{max}} = \max \left\{ \left| \frac{du_{\text{п.ф.}}(t)}{dt} \right| \right\}. \quad (3)$$

Параметрические методы ДОМЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, обеспечивают приемлемую точность определения зоны ОЗЗ только при достаточно точном задании параметров поврежденной кабельной ЛЭП. С учетом этого в работе исследованы существующие подходы к определению параметров моделей кабельных ЛЭП 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при ОЗЗ. Установлено, что для обеспечения достоверности и высокой точности расчетов параметров переходных токов и напряжений, необходимой для решения задачи ДОМЗЗ, должны использоваться модели линий, учитывающие зависимость их индуктивностей от частоты (рис. 6). Применение частотно-независимых моделей кабельных ЛЭП допустимо только для приближенных количественных оценок параметров электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.

Установлено, в частности, что использование модели кабельной ЛЭП с параметрами, определенными по справочным данным (для частоты 50 Гц), приводит к грубым ошибкам в вычислении амплитуды, фазы и постоянной времени затухания составляющих переходного процесса (например, рис. 7, модель 3).

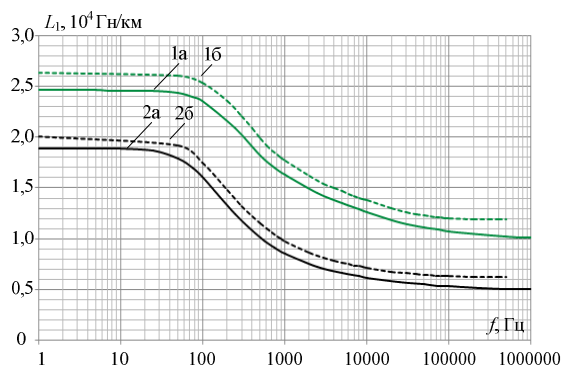


Рисунок 6. Зависимости индуктивности нулевой (1) и прямой (2) последовательности кабельной ЛЭП ААБл-3х240 от частоты: 1а, 2а – результаты, полученные с помощью COMSOL Multiphysics; 1б, 2б – зависимость по результатам исследований, выполненных в ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова

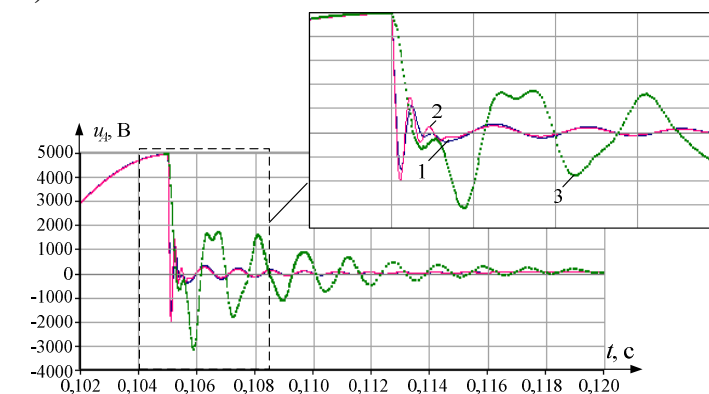


Рисунок 7. Осциллограммы напряжения на поврежденной фазе сети: 1 – частотно-зависимая (эталонная) модель КЛ; 2 – частотно-независимая модель КЛ с параметрами, определенными по справочным данным на частоте 50 Гц; 3 – частотно-независимая модель КЛ с параметрами, определенными по скорости распространения электромагнитных волн в кабельной ЛЭП 6–10 кВ

Существенно более точные оценки параметров электрических величин переходного процесса позволяет получить модель, в которой параметры кабельной ЛЭП определены по скорости распространения электромагнитной волны; погрешности расчёта параметров разрядной стадии переходного процесса (амплитуда и длительность, крутизна переднего фронта первой полуволны тока) не превышают 15–20% (рис. 7, модель 2). Точность расчетов разрядной стадии переходного процесса при ОЗЗ с применением таких моделей можно увеличить, если скорость распространения электромагнитных волн в каналах «фаза – фаза» и «фаза – земля» определять не по справочным данным, а с учетом частотного спектра контролируемого сигнала.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В работе решен комплекс взаимосвязанных задач, направленных на повышение эффективности компенсации тока ОЗЗ в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ с учетом влияния на ток в месте повреждения высших гармонических составляющих.

2. На основе аналитического обзора показано, что современные исполнения ДГР и регуляторов автоматической настройки компенсации, выпускаемых в России, и опыта их эксплуатации при резонансной настройке ДГР и малых уровнях высших гармоник в токе ОЗЗ позволяют обеспечить высокую эффективность режима заземления нейтрали (до 90% и более) в кабельных сетях 6–10 кВ, имеющих значения суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ до 100–150 А.

3. Показано, что необходимость в компенсации активной составляющей дополнительно к емкостной составляющей тока ОЗЗ практически возникает только в кабельных сетях 6–10 кВ с большими значениями емкостного тока сети $I_{c\Sigma} > 150$ –200 А, доля которых в общем числе кабельных сетей составляет в России ~5%.

4. С учетом пп. 2 и 3 основной причиной снижения эффективности компенсации тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с емкостными токами $I_{c\Sigma} < 100$ А при резонансной настройке ДГР являются высшие гармоники, общий уровень которых в токе замыкания значительно

возрос в связи с увеличением доли нелинейных потребителей в составе комплексной нагрузки распределительной сети и может достигать значений до 45–50% от величины I_{Σ} .

5. На основе исследований на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ условий гашения и повторного зажигания заземляющей дуги установлено, что наличие высших гармоник в токе ОЗЗ при уровне до 50% от I_{Σ} приводит к увеличению пика гашения напряжения на поврежденной фазе до ~20–22%, времени горения дуги на 1–3 полу-периода колебаний переходного тока, кратности переходных перенапряжений на неповреж-денных фазах до ~13–14%, амплитуды броска переходного тока и его среднеквадратичного значения до 5–10%. Компенсация высших гармоник в токе ОЗЗ позволяет исключить ука-занное негативное влияние на эффективность резонансного заземления нейтрали сети.

6. При предельном для кабельных сетей 6–10 кВ уровне высших гармоник в токе устойчи-вого ОЗЗ до 50% от I_{Σ} мощность вспомогательного источника, необходимого для их компенса-ции, не превышает 5% от мощности ДГР, что существенно упрощает решение данной задачи.

7. На основе анализа спектров токов ОЗЗ, полученных на основе экспериментальных из-мерений в действующих сетях и исследований на имитационных моделях установлено, что основная часть энергии высших гармоник (до 90% и более) в токе устойчивого замыкания сосредоточена в диапазоне частот до ~1,5 кГц, поэтому компенсация только отдельных выс-ших гармонических составляющих, как правило, не эффективна.

8. Разработан комплекс имитационных моделей, обеспечивающий решения задач, воз-никающих при исследовании процессов нагрева кабельной ЛЭП с бумажно-пропитанной изоляцией, проложенной в грунте, токами высших гармоник при различных видах ОЗЗ в компенсированных сетях 6–10 кВ, включающий:

- модель на основе цепи Маркова для определения геометрических размеров расчетной области анализ тепловых процессов в окружающем кабель грунте;

- 2D-и 3D-модели для исследования тепловых процессов в кабельной ЛЭП при различ-ных видах в программных комплексах COMSOL Multiphysics;

- модель на основе тепловых схем замещения для верификации моделей кабельной ЛЭП в COMSOL Multiphysics и определения для них начальных тепловых условий;

- модель исследуемой кабельной ЛЭП и кабельной сети 6–10 кВ для определения элект-рической и тепловой мощностей, обусловленных высшими гармониками в месте повреж-дения при различных видах ОЗЗ в программных комплексах PSCAD;

9. На основе вычислительных экспериментов, выполненных с применением имитаци-онных моделей по п. 8, показано, что переход ОЗЗ в междуфазное КЗ из-за нагрева изоля-ции кабельных ЛЭП токами высших гармоник:

- при устойчивых металлических ОЗЗ практически невозможен;

- при устойчивых ОЗЗ через переходное сопротивление возможен только при неблаго-приятном сочетании таких факторов, как величина переходного сопротивления, суммарный емкостный ток сети, уровень высших гармоник в токе ОЗЗ и наиболее вероятен в кабельных сетях с емкостными токами порядка 100 А и более;

- при устойчивых дуговых замыканиях возможен при действующем значении тока высших гармоник в месте повреждения порядка 15...25 А и выше.

- при дуговых прерывистых ОЗЗ возможен только при достаточно больших расстройках компенсации ($\pm 20\%$ и более) в сетях с $I_{\Sigma} > 100$ А.

10. Разработанные принципы построения и методика применения комплекса матема-тических моделей для исследования процессов нагрева кабельных ЛЭП с БПИ могут быть использованы для исследования электротепловых процессов при ОЗЗ и других видах по-

вреждений (например, КЗ) в кабельных линиях другого типа (например, с изоляцией из сшитого полиэтилена), другого класса напряжения или в сетях с другими режимами заземления нейтрали.

11. Для комплексной схемы замещения по методу симметричных составляющих электрической сети с заземлением нейтрали через ДГР получено общее математическое описание условий полной компенсации тока в месте ОЗЗ и общее математическое описание условий подавления дуговых замыкания на землю.

12. На основе математического описания условий компенсации тока ОЗЗ по п. 11 разработан алгоритм и предложен способ компенсации разрядной и зарядной составляющих переходного тока, обеспечивающий при дуговых замыканиях уменьшение в несколько раз действующего значения тока в месте повреждения и ограничение перенапряжений на неповрежденных фазах до безопасного уровня.

13. На основе исследований на имитационных моделях созданных в России способов и систем подавления дуговых замыканий с применением компенсации потенциала поврежденной фазы установлено, что эффективность функционирования системы, разработанной ООО ВП «НТБЭ» (Обабков В.К.), значительно снижается при расстройках компенсации, возможных в реальных условиях эксплуатации кабельных сетей 6–10 кВ. Существенно более высокую устойчивость к влиянию расстроек компенсации позволяет обеспечить применение системы управляемого заземления нейтрали, разработанной ООО НПП «Бреслер».

14. Установлено, что для обеспечения достоверности и высокой точности расчетов параметров переходных токов и напряжений, необходимой для решения задачи ДОМЗЗ, должны использоваться частотно-зависимые модели линий.

15. Предложена модификация способа ДОМЗЗ, основанного на измерении параметров переходного напряжения поврежденной фазы, обеспечивающая повышение точности определения место (зоны) повреждения на кабельных ЛЭП 6–10 кВ.

16. Показано, что для целей селективной сигнализации всех разновидностей ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с различными режимами заземления нейтрали, включая полную компенсацию токов ОЗЗ, наиболее перспективным представляются применение разработанной ИГЭУ и НПП «ЭКРА» универсальной мультисоставной адмиттансной защиты, дополненной блоком фиксации однократных пробоев изоляции, работающем по принципу направленные импульсные защиты.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Шуин, В.А. Влияние высших гармоник на переходные процессы при дуговых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью / В.А. Шуин, О.А. Добрягина, **Ю.Д. Кутумов**, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ. – 2020. – №. 2. – С. 30-40. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.030-040

2. **Кутумов, Ю.Д.** Ячеенная модель переходных тепловых процессов в подземном электрическом кабеле и окружающем грунте / Ю.Д. Кутумов, В.Е. Мизонов, Т.Ю. Шадрикова, А.И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 2. – С. 55-61. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.055-061

3. **Кутумов, Ю.Д.** Построение модели цифрового двойника подземного электрического кабеля: тепловая часть задачи / Ю.Д. Кутумов, В.Е. Мизонов, А.И. Тихонов, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 3. – С. 59-65. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.3.059-065

4. Шуин, В. А., Шадрикова, Т. Ю., Добрягина, О. А., **Кутумов, Ю. Д.** Защита от однофазных замыканий на землю на основе контроля ёмкости нулевой последовательности в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ // Электрические станции. – 2020. – №. 11. – С. 25-34. doi: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2020.1072.11.004>.

5. Шуин, В.А. Выбор параметров моделей воздушных линий для расчетов переходных процессов

при замыканиях на землю в сетях напряжением 6–10 кВ / В.А. Шуин, **Ю.Д. Кутумов**, Н.В. Кузьмина, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 5. – С. 5-17. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.005-017.

6. Шуин, В.А. Моделирование кабельных линий напряжением 6–10 кВ при расчетах переходных процессов при замыканиях на землю / В.А. Шуин, **Ю.Д. Кутумов**, Н.В. Кузьмина, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №. 5. – С. 30-40. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.5.030-040.

7. Шуин, В.А. О выборе параметров кабельных линий 6–10 кВ при расчетах и моделировании переходных процессов при однофазных замыканиях на землю / В.А. Шуин, **Ю.Д. Кутумов**, Т.Ю. Шадрикова // Электротехника. – 2021. – №. 12. – С. 60-67. DOI: 10.53891/00135860_2021_12_60.

Тезисы и полные тексты докладов конференций

8. Shuin, V.A., Dobryagina, O.A., Shadrikova, T.Y. et al. Protection from Single-Phase Short Circuits to Ground Based on Monitoring the Zero Sequence Capacitance in 6 – 10 kV Cable Networks. Power Technol Eng 55, 126–135 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01330-2>.

9. **Y.D. Kutumov**, T.Y. Shadrikova and V. A. Shuin, "Cable Line Parameters Calculation of 6-10 kV Networks with the Usage of Comsol Multiphysics Software," 2019 2nd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, Russia, 2019, pp. 1-14, doi: 10.1109/RPA47751.2019.8958097.

10. **Y. D. Kutumov**, T. Y. Shadrikova and V. A. Shuin, "Approaches to the 6-10 kV cable line parameters definition in the context of transient processes' analysis," PESS 2020; IEEE Power and Energy Student Summit, online, 2020, pp. 189-192.

11. A. E. Evdakov, **Y. D. Kutumov**, T. Y. Shadrikova and V. A. Shuin, "A Research of Digital Directional Current Protection Devices Operation Stability in Transient Modes During Single Phase to Earth Faults in 6-10 KV Networks With Isolated Neutral Point," 2020 3rd International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, 2020, pp. 1-16, doi: 10.1109/RPA51116.2020.9301732.

12. **Kutumov Yu.D.**, V.E. Mizonov, S. T. Yu and V.A. Shuin, "A Model Of 6-10 kV Power Three-Core Cable For The Research Of ITS Heating-Up In Normal And Emergency Operating Modes," 2021 4th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2021, pp. 1-18, doi: 10.1109/RPA53216.2021.9628771.

13. **Кутумов, Ю.Д.** Обзор существующих методов компенсации высших гармонических составляющих токов замыкания на землю / Ю. Д. Кутумов; научный руководитель В.А. Шуин // Электроэнергетика. "ЭНЕРГИЯ-2020". Пятнадцатая всероссийская (международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 7-10 апреля 2020 г / Министерство образования и науки Российской Федерации; ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина".—Иваново.— ISBN 978-5-00062-419-7 —2020.—Т. 3.—С. 55.

14. **Кутумов, Ю.Д.** К расчету теплового состояния подземного кабеля / Ю. Д. Кутумов; научный руководитель В. Е. Мизонов // "ЭНЕРГИЯ-2021". Шестнадцатая всероссийская (восьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Иваново, 6-8 апреля 2020 г.: материалы конференции / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина.—Иваново.—ISBN 978-5-00062-478-4.—2021.—Т. 4: Электромехатроника и управление.—С. 129.

15. **Кутумов, Ю.Д.** Простая модель для оценки термического состояния подземного электрического кабеля / Ю. Д. Кутумов, В. Е. Мизонов, Т. Ю. Шадрикова // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XXI Бенардосовские чтения), посвященной 140-летию изобретения сварки Н. Н. Бенардосом, 2-4 июня / в 3 т. ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина", Академия электротехнических наук Российской Федерации; [редкол.: С. В. Тарарыкин и др.].—Электронные данные.—Иваново.—ISBN 978-5-00062-453-1.—2021.—Т. 2: Теплоэнергетика.—С. 305-308.

16. **Y. D. Kutumov**, T. Y. Shadrilkova and V. A. Shuin, "Higher harmonics influence on stability of arcing single phase-to-earth faults in 6–10 kV networks with arc-suppression coil," PESS 2021; Power and Energy Student Summit, 2021, pp. 1-6.

17. **Кутумов, Ю. Д.** Исследование переходных процессов в кабельных сетях 6-10 кВ, работающих в режиме полной компенсации токов однофазного замыкания на землю / Ю. Д. Кутумов, Т. Ю. Шадрикова, В. А. Шуин // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XXI Бенардосовские чтения), посвященной 140-летию изобретения сварки Н. Н. Бенардосом, 2-4 июня / в 3 т. ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина", Академия

электротехнических наук Российской Федерации; [редкол. : С. В. Тарарыкин и др.].—Электронные данные.—Иваново.—ISBN 978-5-00062-453-1.—2021.—Т. 3: Электротехника.—С. 332-335.

18. **Кутумов, Ю.Д.** Исследование частотных характеристик воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ / Кутумов Ю.Д., Кузьмина Н.В., Шадрикова Т.Ю., Шуин В.А. // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов форума «РЕЛАВЭКСПО-2021». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 61-65.

19. **Кутумов, Ю. Д.** Способ повышения динамической устойчивости адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Ю. Д. Кутумов, Т. Ю. Шадрикова, В. А. Шуин // Материалы Международной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии" (XXI Бенардосовские чтения), посвященной 140-летию изобретения сварки Н. Н. Бенардосом, 2-4 июня / в 3 т. ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина", Академия электротехнических наук Российской Федерации; [редкол.: С. В. Тарарыкин и др.].—Электронные данные.—Иваново.—ISBN 978-5-00062-453-1.—2021.—Т. 3: Электротехника.—С. 335-338.

Патенты

20. **Устройство** адаптивной защиты от однофазных замыканий на землю: пат. RU 203458 U1 / Шуин В.А.; заявитель и патентообладатель Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Кутумов Ю.Д. – № 2021100346; заявл. 11.01.2021; опубл. 06.04.2021, Бюл. № 10/2021.

Кутумов Юрий Дмитриевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ТОКОВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ В УСЛОВИЯХ ВЛИЯНИЯ НА ТОК ПОВРЕЖДЕНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук
Подписано в печать 14.04.2022 г. Формат 60x84¹/₁₆. Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 14
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ