

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

На правах рукописи



ШАДРИКОВА Татьяна Юрьевна

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ
НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ**

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 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ФУНКЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	22
1.1 Характеристики кабельных сетей 6–10 кВ, определяющие требования к составу функций комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю...	22
1.2 Разновидности однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ и задачи их распознавания.....	26
1.3 Классификация принципов выполнения и основных свойств защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	32
1.4 Сравнительный анализ принципов выполнения и известных исполнений индивидуальных защит от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	38
1.5 Обоснование состава функций комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	52
1.6 Направления и задачи исследований, связанных с созданием комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю.....	53
1.7 Результаты патентного поиска в аспекте решения основных задач, связанных с повышением технического совершенства функций, входящих в состав комплексной защиты от замыканий на землю.....	54
1.8 Выводы по главе 1.....	58
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ТОКАХ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ УСТОЙЧИВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ.....	60
2.1 Постановка задачи и выбор метода исследований.....	60
2.2 Источники высших гармоник в токе замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и их характеристики.....	61
2.3 Модели источников высших гармоник в токе замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.....	71
2.4 Оценка минимального и максимального уровней высших гармоник в токе замыкания на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	79

2.5 Анализ колебаний уровня высших гармоник в токе замыкания на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	86
2.6 Выводы по главе 2.....	95
Глава 3. ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В ТОКАХ И НАПРЯЖЕНИЯХ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ.....	97
3.1 Постановка задач и обоснование метода исследования.....	97
3.2 Модели кабельных сетей 6 10 кВ для исследования высших гармонических составляющих в переходных токах и напряжениях при однофазных замыканиях на землю.....	98
3.3 Соотношения и параметры переходных токов, влияющие на селективность и устойчивость функционирования защит от замыканий на землю.....	102
3.4 Обоснование рабочего диапазона частот направленной защиты от замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов.....	113
3.5 Определение требований к чувствительности защит на основе переходных процессов.....	117
3.6 Способы распознавания опасных дуговых прерывистых замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.....	120
3.7 Выводы по главе 3.....	129
Глава 4 РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ....	131
4.1 Основные функциональные требования к комплексной многофункциональной защите от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	131
4.2 Структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	132
4.3 Разработка принципов выполнения основных функциональных узлов и элементов комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю.....	136
4.3.1 Формирователи аналоговых сигналов тока и напряжения комплексной многофункциональной защиты кабельных сетей 6–10 кВ от замыканий на землю...	136
4.3.2 Принципы выполнения основных функциональных узлов и элементов направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов...	138

4.3.3 Принципы выполнения направленной защиты и токовой защиты нулевой последовательности на основе высших гармоник.....	147
4.3.4 Принципы выполнения функций токовой и токовой направленной защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты.....	150
4.3.5 Принципы выполнения блока распознавания разновидностей однофазных замыканий на землю комплексной защиты.....	150
4.4 Исследование на имитационных моделях эффективности функционирования комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ.....	154
4.5 Способы повышения технического совершенства токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих 50 Гц и высших гармоник.....	164
4.5.1 Способы повышения технического совершенства токовых защит нулевой последовательности, основанных на использовании составляющих рабочей частоты 50 Гц.....	164
4.5.2 Совершенствование максимальной токовой защиты на основе высших гармоник.....	167
4.6 Методики выбора уставок усовершенствованных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих промышленной частоты и защит на основе высших гармоник.....	169
4.6.1 Методики выбора уставок усовершенствованных токовых защит нулевой последовательности, основанных на использовании составляющих 50 Гц.....	169
4.6.2 Методики выбора уставок токовых защит на основе высших гармоник.....	171
4.7 Разработка технических требований и технического задания на ОКР комплексной многофункциональной защиты.....	173
4.8 Выводы по главе 4.....	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	177
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	179
Приложение 1.....	201
Приложение 2.....	202
Приложение 3.....	203
Приложение 4.....	204

ВВЕДЕНИЕ

В.1 Актуальность темы. В системах городского и промышленного электроснабжения основная часть электрической энергии распределяется потребителям через кабельные сети напряжением 6–10 кВ. Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в таких сетях (75–90% от общего числа повреждений [1–9 и др.]) и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом.

Защита от ОЗЗ на кабельных линиях (КЛ), как правило, действует на сигнал [10]. От технического совершенства устройств защиты от ОЗЗ, характеризуемого свойствами селективности и устойчивости функционирования [11], зависит быстрота определения места повреждения и его ликвидации, а, следовательно, и показатели аварийности сети и надежности электроснабжения потребителей.

В.2 Степень разработанности темы исследований. В развитие и совершенствование принципов выполнения устройств защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ внесли значительный вклад известные ученые и специалисты СССР и России: Сирота И.М. (ИЭД АН УССР), Кискачи В.М. (ВНИИЭ), Попов И.Н., Лачугин В.Ф. (ЭНИН), Шуляк В.Г. (НПИ), Вайнштейн Р.А. (ТПУ), Шуин В.А. (ИГЭУ) и др. На основе их исследований были разработаны достаточно эффективные с учетом возможностей электромеханической и электронной элементной базы принципы выполнения защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ и методики расчета их уставок.

В то же время анализ опыта эксплуатации защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, выполненный в 2000 г. ОРГРЭС, выявил не всегда достаточную селективность при внешних и чувствительность при внутренних повреждениях большинства применяемых в настоящее время исполнений устройств защиты от данного вида повреждений [12]. Указанный анализ показал также, что наихудшие показатели эффективности функционирования имеют защиты от ОЗЗ компенсированных кабельных сетей. Низкое техническое совершенство защит от ОЗЗ компенсированных кабельных сетей приводит к снижению эффективности данного режима заземления нейтрали, характеризуемой отношением числа замыканий на землю, не перешедших в двойные и многоместные замыкания на землю или междуфазные короткие замыкания (КЗ) в месте повреждения [1], а, следовательно, и надежности электроснабжения потребителей. Поэтому исследования и разработки, направленные на повышение технического совершенства

устройств защиты от ОЗЗ распределительных кабельных сетей 6–10 кВ, прежде всего, работающих с компенсацией емкостного тока ОЗЗ, являются актуальными.

Исследования по данной проблеме проводились автором в рамках работ по теме «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ», выполненных в 2013–2015 гг. по договору с ООО НПП «ЭКРА».

В.3 Постановка проблемы. Сложности выполнения устройств защиты от ОЗЗ, обладающих высоким техническим совершенством, обусловлены рядом причин, основными из которых являются:

1) различие режимов заземления нейтрали, применяемых в настоящее время в кабельных сетях 6–10 кВ;

2) увеличение сложности конфигурации электрических кабельных сетей промышленного и городского электроснабжения и режимов их работы;

3) значительные различия условий функционирования (значений и соотношений электрических величин при внешних и внутренних ОЗЗ) устройств защиты от данного вида повреждений, установленных на присоединениях различных объектов кабельных сетей 6–10 кВ;

4) возможность возникновения в электрических сетях среднего напряжения дуговых неустойчивых ОЗЗ;

5) ограниченные возможности применявшейся ранее электромеханической и микроэлектронной элементной базы;

6) неполнота знаний многих разработчиков особенностей электромагнитных переходных процессов, возникающих при пробоях изоляции фазы сети на землю, и их влияния на устойчивость функционирования устройств защиты от ОЗЗ на различных принципах (т.н. динамическую устойчивость функционирования [13]).

В России кабельные сети 6–10 кВ могут работать с изолированной нейтралью, резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), заземлением нейтрали через высокоомный резистор, комбинированным заземлением нейтрали через ДГР и высокоомный резистор или заземлением нейтрали через низкоомный резистор [1, 3, 4, 14–26 и др.]. Режим заземления нейтрали определяет характер электромагнитных процессов в установившихся режимах ОЗЗ и может оказывать существенное влияние на характер электромагнитных переходных процессов, возникающих при пробое изоляции фазы сети на землю, т.е. на значения и соотношения электрических величин,

подводимых к измерительным органам устройств защиты от данного вида повреждений. Поэтому различие режимов заземления нейтрали обуславливает необходимость применения различных способов определения поврежденного присоединения при устойчивых ОЗЗ. В частности, в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью и с резистивными режимами заземления нейтрали, основное применение получили максимальные токовые и токовые направленные защиты, основанные на использовании составляющих рабочей частоты 50 Гц тока и напряжения нулевой последовательности [11, 27–34 и др.], а в компенсированных сетях – максимальные токовые защиты, основанные на использовании способов абсолютного и относительного замера высших гармоник (ВГ) в токе нулевой последовательности [35–37 и др.].

В сложных по конфигурации кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, систем электроснабжения предприятий отраслей промышленности с большим электропотреблением (черной и цветной металлургии, автомобилестроения, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей и некоторых других отраслей промышленности) в процессе эксплуатации могут возникать режимы (ремонтные, послеаварийные), сопровождающиеся значительными изменениями суммарного емкостного тока электрически связанной сети I_{CS} и собственных емкостных токов $I_{C\text{собс}}$ защищаемых присоединений, значительные расстройки компенсации в сетях с заземлением нейтрали через ДГР, в некоторых случаях – изменения режима заземления нейтрали сети, значительно усложняющие условия функционирования установленных в контролируемой сети устройств защиты от ОЗЗ.

Дополнительные сложности в обеспечении эффективности функционирования системы защиты от ОЗЗ в контролируемой сети могут вносить значительные различия условий функционирования устройств защиты от ОЗЗ, установленных на присоединениях различных объектов кабельных сетей 6–10 кВ: центрах питания (ЦП) – шинах 6–10 кВ главных понизительных подстанций или ГРУ ТЭЦ, распределительных подстанциях (РП) 6–10 кВ и трансформаторных подстанциях (ТП) 6–10/0,4 кВ, прежде всего, в кабельных сетях промышленного электроснабжения, и технические ограничения на применение тех или иных типов защиты. Так для присоединений, подключенных к шинам ЦП, РП и ТП электрически связанной кабельной сети, характерны значительные различия в соотношениях между собственным емкостным током $I_{C\text{собс}}$ и суммарным емкостным током сети I_{CS} , определяющие условия выбора

уставок по току срабатывания и чувствительности максимальных токовых защит от ОЗЗ (на основе составляющих промышленной частоты в сетях с изолированной нейтралью и высших гармоник в компенсированных сетях) и, следовательно, условия их применимости. На РП и ТП кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения не всегда предусматривается установка трансформаторов напряжения нулевой последовательности, что ограничивает возможности применения направленных защит от ОЗЗ.

Неустойчивые дуговые замыкания – распространенный вид ОЗЗ в кабельных сетях, прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции КЛ и электрических машин [1–4, 6, 7, 9, 17, 21, 26 и др.]. Если повторные зажигания дуги происходят через небольшие интервалы времени, ОЗЗ сопровождается накоплением дополнительных зарядов на фазах и смещением нейтрали сети перед повторным зажиганием заземляющей дуги. Такую разновидность ОЗЗ называют дуговым перемежающимся замыканием на землю (ДПОЗЗ). При ДПОЗЗ наибольшую опасность для электрически связанной сети представляют перенапряжения, возникающие на неповрежденных фазах при каждом повторном пробое изоляции. Условия возникновения максимальных перенапряжений определяются в основном условиями гашения и повторного зажигания заземляющей дуги и рассмотрены в теориях W. Petersen, J. Peters и J. Slepian и Беякова Н.Н. [например, 38–40 и др.]. В [1] на основе экспериментальных исследований в действующих кабельных и воздушных сетях 6–35 кВ показано, что ДПОЗЗ с различными вероятностями могут развиваться в соответствии как и с теорией W. Petersen, так и с теориями J. Peters и J. Slepian и Беякова Н.Н. Наибольшие перенапряжения возникают при ДПОЗЗ по теории W. Petersen, в соответствии с которой гашения заземляющей дуги происходят при первом переходе через нулевое значение зарядной (среднечастотной) составляющей переходного тока ОЗЗ, а повторные зажигания – в следующий полупериод, когда восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе достигнет максимального или близкого к нему значения. Максимальным значениям перенапряжений соответствуют также максимальные амплитуды бросков переходных токов, поэтому ДПОЗЗ сопровождаются не только опасными для всей электрически связанной сети перенапряжениями, но и опасным для поврежденного элемента увеличением среднеквадратичного значения тока в месте ОЗЗ [41, 42], что может стать причиной возникновения пожаров в кабельных

тоннелях и колодцах и серьезных повреждений активной стали статора и изоляции обмоток статора электрических машин [например, 43].

Учитывая это, в работах Дударева Л.Е., выполненных в 70–80-х годах [например, 43–45 и др.], предлагается защиту КЛ и электрических машин (в частности, электродвигателей) при ДПОЗЗ независимо от величины суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ выполнять *с действием на отключение*.

При увеличении интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги по сравнению с принимаемыми в теориях W. Petersen, J. Peters и J. Slepian и Белякова Н.Н., а также времени горения дуги добавочный потенциал, накладывающийся на сеть при каждом гашении дуги, будет уменьшаться, что приводит к уменьшению сопровождающих повторные пробой изоляции перенапряжений и амплитуд бросков переходного тока, и дуговое ОЗЗ приобретает относительно безопасный для сети и поврежденного элемента характер. Лихачев Ф.А. в [1] называет такие ОЗЗ, в отличие от дуговых перемежающихся, *дуговыми прерывистыми* (ДПрОЗЗ), подчеркивая их относительно безопасный для сети характер. При таком характере дугового неустойчивого ОЗЗ нет необходимости в немедленном отключении поврежденного присоединения, и защита от ОЗЗ должна *действовать на сигнал*. Тем более нет необходимости в действии защиты от ОЗЗ на отключение при кратковременных самоустраняющихся пробоях изоляции («клевках земли»), однако их селективная фиксация с определением места повреждения (зоны повреждения – участка КЛ или элемента, который можно отключить для проведения высоковольтных испытаний), может быть использована для профилактики состояния изоляции элементов сети [6, 8, 31].

Известно, что селективную фиксацию всех разновидностей неустойчивых дуговых ОЗЗ позволяют обеспечить устройства защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса [44–63 и др.]. Однако все известные исполнения устройств защиты на основе переходных процессов не обладают способностью распознавать опасные ДПОЗЗ и относительно безопасные ДПрОЗЗ и КрОЗЗ и выбрать при необходимости наиболее эффективный для обеспечения надежности электроснабжения потребителей способ действия защиты – сигнал или отключение. К недостаткам устройств защиты на основе переходных процессов следует отнести также отсутствие у них непрерывности действия в установившемся режиме ОЗЗ, необходимой для защит с действием на отключение при данной разновидности

ОЗЗ (например, на электродвигателях или КЛ в сетях с повышенными требованиями к электробезопасности эксплуатационного персонала), а также в некоторых случаях при поиске поврежденного участка методом оперативных переключений в сети.

Таким образом, все известные исполнения устройств защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ решают частные задачи, связанные с селективным определением поврежденного присоединения (направления) при определенных разновидностях ОЗЗ, однако ни одно из них не обеспечивает комплексное решение рассматриваемой проблемы, которое должно обеспечивать не только определение поврежденного присоединения, но и с учетом требований повышения эффективности функционирования распределительных кабельных сетей среднего напряжения и надежности электроснабжения потребителей, *распознавание всех разновидностей ОЗЗ* (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ, КрОЗЗ, устойчивое ОЗЗ) в сетях с различными режимами заземления нейтрали для выбора оптимального при данной разновидности ОЗЗ способа действия защиты (на сигнал или на отключение). Очевидно, что комплексное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ в данном понимании может быть обеспечено только при многофункциональном подходе – комбинации в одном устройстве защиты нескольких способов определения поврежденного присоединения при одновременном решении задачи распознавания всех разновидностей ОЗЗ. Следует отметить также, что комплексное решение рассматриваемой проблемы, на наш взгляд, должно также включать решение задачи дистанционного определения места (зоны) пробоя изоляции КЛ, находящихся под рабочим напряжением, для сокращения затрат времени на поиск и ликвидацию повреждения, а также для повышения эффективности использования информации о КрОЗЗ в целях диагностики состояния изоляции элементов контролируемой сети.

Очевидно, что получить комплексное решение в части защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ можно только при совместном использовании для каждого из режимов нейтрали не одной, а *нескольких функций защиты*, основанных на использовании электрических величин как установившегося режима, так и переходного процесса при ОЗЗ. Такой принцип повышения технического совершенства защиты от ОЗЗ может быть назван *многофункциональным*.

Следует отметить, что попытки применить многофункциональный принцип для повышения технического совершенства защиты от ОЗЗ, прежде всего

компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, предпринимались и раньше. Так, Сирота И.М. предлагал в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для повышения эффективности функционирования устанавливать на каждом присоединении два устройства защиты, одно из которых основано на использовании электрических величин установившегося режима ОЗЗ, второе – на использовании переходных процессов [49]. В некоторых разработках ИГЭУ для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ также предусматривалось совместное использование централизованных защит на основе переходных процессов и на основе ВГ [например, 54]. Однако в этих предложениях и разработках не ставилась задача распознавания разновидностей неустойчивых дуговых ОЗЗ, не использовались возможности повышения эффективности функционирования составляющих комплекс отдельных функций защиты за счет их взаимодействия и не учитывались особенности применения устройств защиты от ОЗЗ на различных объектах распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения.

Попытка практически применить многофункциональный подход к решению проблемы защиты от ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ была предпринята также в конце 60-х годов Кискачи В.М. (ВНИИЭ) [36]. Предложение Кискачи В.М. было ориентировано на решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ с учетом особенностей различных объектов компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения и предусматривало применение на ЦП, оснащенных трансформаторами напряжения нулевой последовательности (ТННП), комбинированной защиты типа УСЗ-1, включающей направленную импульсную защиту на основе переходных процессов и максимальную токовую защиту на основе ВГ, на объектах, не имеющих ТННП (РП, ТП) – максимальной токовой защиты абсолютного замера ВГ типа УСЗ-2/2 или устройств относительного замера ВГ типа УСЗ-3М или УСЗ-3. Опыт эксплуатации экспериментальных образцов устройства типа УСЗ-1 показал неэффективность используемой в нем направленной импульсной защиты на основе переходных процессов, поэтому данное устройство серийно не выпускалось. Кроме того, устройство защиты УСЗ-1 по принципу действия неспособно распознавать разновидности дуговых неустойчивых ОЗЗ. Эффективность функционирования устройства защиты от ОЗЗ типа УСЗ-2/2 также оставляет желать лучшего [12].

Первая попытка создать защиту, способную распознавать неустойчивые и устойчивые ОЗЗ и при необходимости использовать разные способы действия (сигнал

или отключение), была предложена Дударевым Л.Е. в начале 80-х годов: устройство импульсной направленной защиты от ОЗЗ типа КЗЗП позволяло фиксировать КрОЗЗ и распознавать устойчивые ОЗЗ и ДПОЗЗ [44, 45]. Распознавание двух последних разновидностей ОЗЗ осуществлялось по уровню ВГ в напряжении нулевой последовательности. Однако такой способ распознавания не позволяет отличить опасные ДПОЗЗ от относительно безопасных для сети ДПрОЗЗ, т.к. импульсная защита на основе переходных процессов не может контролировать интервалы времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги и среднеквадратичное значение тока в поврежденном элементе при дуговых прерывистых и устойчивых ОЗЗ (а, следовательно, и степень опасности ОЗЗ). Устройство защиты КЗЗП, основанное на использовании только одного принципа определения поврежденного присоединения (на основе переходных процессов), не обладает непрерывностью действия в установившемся режиме ОЗЗ. Поэтому подход, реализованный в КЗЗП, нельзя рассматривать как комплексное решение проблем защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

Следует отметить, что возможности эффективного решения технических задач, связанных с созданием комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, до 90-х годов в значительной мере ограничивались возможностями применявшейся в основном в тот период микроэлектронной элементной базы. В настоящее время возможности эффективного решения рассмотренных выше задач обеспечиваются применением микропроцессорной элементной базы и современных методов цифровой обработки сигналов.

Возможности создания устройств защиты от ОЗЗ, обладающих высоким техническим совершенством, в значительной мере ограничивались также неполнотой знаний разработчиков особенностей переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и их влияния на селективность и динамическую устойчивость функционирования устройств защиты от ОЗЗ на различных принципах. Теоретические и экспериментальные исследования электромагнитных и волновых переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения 6–35 кВ, в развитие которых внесли существенный вклад отечественные (Сирота И.М., Лихачев Ф.А. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Шуляк В.Г., Шуин В.А., Вайнштейн Р.А. и др. [1, 4, 8, 47, 53, 57, 71–74 и др.]) и зарубежные (Н. Pundt [48] и др.) ученые позволили накопить определенную базу априорной информации о параметрах электрических величин переходного процесса (частота, постоянные затухания, амплитудные значения, фазные соотношения и др.),

используемой в качестве информационного обеспечения при совершенствовании существующих и разработке новых более эффективных, прежде всего, в аспекте повышения селективности и устойчивости работы в переходных режимах ОЗЗ, алгоритмов функционирования устройств защиты, основанных как на использовании электрических величин переходного процесса, так и различных составляющих установившегося режима ОЗЗ. Создание и широкое применение в научных исследованиях и разработках современных высокоэффективных систем имитационного математического и физико-математического моделирования объектов электроэнергетики и устройств автоматического управления ими, таких, как Matlab с пакетами расширения Simulink и SimPowerSystem, PSCAD, ATPdesigner, RTDS и др. [64–69 и др.], а также программно-аппаратных комплексов для испытаний устройств РЗА типа РЕТОМ и его зарубежных аналогов, которые в сочетании с системами моделирования Matlab, PSCAD и др. могут эффективно использоваться для физико-математического моделирования динамических режимов функционирования устройств РЗА [42, 70], обеспечивают возможности дальнейшего развития информационного обеспечения защиты от ОЗЗ, расширения функциональных возможностей и совершенствования алгоритмов функционирования.

Рассмотренные аспекты проблемы совершенствования защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ приводят к следующим принципиальным выводам:

1) повышение надежности работы распределительных кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали и электроснабжения потребителей может быть обеспечено на основе повышения технического совершенства защиты от ОЗЗ за счет расширения понятия «селективность» защиты от данного вида повреждений, которое должно включать не только свойство защиты определять поврежденное присоединение (направление) при различных видах ОЗЗ [11], но и способность распознавать разновидности замыканий на землю для выбора необходимого способа действия (сигнал или отключение);

2) повышение технического совершенства (селективности и устойчивости функционирования) защиты от ОЗЗ возможно только на основе комплексного многофункционального подхода, предполагающего расширение функциональных возможностей последней для обеспечения не только эффективного определения поврежденного присоединения, но и распознавания всех разновидностей ОЗЗ при различных режимах заземления нейтрали кабельных сетей 6–10 кВ;

3) современная микропроцессорная элементная база РЗА ЭЭС, а также современные методы цифровой обработки сигналов снимают ограничения в части технических возможностей создания комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ с указанными в пп. 1 и 2 свойствами;

4) применение современных высокоэффективных систем имитационного математического и физико-математического моделирования объектов электроэнергетики и устройств автоматического управления ими обеспечивает возможности дальнейшего развития и совершенствования информационного обеспечения в части свойств и параметров электромагнитных процессов при ОЗЗ, необходимого для создания комплексной многофункциональной защиты от данного вида повреждений распределительных кабельных сетей 6–10 кВ.

В.4 Цель работы – повышение технического совершенства защиты от однофазных замыканий на землю распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали на основе расширения и комплексного использования новых функциональных возможностей, обеспечиваемых применением микропроцессорной базы и цифровой обработки сигналов.

В.5 Задачи, решаемые в работе:

1. Анализ существующих принципов выполнения и исполнений защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

2. Разработка требований, обоснование состава функций и структуры комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

3. Исследование высших гармоник в токе устойчивого ОЗЗ и особенностей их применения в токовых защитах от данного вида повреждений в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

4. Исследование спектра высших гармонических составляющих в переходных токах ОЗЗ и особенностей их использования для повышения технического совершенства максимальных токовых защит от данного вида повреждений в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

5. Разработка и исследование основных функциональных узлов и элементов комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

6. Разработка способов повышения технического совершенства цифровых функций максимальных токовых защит от ОЗЗ, основанных на использовании составляющих ра-

бочей частоты и высших гармоник токов нулевой последовательности установившегося режима замыкания на землю.

7. Разработка уточненной методики выбора уставок по первичному току срабатывания максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ для компенсированных кабельных сетей и максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе составляющих промышленной частоты для некомпенсированных кабельных сетей.

8. Разработка технического задания на ОКР комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

В.6 Объект и предмет исследований. Объектом исследований являются электрические кабельные сети напряжением 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, работающие с изолированной нейтралью, с резонансным заземлением нейтрали через ДГР или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор. Предмет исследований – принципы выполнения устройств защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

В.7 Методы исследований. Для решения задач в работе использовались методы теории электрических цепей, электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах, математического моделирования электрических и электронных цепей, имитационного моделирования на ЭВМ с использованием программного комплекса Matlab.

В.8 Научную новизну работы представляют:

1. Структура, состав функций и принципы выполнения комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, обеспечивающие не только определение поврежденного присоединения при всех разновидностях ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, но и их распознавание.

2. Алгоритмы распознавания разновидностей дуговых неустойчивых ОЗЗ в кабельных сетях с различными режимами заземления нейтрали, обеспечивающие возможность раздельного действия защиты на отключение при опасных для сети и поврежденного элемента ОЗЗ и на сигнал при ОЗЗ, не представляющих прямой опасности.

3. Математические имитационные модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, обеспечивающие возможность оценки минимального уровня и степени неустойчивости высших гармоник в токах устойчивого ОЗЗ.

4. Результаты исследований на имитационных моделях минимального уровня высших гармоник и максимальной степени неустойчивости общего уровня ВГ в токе ОЗЗ,

позволяющие определить требования к чувствительности максимальных токовых защит на основе ВГ по первичному току и оценить область их возможного применения на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

5. Способы обеспечения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ при дуговых прерывистых ОЗЗ и повышения чувствительности при устойчивых замыканиях в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

6. Способы повышения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит нулевой последовательности, обеспечивающие повышение чувствительности при внутренних дуговых прерывистых и устойчивых ОЗЗ.

7. Уточненная методика выбора уставок по первичному току срабатывания максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ для компенсированных кабельных сетей и максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе составляющих промышленной частоты для некомпенсированных кабельных сетей.

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

1. Структура и принципы выполнения комплексной многофункциональной защиты, которые могут быть использованы разработчиками для совершенствования функций защиты от ОЗЗ в микропроцессорных устройствах РЗА.

2. Принципы выполнения и структурно-функциональные схемы основных функциональных узлов защиты от ОЗЗ могут быть использованы разработчиками микропроцессорных устройств защиты аналогичного назначения.

3. Имитационные модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ могут быть использованы для исследования установившихся и переходных режимов ОЗЗ разработчиками устройств защиты от ОЗЗ на основе высших гармоник и переходных процессов.

4. Результаты исследований и оценки на имитационных моделях минимального уровня высших гармоник и степени нестабильности общего уровня ВГ в токе устойчивого ОЗЗ позволяют разработчикам уточнить требования к чувствительности максимальных токовых защит на основе высших гармоник по первичному току, а проектировщикам – оценить область их возможного применения на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

5. Методика выбора уставок максимальных токовых защит на основе ВГ и максимальных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты может быть использована проектными организациями.

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 физических и математических моделях и с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках, а также с данными экспериментальных исследований существующих исполнений и разработанного устройства защиты от ОЗЗ.

В.11 Внедрение результатов исследований. Алгоритмы функционирования функций защиты от ОЗЗ, образующих комплексную многофункциональную защиту от данного вида повреждений, технические требования к характеристикам, расчетные оценки рабочих диапазонов, алгоритмы и параметры настройки цифровых функциональных узлов и элементов комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ использованы при разработке технического задания на ОКР и выполнении опытных образцов комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ в ООО НПП «ЭКРА», один из которых установлен в опытную эксплуатацию в кабельных сетях Михайловского горно-обогатительного комбината. Результаты исследований и разработки принципов выполнения направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов применены ООО "ЛИСИС" при разработке функции защиты от ОЗЗ ВЛ 35 кВ цифрового комплекса РЗА подстанции "Эльгауголь". Разработанные уточнения и корректировки методик выбора уставок максимальных токовых защит нулевой последовательности от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ используются в работе специалистами по расчету РЗА проектных организаций.

Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных и установившихся режимов ОЗЗ используются в учебном процессе подготовки студентов по профилю «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата) и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры) в лекционных, лабораторных и практических занятиях при изучении дисциплин «Релейная защита электроэнергетических систем», «Моделирование объектов электроэнергетики и устройств автоматического управления ими», «Спецвопросы релейной защиты электроэнергетических систем», а также при выполнении выпускных квалификационных работ и НИРС.

В.12 Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура и принципы выполнения комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

2. Алгоритмы распознавания разновидностей ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающие возможность действия комплексной многофункциональной защиты на отключение при опасных и на сигнал при неопасных для сети и поврежденного элемента замыканиях.

3. Математические имитационные и упрощенные аналитические модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и результаты исследований с их использованием минимального уровня ВГ и максимальной степени нестабильности общего уровня гармоник в токе ОЗЗ, определяющие условия применимости защит от ОЗЗ на их основе.

4. Способы обеспечения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит нулевой последовательности от ОЗЗ на основе ВГ и на основе рабочей частоты при дуговых ОЗЗ и повышения чувствительности при устойчивых замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.

5 Уточнения методик выбора уставок по первичному току срабатывания максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и методики выбора уставок по первичному току срабатывания максимальных токовых защит нулевой последовательности от ОЗЗ на основе составляющих рабочей частоты некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

В.13 Личный вклад автора заключается в постановке цели и конкретных задач исследования, разработке структуры и алгоритмов функционирования комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, алгоритмов распознавания разновидностей ОЗЗ, имитационных компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для исследования уровня ВГ в токе ОЗЗ, проведении вычислительных экспериментов на имитационных моделях, анализе и оценке полученных результатов, получении аналитических решений отдельных задач исследования, разработке и исследовании способов обеспечения динамической устойчивости функционирования при дуговых прерывистых ОЗЗ максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и максимальных токовых защит нулевой последовательности в кабельных сетях с изолированной нейтралью, разработке методики выбора уставок по току срабатывания максимальных токовых защит на основе ВГ и токовых защит на основе составляющих 50 Гц, в том числе для вновь разработанных

защит, разработке технического задания на ОКР по созданию в ООО НПП «ЭКРА» опытного образца комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ.

В.14 Соответствие паспорту специальности. *Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» (технические науки): в диссертационной работе объектом исследований являются распределительные электрические кабельные сети среднего напряжения, предметом исследований – методы и средства повышения эффективности функционирования устройств защиты от наиболее частого вида повреждений – однофазных замыканий на землю.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» (технические науки), а именно:

– п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки) соответствуют разработке математических имитационных и аналитических моделей компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для исследования высших гармонических составляющих в токах и напряжениях нулевой последовательности в установившихся и переходных режимах ОЗЗ и результаты исследований, выполненных с их применением;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработке структуры, состава функций, алгоритмов функционирования комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ и алгоритмов функционирования составляющих ее узлов и элементов; способов обеспечения динамической устойчивости функционирования и чувствительности максимальных токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, способов повышения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты в кабельных сетях с изолированной нейтралью, методики выбора уставок по току срабатывания максимальных токовых защит на основе ВГ.

– п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют разработке имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали в среде моделирования Matlab для исследо-

вания установившихся и переходных режимов ОЗЗ, исследования и проверки эффективности принципов выполнения и алгоритмов функционирования разработанной комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю.

В.15 Апробация результатов исследований. Результаты исследований докладывались и обсуждались на IV и V Международных научно-технических конференциях «Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем» (Екатеринбург, 2013 г.; Сочи, 2015 г.), на международном саммите «Power and energy student summit (PESS) 2015» (Дортмунд, Германия, 2015 г.), на Международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО 2013) (Чебоксары, 2013 г.), на XVII и XVIII Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения») (Иваново, 2013 г., 2015 г.), на Девятнадцатой, Двадцатой и Двадцать первой международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2013 г., 2014 г., 2015 г.), на III, IV и V Международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012 г.; Новочеркасск, 2013 г.; Томск, 2014 г.), на Шестом Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2012 г.), на Всероссийской конференции «Национальный конгресс по энергетике» (Казань, 2014 г.), в III Всероссийской школе-семинаре «Коммерциализация научно-технических идей в энергетике» (Решма, 2014 г.), на VIII, IX и X Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2013» (Иваново, 2013 г., 2014 г., 2015 г.), на Седьмой региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Энергия - 2012» (Иваново, 2012 г.) и на Шестой региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия - 2011» (Иваново, 2011 г.).

В.16 Публикации. Результаты исследований опубликованы в 36 работах [75–110], из них 4 в изданиях по перечню ВАК [87, 88, 99, 101], а также 6 в тезисах докладов международных научно-технических конференций [104, 106–110].

В.17 Основное содержание работы. Работа, кроме введения, включает 4 главы, заключение и библиографический список.

В главе 1 дана характеристика кабельных сетей и их объектов, определяющая принципы действия и область применимости защит от ОЗЗ, дана классификация разнообразно-

стей замыканий на землю в рассматриваемых сетях, классификация принципов выполнения и основных свойств устройств защиты от ОЗЗ компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей; выполнен сравнительный анализ принципов выполнения индивидуальных устройств защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ и условий их применимости; выполнен патентный поиск по теме исследований; обоснован состав функций комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ; сформулированы направления и задачи исследований переходных и установившихся режимов замыкания на землю для разработки комплексной многофункциональной защиты.

Глава 2 посвящена исследованию высших гармоник в токах установившегося режима замыкания на землю компенсированных сетей: аналитическому и имитационному моделированию источников ВГ, оценкам минимального и максимального уровней высших гармоник с использованием существующих оценок и разработанных моделей, а также анализу колебаний ВГ в токе ОЗЗ для определения требований к чувствительности и области возможного применения защит от ОЗЗ на основе ВГ.

В главе 3 обоснован подход к моделированию объектов электротехнических систем и устройств с использованием Simulink и его применение для анализа высших гармонических составляющих переходного процесса при ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных сетях 6–10 кВ, на основе которого разработаны математические имитационные модели; исследован рабочий частотный диапазон и определены требования к чувствительности направленной защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов; предложены способы распознавания опасных дуговых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях.

В главе 4 сформулированы основные функциональные требования к комплексной многофункциональной защите от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ, разработана структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, удовлетворяющая данным требованиям, разработано техническое задание на ОКР, включающее принципы выполнения и алгоритмы функционирования основных функциональных узлов и элементов; предложены способы повышения эффективности функционирования существующих токовых защит на основе составляющих рабочей частоты и высших гармоник и методика выбора уставок усовершенствованных защит.

Библиографический список содержит 206 источников.

Глава 1. **ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ФУНКЦИЙ КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ**

1.1 Характеристики кабельных сетей 6–10 кВ, определяющие требования к составу функций комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю

1.1.1 Классификация электрических кабельных сетей 6–10 кВ. Основными признаками, по которым принято классифицировать распределительные кабельные сети 6–10 кВ, являются назначение сети (характер потребителя) и режим заземления нейтрали [111–114]. По назначению принято различать кабельные сети промышленного и городского электроснабжения. К кабельным сетям промышленного электроснабжения следует отнести также сети 6 кВ собственных нужд электростанций. Назначение в значительной мере определяет особенности схемы кабельной сети, состав ее объектов, длины и сечения кабельных линий (КЛ), соотношения между собственными емкостными токами присоединений $I_{C\text{собс}}$ и суммарным емкостным током всей электрически связанной сети $I_{C\Sigma}$, определяющие, как будет показано ниже, условия применимости максимальных токовых защит от ОЗЗ. Особенности схемы и параметры КЛ оказывают также существенное влияние на характер и параметры электрических величин переходных процессов при ОЗЗ и должны учитываться при создании их моделей.

Режимы заземления нейтрали электрических кабельных сетей 6–10 кВ, применяемые в России, можно разделить на 2 группы:

- 1) режимы заземления нейтрали, допускающие в течение ограниченного времени работу сети с ОЗЗ и действие защиты от данного вида повреждений на сигнал;
- 2) режимы заземления нейтрали, не допускающие работу сети с ОЗЗ даже в течение ограниченного времени и требующие выполнения защиты от ОЗЗ с действием только на отключение.

К первой группе относятся: изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), высокоомное заземление нейтрали через резистор, комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор [1, 3, 4,

14–18, 21–25 и др.]. Ко второй группе относится т.н. частичное заземление нейтрали через резистор, применяемое в схемах кабельных сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков ТЭС и АЭС [20, 115–118].

В кабельных сетях промышленного и городского электроснабжения применяются, как правило, режимы заземления нейтрали, относящиеся к 1-й группе. При определенных условиях (высоком уровне эксплуатации изоляции элементов сети, эффективной системе защиты от внутренних перенапряжений при дуговых перемежающихся ОЗЗ и коммутациях и др.) режимы заземления нейтрали 1-й группы в сочетании с селективной защитой от ОЗЗ, действующей на сигнал, обеспечивают повышение надежности электроснабжения потребителей за счет исключения фактора внезапности нарушения электроснабжения и уменьшения числа кратковременных нарушений электроснабжения (КНЭ) потребителей по сравнению с режимами, относящимися ко 2-й группе. Следует отметить, что применение режима заземления нейтрали, относящегося к 1-й группе, не исключает возможности выполнения в необходимых случаях защиты от ОЗЗ с действием на отключение. К таким сетям относятся сети с повышенными требованиями по электробезопасности (например, шахтные, карьерные сети, сети угольных разрезов, торфоразработок и др.). Защита от ОЗЗ с действием на отключение применяется также на генераторах и электродвигателях в случаях, когда ток в месте повреждения может обусловить серьезные повреждения электрической машины, требующие длительного и дорогостоящего ремонта.

Для кабельных сетей характерны большие значения суммарного емкостного тока $I_{\Sigma\epsilon}$, в большинстве случаев превышающие допустимые для сетей 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью значения (соответственно 30 и 20 А при отсутствии в сети воздушных линий (ВЛ) на железобетонных или металлических опорах и 10 А при их наличии [10]). Поэтому большая часть кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения работает с резонансным заземлением нейтрали через ДГР (с компенсацией емкостных токов ОЗЗ), в некоторых случаях – с комбинированным заземлением нейтрали через ДГР и высокоомный резистор. Незначительная часть (порядка ~10%) кабельных сетей 6–10 кВ в системах промышленного электроснабжения имеет значения $I_{\Sigma\epsilon}$, не превышающие 10 А, и работает с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор. Кабельные сети 6 кВ собственных нужд электростанций, электрически не связанные с внешней сетью (например, в схемах энергоблоков, не имеющих реактированного отщвления для питания на генераторном напряжении местной нагрузки), также имеют небольшие значения $I_{\Sigma\epsilon}$, не превышающие 10 А, и работают либо с изолированной нейтра-

лю, либо с частичным заземлением нейтрали. В кабельных сетях 6 кВ собственных нужд, имеющих электрическую связь с внешней сетью (например, получающих питание с шин ГРУ ТЭЦ или через реактированное ответвление от генератора энергоблока), режим заземления нейтрали определяется суммарным емкостным током $I_{C\Sigma}$ внешней электрической сети.

1.1.2 Объекты кабельных сетей 6–10 кВ и их особенности. Обобщенная структурная схема электрической кабельной сети 6–10 кВ промышленного электроснабжения с выделением в ней основных объектов и зон показана на рис. 1.1. В кабельных сетях 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения можно выделить следующие объекты, различающиеся условиями применимости устройств защиты от ОЗЗ: ЦП – центр питания (шины 6–10 кВ главных понизительных подстанций (ГПП) или генераторного распределительного устройства (ГРУ) ТЭЦ); РП и РТП – распределительные или распределительно-трансформаторные подстанции; ТП – трансформаторные подстанции.

На рис. 1.1 зона 1 – зона питающих КЛ, связывающих ЦП с РП и РТП или непосредственно с ТП. Зона 2 – зона питающих КЛ, связывающих РП с ТП. Зона 3 содержит распределительные КЛ, связывающие электроприемники (трансформаторы 6–10/0,4 кВ и ЭД) с шинами ТП.

Для питающих КЛ зоны 1 характерны наибольшие значения отношения собственного емкостного тока защищаемого присоединения к суммарному емкостному току сети $I_{C\text{соб}}/I_{C\Sigma}$, что, как будет показано ниже, существенно ограничивает возможности применения наиболее простых максимальных токовых защит от ОЗЗ.

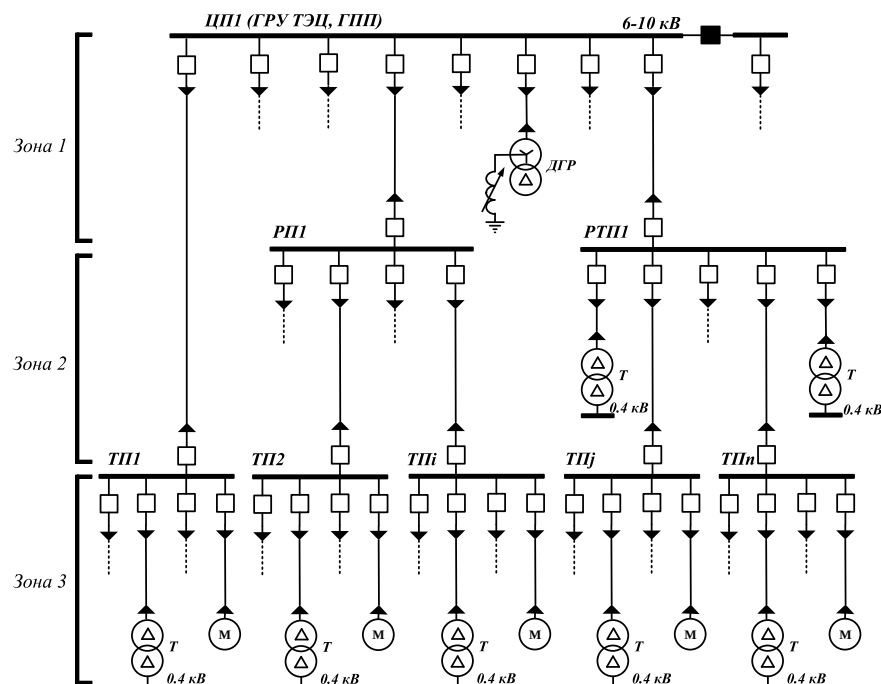


Рисунок 1.1 – Обобщенная схема электрической кабельной сети 6–10 кВ

Для распределительных КЛ зон 2 и 3, соединяющих электроприемники с шинами источника (ТП или РТП), характерны небольшие длины и, соответственно, небольшие значения $I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma}$, упрощающие применение токовых защит от ОЗЗ.

В табл. 1.1 и 1.2 приведены примерные диапазоны изменения и средние значения основных параметров кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения. При оценке приведенных в табл. 1.1 и 1.2 параметров кроме данных по кабельным сетям 6–10 кВ, собранных в рамках данной работы, использовались также данные, приведенные в [42, 70].

Таблица 1.1 – Значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения, питаемых от шин 6–10 кВ понизительных подстанций (ГПП)

Параметр		Значение параметра для объектов сети		
		Секция ЦП	Секция РП	Секция ТП
Суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$, 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
Относительное значение собственного емкостного тока присоединений, подключенных к шинам объекта $I_{C\text{собс}}^* = I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma}$	Диапазон значений	0,01 – 0,6 (99%)	0,01 – 0,4 (99%)	0,01 – 0,1 (98%)
	Среднее значение	~0,1	~0,03	~0,01

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

Параметр	Значение	
	Диапазон	Среднее
Суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$, А	20 – 400	
Число КЛ, подключенных к шинам секции	10 – 20	15
Длина КЛ, подключенных к шинам секции, км	0,1 – 4	0,86
Сечение КЛ, подключенных к шинам секции, мм ²	120 – 925	370 (2x185)
Относительное значение собственного емкостного тока присоединений, подключенных к шинам секции $I_{C\text{собс}}^* = I_{C\text{собс}}/I_{C\Sigma}$	0,01 – 0,3	0,075

На всех КЛ независимо от типа объекта при наличии на них кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) в соответствии с требованиями ПУЭ [10] должна предусматриваться установка стационарных устройств защиты от ОЗЗ. В отличие от кабельных сетей промышленного электроснабжения, на шинах ТП сетей 6–10 кВ городского электроснабжения, как правило, нет отходящих КЛ, поэтому на ТП городских кабельных сетей установка стационарных устройств защиты от ОЗЗ не предусматривается. Как и в кабельных сетях 6–10 кВ промышленного электроснабжения, питающие РП (или РТП) кабельные линии городских кабельных сетей могут иметь длину от сотен метров до единиц километров. Суммарная длина кабельных шлейфов, питающих ТП, также может достигать 3–5, а иногда и более километров.

На ЦП и в некоторых случаях на РП (РТП) предусматривается установка трансформаторов напряжения для контроля изоляции (ТНКИ), имеющих вторичную обмотку, соединенную по схеме разомкнутого треугольника для получения напряжения $3U_0$. На ТП кабельных сетей промышленного электроснабжения ТНКИ, как правило, не устанавливаются. Отсутствие ТНКИ не позволяет применить на присоединениях, подключенных к шинам защищаемого объекта, значительно более универсальные направленные защиты. Поэтому в аспекте создания комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ актуальной задачей является также повышение технического совершенства и расширение области применения максимальных токовых защит от данного вида повреждений, не требующих цепей напряжения $3U_0$.

1.2 Разновидности однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ и задачи их распознавания

1.2.1 Классификация разновидностей ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ по степени их опасности для сети и поврежденного элемента. Как уже отмечалось выше, в кабельных сетях 6–10 кВ принято различать 2 основных вида ОЗЗ: устойчивые и неустойчивые. Ток УОЗЗ содержит только принужденные составляющие промышленной частоты и высшие гармоники. При ограниченных в соответствии с требованиями ПУЭ [10] значениях тока в месте повреждения УОЗЗ не представляет опасности для поврежденной КЛ и сети в

целом, поэтому защита питающих линий (зоны 1 и 2, рис. 1.1), а также распределительных линий, питающих трансформаторы 6–10/0,4 кВ, при УОЗЗ может действовать на сигнал. Ток УОЗЗ может представлять опасность, прежде всего, для электрических машин: для электродвигателей при ОЗЗ в обмотке статора в зависимости от мощности $P_{ном}$ опасным считается значение остаточного тока в месте повреждения 5 А (при $P_{ном} \geq 2$ МВт) или 10 А (для всех остальных ЭД). Для турбогенераторов, работающих на сборные шины, опасным считается значение суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma} = 5$ А независимо от наличия или отсутствия компенсации [10]. При указанных значениях тока УОЗЗ в месте повреждения защита электрических машин должна действовать на отключение.

Неустойчивые ОЗЗ имеют дуговой прерывистый характер и, соответственно, сложную прерывистую форму тока, в котором преобладают свободные составляющие переходного процесса. Амплитуды бросков переходного тока в кабельных сетях 6–10 кВ в зависимости от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$, удаленности точки ОЗЗ от шин, напряжения на поврежденной фазе в момент пробоя изоляции, параметров линий электрической сети и других факторов могут достигать значений до сотен и даже тысяч ампер [1, 4, 8, 41, 43, 70, 119–123 и др.].

Все неустойчивые дуговые ОЗЗ принято делить на 2 основные разновидности: однократные самоустраняющиеся пробой изоляции («мгновенные земли», «клевки земли») и длительно существующие дуговые прерывистые ОЗЗ (ДПрОЗЗ).

Основную опасность для сети представляют дуговые перемежающиеся ОЗЗ (ДПОЗЗ) – разновидность ДПрОЗЗ, сопровождающихся накоплением дополнительного заряда на фазах сети и ростом перенапряжений на неповрежденных фазах при повторных зажиганиях заземляющей дуги. Накопление дополнительного заряда на емкостях фаз сети возможно только при небольших интервалах времени между повторными пробоями изоляции, поэтому максимальные кратности перенапряжений на неповрежденных фазах $K_{пер} = U_{макс}/U_{ф.н}$ возникают в кабельных сетях с изолированной нейтралью при ДПОЗЗ по теории W. Petersen (повторные зажигания дуги через минимальные интервалы времени, равные половине периода рабочей частоты $T_{50}/2 = 10$ мс) и могут достигать значений до 4 и более [1–4, 17, 19, 21, 38 и др.]. По данным [124, 125], полученным на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью реальной конфигурации, в удаленных от места ОЗЗ точках кабельных сетей 6–10 кВ и в месте повреждения кратности перенапряжений могут превышать последние на шинах ЦП и до-

стигать значений порядка ~ 6 . Максимальные кратности перенапряжений, соответствующие теориям ДПОЗЗ J. Peters и J. Slepian и Белякова Н.Н., меньше, чем по теории W. Petersen, и не превышают значений 3,2–3,6 [1, 39, 40]. Однако даже такие кратности дуговых перенапряжений представляют опасность не только для ослабленной изоляции, но и для элементов с нормальной изоляцией, прежде всего, для электрических машин. Возникающие при ДПОЗЗ перенапряжения являются основной причиной возникновения повторных пробоев изоляции в точках сети с ослабленной изоляцией и переходов ОЗЗ в двойные или многоместные замыкания на землю, сопровождаемые отключением двух или более присоединений штатным действием релейной защиты от КЗ.

Опасность ДПОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ связана не только с перенапряжениями на неповрежденных фазах, но и с термическим действием тока в месте повреждения. Приблизленно опасность тока ДПОЗЗ для поврежденного элемента можно оценить по среднеквадратичному (эффективному) значению тока в месте повреждения. По данным исследований, выполненным на анализаторе волновых и переходных процессов Дрезденского технического университета (Netzanalizator) [41], а также исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ в системе Simulink [42], при ДПОЗЗ по теории W. Petersen вблизи шин ЦП среднеквадратичное значение тока в месте повреждения может увеличиваться в 10 и более раз. Такое значительное увеличение эффективного значения тока в месте повреждения может представлять опасность не только для изоляции электрических машин, но и для КЛ, обусловив недопустимый нагрев изоляции.

Из изложенного следует, что ДПОЗЗ представляют собой самую опасную разновидность ОЗЗ не только для поврежденного элемента, но и для всей электрически связанной кабельной сети в целом. Поэтому защита от ОЗЗ должна рассматриваться не только как защита элемента, на котором она установлена, но и как защита сети в целом от перенапряжений при ДПОЗЗ. Предотвратить или минимизировать ущерб за счет негативных последствий ДПОЗЗ, как правило, можно только действием защиты на отключение.

В реальных кабельных сетях условия гашения и повторных зажигания заземляющих дуг зависят от большого числа факторов: величины и характера тока ОЗЗ (емкостный, индуктивный, активный), пробивного напряжения поврежденного места после гашения дуги, переходного сопротивления в месте повреждения, вида диэлектрика, непосредственно контактирующего с дуговым каналом, интенсивности охлаждения места повреждения, давления в зоне горения дуги, возможности растяжения дуги и др. [26].

Большое разнообразие локальных мест ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и факторов, влияющих на условия горения и гашения заземляющих дуг, приводят к тому, что интервалы времени между повторными пробоями изоляции и зажиганиями заземляющей дуги могут быть больше, чем принимаемые в соответствии с теориями W. Petersen, J. Peters и J. Slepian и Беякова Н.Н. Увеличение интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги приводит к уменьшению перенапряжений и среднеквадратичного значения тока в месте повреждения. Такие дуговые прерывистые ОЗЗ не представляют большой опасности для сети и не требуют быстрого отключения. В частности, такой характер дуговые прерывистые ОЗЗ имеют прежде всего в компенсированных сетях, в которых при небольших расстройках компенсации (до $\pm 5\%$) интервалы времени между повторными пробоями, составляют, как правило, от 5 до 10–15 периодов промышленной частоты [1, 4, 26], а величина возникающих при повторных зажиганиях заземляющей дуги перенапряжений не превышает последних при первоначальном пробое изоляции. Возникновение таких ДПрОЗЗ с достаточно большими интервалами времени между повторными пробоями возможно и в кабельных сетях с изолированной нейтралью, например, в начальной стадии развития повреждения изоляции КЛ или электрической машины. Заземление нейтрали сети через высокоомный резистор ограничивает перенапряжения до безопасного уровня даже при минимальных интервалах времени (10 мс) между повторными пробоями изоляции. Очевидно, такие ДПрОЗЗ не требуют немедленного отключения поврежденного элемента от сети, и защита может действовать на сигнал. Следует, однако, отметить, что, хотя перенапряжения при ДПрОЗЗ не представляют опасности для сети, среднеквадратичное значение тока в месте повреждения в некоторых случаях может превышать величину суммарного емкостного тока сети I_{CS} . Поэтому ДПрОЗЗ в некоторых случаях могут представлять большую опасность для поврежденного элемента, чем УОЗЗ.

Еще меньшую опасность для сети представляют кратковременные самоустраниющиеся ОЗЗ («клевки земли», «мгновенные замыкания на землю» – КрОЗЗ), поэтому необходимости в действии защиты от ОЗЗ на отключение при такой разновидности ОЗЗ нет. Однако КрОЗЗ, как правило, предшествуют всем остальным разновидностям ОЗЗ (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ, УОЗЗ), и их селективная фиксация с определением зоны повреждения (т.е. участка КЛ или элемента, который можно отключить для проведения высоковольтных испытаний), может быть использована для диагностирования состояния изоляции элементов сети

[6, 8, 31]. По данным [6, 8, 31] селективной фиксацией КрОЗЗ и использованием информации о них в целях профилактики изоляции можно предотвратить до 50% внезапных отключений КЛ и до 1/3 отключений высоковольтных электродвигателей.

Из изложенного выше можно сделать вывод, что для уменьшения аварийности в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ ущербов от ОЗЗ, как основной цели и главного показателя эффективности функционирования защиты от данного вида повреждений, недостаточно просто определить поврежденное присоединение (направление) при всех возможных разновидностях замыканий на землю, но необходимо также обеспечить распознавание этих разновидностей для автоматической оценки степени опасности повреждения и выбора соответствующего способа действия защиты (на сигнал или на отключение). Поэтому если даже на основе упомянутого во введении многофункционального принципа выполнения защиты от ОЗЗ обеспечить 100%-ю селективность в существующем понимании этого термина (способность определить поврежденное присоединение или направление [11]) и устойчивость функционирования, т.е. создать практически идеальную защиту, указанная выше главная цель функционирования защиты – повышение надежности работы защищаемой сети – достигнута не будет. Поэтому реализация комплексного многофункционального подхода к повышению технического совершенства защиты от ОЗЗ предполагает также необходимость расширения существующего понятия селективности, которое должно включать не только способность определять поврежденное присоединение при всех разновидностях ОЗЗ, но и способность распознавания этих разновидностей в сетях с любыми режимами заземления нейтрали.

1.2.2 Критерий опасности дуговых прерывистых ОЗЗ для контролируемой сети.

В [26] отмечается, что опасными для сети следует считать кратности перенапряжений, превышающие последние при первом пробое изоляции. Расчеты, выполненные разными авторами для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, дают значения кратности перенапряжений при первом пробое изоляции на максимуме фазного напряжения $K_{пер. расч} \approx 2,2–2,7$ [1, 21, 26, 40, 123–125 и др.]. Поэтому с некоторым запасом в качестве критерия, позволяющего отличать опасные для сети дуговые прерывистые ОЗЗ от относительно безопасных, в данной работе принимаются значения расчетной кратности перенапряжений при повторных зажигании дуги $K_{пер. расч} \approx 2,5$. Следует отметить, что экспериментальные оценки кратности перенапряжений при первом пробое изоляции в действующих кабельных сетях 6–10 кВ дают всегда меньшие, чем полученные на

расчетных моделях, значения $K_{пер. экс} \approx 2,2$ [1, 2, 40 и др.]. По данным [например, 1, 123] расчетные оценки максимальных перенапряжений, как правило, примерно на $\sim 10\%$ превышают значения, полученные в действующих кабельных сетях. Поэтому можно полагать, что при тех же самых условиях возникновения и горения прерывистой заземляющей дуги (параметры сети, место ОЗЗ и т.д.) расчетным значениям кратности перенапряжений при повторных пробоях изоляции $K_{пер. расч} \approx 2,5$ в условиях реальной сети будут соответствовать относительно безопасные для сети значения $K_{пер. экс} \approx 0,9$, $K_{пер. расч} \approx 2,4$.

Учитывая изложенное выше, в дальнейшем под дуговыми перемежающимися ОЗЗ будем понимать такую разновидность дуговых прерывистых ОЗЗ, при которых расчетные кратности перенапряжений $K_{пер. расч}$ при повторных зажиганиях заземляющей дуги достигают значений $\sim 2,5$.

1.2.3 О способах распознавания опасных и неопасных для сети дуговых прерывистых ОЗЗ. Для оценки степени опасности дугового прерывистого ОЗЗ для защищаемой сети в целом в принципе может быть использован прямой контроль максимальных значений фазных напряжения, однако такое выполнение защиты требует подведения в качестве входных информационных величин не только тока и напряжений нулевой последовательности, но и трех фазных напряжений, что может привести к необоснованному увеличению сложности устройства (алгоритма функционирования) защиты. Более перспективным представляется применение способов косвенного контроля величины указанных перенапряжений.

Известно, что кратности перенапряжений на поврежденной и неповрежденных фазах при дуговых прерывистых ОЗЗ в основном определяются интервалами времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, условиями ее гашения и временем горения. Поэтому, контролируя величину интервалов времени между повторными пробоями изоляции, можно косвенно оценить и величину соответствующих им максимальных перенапряжений.

От величины интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги зависит общий уровень ВГ в токе и напряжении нулевой последовательности. Поэтому для косвенного контроля величины перенапряжений при дуговых неустойчивых ОЗЗ и степени их опасности для сети в принципе можно использовать также измерение общего уровня ВГ в напряжении $3U_0$ или в токе $3I_0$ защищаемого присоединения. Косвенный способ оценки величины перенапряжений по общему уровню ВГ в токе $3I_0$

представляет особый интерес для защит от ОЗЗ, применяемых на таких объектах кабельных сетей 6–10 кВ, как РП и ТП, на которых не всегда устанавливаются ТНКИ, позволяющие измерить все фазные напряжения и напряжение $3U_0$.

Однако каких-либо исследований, позволяющих оценить взаимосвязь между величиной перенапряжений и интервалами времени между повторными пробоями изоляции или величиной перенапряжений и общим уровнем ВГ в напряжении $3U_0$ и токе $3I_0$, насколько известно автору, не проводилось. Исследование указанных зависимостей в целях выбора наиболее простых и эффективных способов распознавания опасных и неопасных для сети дуговых прерывистых ОЗЗ является актуальной задачей при создании комплексной многофункциональной защиты от данного вида повреждений для кабельных сетей 6–10 кВ.

1.3 Классификация принципов выполнения и основных свойств устройств защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ

1.3.1 Классификация устройств защиты от ОЗЗ по принципу действия. Как уже отмечалось выше, различие режимов заземления нейтрали, применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ определяет различие принципов выполнения селективной защиты от данного вида повреждений. Принципы выполнения защиты от ОЗЗ, в свою очередь, определяются *родом используемых для действия защиты электрических величин и способом обеспечения селективности ее функционирования.*

Практически все известные исполнения устройств защиты от ОЗЗ используют для действия токи и напряжение нулевой последовательности. По роду используемых для действия составляющих токов и напряжения нулевой последовательности все устройства защиты от ОЗЗ можно разделить на три группы:

- 1) устройства, основанные на использовании различных составляющих токов и напряжения нулевой последовательности *установившегося режима ОЗЗ*;
- 2) устройства, основанные на использовании токов и напряжения нулевой последовательности *переходного режима ОЗЗ*;
- 3) комбинированные устройства, основанные на использовании различных составляющих токов и напряжения нулевой последовательности как *переходного*, так и *установившегося режима ОЗЗ*.

К первой группе относятся:

- устройства защиты, основанные на использовании составляющих промышленной частоты токов $3i_0$ и напряжения $3u_0$;
- устройства защиты, основанные на использовании высших гармонических составляющих токов $3i_0$ и напряжения $3u_0$;
- устройства защиты, основанные на использовании искусственно создаваемых составляющих не промышленной частоты токов $3i_0$ и напряжения $3u_0$ («наложенных токов»).

В устройствах защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ основное применение получили следующие способы обеспечения селективности функционирования:

- 1) способ максимальной токовой защиты абсолютного замера, основанный на сравнении значения контролируемой составляющей тока $3I_0$ в защищаемом присоединении с уставкой, обеспечивающей несрабатывания при внешних ОЗЗ и в режимах без ОЗЗ;
- 2) способ максимальной токовой защиты относительного замера, основанный на сравнении между собой контролируемых составляющих тока $3I_0$ в присоединениях, подключенных к шинам защищаемого объекта, и определении присоединения с максимальным значением воздействующей величины;
- 3) способ максимальной токовой защиты относительного замера, основанный на сравнении значений контролируемых составляющих фазных токов между собой;
- 4) способ направленной защиты абсолютного замера, основанный на контроле фазных соотношений используемых для действия защиты составляющих тока и $3i_0$ и напряжения $3u_0$ (контроле направления мощности);
- 5) способ направленной защиты относительного замера, основанный на сравнении между собой (прямом или косвенном) фазных соотношений контролируемых составляющих тока $3i_0$ и определении присоединения с фазой тока, отличной от фаз токов в других присоединениях.

Защиты по способам 3 и 5, основанные на использовании принципов относительного замера, требуют централизованного исполнения и поэтому получили меньшее применение, чем защиты абсолютного замера. В кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали основное применение получили максимальные токовые и направленные защиты, основанные на использовании составляющих промышленной частоты. В компенсированных кабельных сетях в основном применяются максимальные токовые защиты абсолютного и относи-

тельного замера ВГ. Ограниченное применение, в основном, в компенсированных сетях, получили направленные защиты абсолютного замера на основе переходных процессов.

1.3.2 Основные свойства устройств защиты от ОЗЗ, использующих различные принципы действия. Принцип действия определяет ряд основных свойств защиты, характеризующих эффективность ее применения в составе комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ. К таким свойствам относятся: основная область применения (по режиму заземления нейтрали), влияние на селективность и устойчивость функционирования величины собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{C\text{собс}}$, непрерывность действия измерительного органа защиты в установившемся и переходных режимах ОЗЗ, разновидности ОЗЗ, на которые реагирует защита, возможность распознавания разновидностей ОЗЗ.

Перечень основных свойств, обеспечиваемых принципом действия защиты от ОЗЗ, приведен в табл. 1.3.

Анализ данных, приведенных в табл. 1.3, показывает, что получить комплексное решение в части защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, обеспечивающее селективную фиксацию и распознавание всех разновидностей ОЗЗ (УОЗЗ, ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ, КрОЗЗ) и непрерывность действия при УОЗЗ, можно только на многофункциональной основе, т.е. при совместном использовании для каждого из режимов нейтрали не одной, а нескольких функций защиты на основе электрических величин как установившегося режима, так и переходного процесса при ОЗЗ, т.е. использующих разные принципы действия.

Состав функций комплексной многофункциональной защиты, в общем случае будет также различным для индивидуального (на одно присоединение) и централизованного (на все присоединения защищаемого объекта) исполнений устройства защиты от ОЗЗ. В настоящей работе основными являются задачи, связанные с разработкой комплексной многофункциональной защиты индивидуального (на одно присоединение) исполнения для микропроцессорных терминалов РЗА присоединений 6–10 кВ. Задачи, связанные с разработкой комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ централизованного исполнения, являются предметом отдельных исследований и разработок.

С учетом этого ниже дается сравнительный анализ основных достоинств и недостатков, условий применимости и области возможного применения известных исполнений защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, выполненных на основе принципов, которые могут быть использованы в комплексной многофункциональной защите индивидуального исполнения.

Таблица 1.3 – Принцип действия и основные свойства устройств защиты от ОЗЗ

Принцип действия		Свойства					
Электрические величины, используемые для действия защиты	Способ обеспечения селективности	Основная область применения	Типы объектов, на которых возможно применение защиты	Зависимость области применения от значения $I_{C\text{ собс}}$	Виды ОЗЗ, на которые реагирует защита	Непрерывность действия	Способность распознавать разновидности ОЗЗ
Составляющие рабочей частоты $3I_0$ и $3U_0$	Максимальная токовая защита абсолютного замера	Кабельные сети с изолированной нейтралью и резистивными режимами заземления нейтрали	ЦП, РП, ТП	Существенно зависит	УОЗЗ ДПОЗЗ	При УОЗЗ	Не обладает
	Направленная токовая защита абсолютного замера		ЦП	Не зависит	УОЗЗ ДПОЗЗ	При УОЗЗ	Не обладает
Высшие гармоники $3I_0$ и $3U_0$	Максимальная токовая защита абсолютного замера ВГ	Компенсированные кабельные сети	ЦП, РП, ТП	Существенно зависит	УОЗЗ	При УОЗЗ	Не обладает
	Максимальная токовая защита относительного замера ВГ в присоединениях		ЦП, РП, ТП	Практически не зависит	УОЗЗ (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ – при параллельном замере)	При УОЗЗ	Не обладает

Продолжение табл. 1.3

Принцип действия		Свойства					
Электрические величины, используемые для действия защиты	Способ обеспечения селективности	Основная область применения	Типы объектов, на которых возможно применение защиты	Зависимость области применения от значения $I_{C\text{ собс}}$	Виды ОЗЗ, на которые реагирует защита	Непрерывность действия	Способность распознавать разновидности ОЗЗ
Высшие гармоники $3I_0$ и $3U_0$	Направленная токовая защита абсолютного замера	Компенсированные кабельные сети	ЦП	Не зависит	УОЗЗ ДПОЗЗ ДПрОЗЗ	При УОЗЗ	Не обладает
Высшие гармоники фазных токов	Максимальная токовая защита от носительного замера ВГ в фазах	Компенсированные и некомпенсированные кабельные сети	ЦП, РП, ТП	Не зависит	УОЗЗ ДПОЗЗ ДПрОЗЗ	При УОЗЗ	Не обладает
Переходные токи $3i_0$ и напряжение $3u_0$	Направленная защита абсолютного замера с ИО импульсного действия	Компенсированные и некомпенсированные кабельные сети	ЦП	Не зависит	Все разновидности	Не обладает	Не обладает

Принцип действия		Свойства					
Электрические величины, используемые для действия защиты	Способ обеспечения селективности	Основная область применения	Типы объектов, на которых возможно применение защиты	Зависимость области применения от значения $I_{C\text{собс}}$	Виды ОЗЗ, на которые реагирует защита	Непрерывность действия	Способность распознавать разновидности ОЗЗ
Переходные токи $3i_0$ и напряжение $3u_0$	Направленная защита абсолютного замера с ИО непрерывного действия	Компенсированные и некомпенсированные кабельные сети	ЦП	Не зависит	Все разновидности	Обладает (на интервале времени существования переходного тока)	Обладает
Переходные токи $3i_0$	Направленная защита относительного замера с ИО импульсного действия	Компенсированные и некомпенсированные кабельные сети	ЦП, РП, ТП	Не зависит	Все разновидности	Не обладает	Не обладает
	Максимальная токовая защита относительного замера с ИО непрерывного действия	Компенсированные и некомпенсированные кабельные сети	ЦП, РП, ТП	Не зависит	Все разновидности	Обладает (на интервале времени существования переходного тока)	Обладает

1.4 Сравнительный анализ принципов выполнения и известных исполнений индивидуальных защит от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ

1.4.1 Направленные импульсные устройства защиты абсолютного замера на основе переходных процессов. Способ выполнения такой защиты от ОЗЗ был впервые предложен Н. Neugebauer [46]. В большинстве известных исполнений устройств защиты на основе данного принципа в качестве поляризующей величины используется напряжение $3u_0$. К наиболее известным разработкам, основанные на контроле фазных соотношений тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$, получившим практическое применение в электрических сетях среднего напряжения сетях 6–35 кВ, относятся устройство типа ИЗС-1 на электронной базе и микроэлектронное устройство УЗС-01, разработанные ЭНИН [55–57, 61]; микропроцессорное устройство ИЗН-01, разработанное совместно ЭНИН и ИЦ «Бреслер» [63]; устройство типа КЗЗП, разработанное в Донецком политехнической институте и выполненное на электронной базе [44, 45]; устройство типа ПЗЗМ-1, разработанное предприятием НТБЭ (Екатеринбург).

К технически наиболее совершенным из перечисленных устройств следует отнести устройство защиты типа УЗС-01, разработанное в ЭНИН на основе многолетних исследований и разработок, ведущихся с конца 50-х годов [61]. В УЗС-01 учтены особенности электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ как в воздушных, так и в кабельных сетях, поэтому область его применения, в отличие от ИЗС, включает как воздушные 6–35 кВ, так и кабельные сети напряжением 6–10 кВ. Испытания устройства УЗС-01, проведенные на физической модели кабельной сети в ИГЭУ, а также опыт эксплуатации в кабельных сетях 6–10 кВ подтвердили достаточно высокое техническое совершенство данной защиты. В основу микропроцессорного устройства защиты ИЗН-01, разработанного ИЦ «Бреслер» совместно с ЭНИН, в основном положены принципы, реализованные и отработанные в микроэлектронной защите типа УЗС-01 [63]. Данных по опыту эксплуатации данной защиты нет.

Из зарубежных разработок направленных импульсных защит от ОЗЗ, основанных на использовании переходных процессов, следует отметить прежде всего электронное реле типа TRER, разработанное в ГДР для сетей среднего напряжения с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через ДГР [48, 50]. Реле в течение многих лет се-

рийно выпускалось предприятием Elektro-Apparate Werke и экспортировалось в некоторые европейские страны.

В [8, 31] показано, что использование в направленных защитах на основе переходных процессов в качестве поляризующей величины не напряжения u_0 , а его производной du_0/dt обеспечивает нечувствительность к искажениям начальных фазовых соотношений между i_0 и u_0 , обусловленным смещением нейтрали сети при перемежающихся дуговых ОЗЗ или ненулевым значением тока в дугогасящем реакторе в момент пробоя изоляции, а также высокую устойчивость функционирования даже при пробое изоляции в момент прохождения напряжения фазы вблизи нуля. К наиболее известным исполнениям направленных импульсных защит, использующих в качестве поляризующей величины du_0/dt , относится централизованное направленное устройство селективной сигнализации (ЦНУСЗ) типа «Импульс» [8, 31, 58, 59], разработанное в конце 80-х годов в ИГЭУ по способу [126]. Эффективность указанного способа определения поврежденного присоединения подтверждена многолетним опытом эксплуатации ЦНУСЗ «Импульс» в кабельных сетях 6–10 кВ ряда энергосистем (Ивэнерго, Архэнерго, Нижновэнерго, Костромаэнерго, Башкирэнерго и др.) и систем электроснабжения предприятий целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности и др.

Существенным недостатком всех направленных устройств защиты от ОЗЗ импульсного действия является возможность отказов их функционирования под влиянием импульсных помех по цепям тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. При возникновении таких помех в момент фиксации знаков сравниваемых величин возможны искажения контролируемых защитой фазных соотношений (знаков) мгновенных значения тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Импульсные направленные защиты от ОЗЗ по принципу действия не обладают способностью распознавать опасные и неопасные для сети разновидности дуговых прерывистых ОЗЗ.

1.4.2 Направленные устройства на основе переходных процессов с ИО непрерывного действия. Устранить указанные выше недостатки импульсных направленных устройств защиты можно, если измерительный орган направления мощности выполнить таким образом, чтобы контроль направления мощности осуществлялся не однократно в заданный момент времени после пробоя изоляции (момент фиксации знаков сравниваемых величин), а непрерывно на всем интервале времени существования тока переходного процесса. К направленным устройствам защиты, имеющим ИО направления мощности непрерывного действия, относятся устройство защиты типа «Спектр», разработанное в 90-е годы

в ИГЭУ [8, 31, 59, 60, 62], и микропроцессорное устройство направленной индивидуальной защиты от ОЗЗ (УИЗЗ), разработанное ИГЭУ совместно с ООО НПП «АЛИМП» [127, 128].

В отличие от ЦНУС «Импульс» измерительный орган устройства «Спектр» реагирует не на мгновенные соотношения знаков сравниваемых величин du_0/dt и i_0 в заданный момент фиксации, а на знак величины $P_0 = \int \text{sign}(du_0/dt) \cdot \text{sign}(i_0) dt$ для высших гармонических составляющих в интервале времени наблюдения за переходным процессом. При обеспечении достаточной чувствительности устройство «Спектр» может реагировать также на направление реактивной (емкостной) мощности в установившемся режиме ОЗЗ, т.е. представляют собой комбинированное устройство защиты. В опытную эксплуатацию в 90-х годах было установлено 15 экземпляров устройства типа «Спектр». Недостатком устройства «Спектр» оказалась сложность реализации и настройки используемых в нем алгоритмов и технических решений на микроэлектронной базе. В начале 2000-х годов из-за указанных сложностей производство защиты типа «Спектр» в ИГЭУ было прекращено.

Применение микропроцессорной техники и современных методов цифровой обработки сигналов позволяет усовершенствовать алгоритм функционирования направленной защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов с ИО непрерывного действия. Указанные возможности использованы в разработанном в 2009 г. с ООО «АЛИМП» (г. Н. Новгород) совместно с ИГЭУ устройства защиты УИЗЗ на микропроцессорной базе. В УИЗЗ используется новый, более эффективный, чем в устройстве «Спектр», способ, основанный на вычислении взаимной корреляционной функции высокочастотных составляющих тока нулевой последовательности и производной напряжения нулевой последовательности [12, 79]. Опытные образцы УИЗЗ установлены в 2012 г. в эксплуатацию в Ивэнерго.

Учитывая результаты сравнительного анализа известных исполнений направленных устройств защиты на основе переходных процессов, можно сделать вывод о целесообразности применения в разрабатываемой комплексной многофункциональной индивидуальной защите в качестве основной функции защиты от ОЗЗ направленной защиты с ИО непрерывного действия на принципах, используемых в устройствах типа «Спектр» или УИЗЗ. Недостатком устройств «Спектр» и УИЗЗ является отсутствие в них алгоритмов распознавания разновидностей ОЗЗ. Поэтому основными задачами при разработке комплексной многофункциональной защиты является обоснование и выбор наиболее эффективного способа действия направленной защиты в переходных режимах ОЗЗ и разработка функциональных узлов (в цифровых исполнениях защиты – алгоритмов функционирования), обеспечивающих распознавание разновидностей ОЗЗ.

1.4.3 Максимальные токовые защиты, основанные на использовании составляющих промышленной частоты тока нулевой последовательности (ТЗНП). ТЗНП абсолютного замера в силу своей простоты и высокой надежности получила наиболее широкое применение в качестве селективной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали. Для выполнения ТЗНП в кабельных 6–10 кВ используются чувствительные реле тока на электромеханической базе (РТ-40, РТ-140, ЭТД-551), статические реле тока, выполненные в основном на микроэлектронной базе (РСТ-11, РСТ-12, РСТ-40, РТЗ-51), и цифровые исполнения (функции) чувствительной ТЗНП в микропроцессорных терминалах РЗА, предназначенных для применения на линиях среднего напряжения 6–35 кВ.

Условия применимости для всех исполнений ТЗНП (устойчивости несрабатываний при внешних и обеспечение требуемой чувствительности при внутренних устойчивых ОЗЗ) для сетей с изолированной нейтралью можно представить в виде [42]:

$$I_{C\text{собс}^*} = \frac{I_{C\text{собс}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{отс} K_{пер} K_{ч.мин}}, \quad (1.1)$$

где $I_{C\text{собс}} = 3\omega C_0 U_{ф.ном}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения; C_0 – емкость фазы на землю защищаемого присоединения; $I_{C\Sigma} = 3\omega C_{0\Sigma} U_{ф.ном}$ – суммарный емкостный ток электрически связанной сети; $C_{0\Sigma}$ – емкость фазы на землю сети; $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; $K_{ч.мин}$ – минимально допустимый коэффициент чувствительности; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий увеличение значения воздействующей величины ТЗНП в переходных режимах при внешних ДПОЗЗ.

Для электрической сети, работающей с высокоомным заземлением нейтрали через резистор, при сопротивлении заземляющего резистора $R_N \approx X_{C\Sigma} = 1/3\omega C_{0\Sigma}$ условия применимости ТЗНП имеют вид [42]:

$$I_{C\text{собс}^*} = \frac{I_{C\text{собс}}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{(K_{отс} K_{пер} K_{ч.мин})^2}{2}}}. \quad (1.2)$$

Из (1.1) и (1.2) можно видеть, что при заданных значениях коэффициентов $K_{отс}$ и $K_{ч.мин}$ условия применимости ТЗНП определяются только относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{C\text{собс}^*}$ и значением коэффициента $K_{пер}$. По применяемым в настоящее время методикам расчета уставок по току срабатывания для ТЗНП с электромеханическими реле тока рекомендуется принимать в

(1.1) значение $K_{пер} = 4-5$ [27] или $K_{пер} = 3-5$ [33, 129], с микроэлектронным реле РТЗ-51 – $K_{пер} = 2-3$ [33, 129] или $K_{пер} = 2-2,5$ [130]. В [42, 131, 132] на основе экспериментальных исследований, выполненных с использованием метода физико-математического моделирования, показано, что для электромеханических реле и некоторых микроэлектронных реле (например, РТЗ-51) значения $K_{пер}$ могут быть уменьшены до $\sim 1,5-2$.

Еще более приближенный характер имеют рекомендации по выбору расчетного значения $K_{пер}$ для цифровых исполнений ТЗНП на микропроцессорной базе. Так в [33, 129] для ТЗНП на основе цифровых реле серии SPAC-800 рекомендуется принимать $K_{пер} = 1-1,5$, но при этом делается ссылка на необходимость уточнить значение $K_{пер}$ у фирмы-изготовителя. В [133] для ТЗНП на основе этих же микропроцессорных терминалов рекомендуется принимать $K_{пер} = 1,5-2,0$ также со ссылкой на необходимость уточнить значение коэффициента у фирмы-изготовителя. В [134] для ТЗНП на базе МП терминалов РЗА серии SEPAM рекомендуется принимать $K_{пер} = 1,0-1,5$. При этом ни в одном из указанных источников не даются какие-либо обоснования указанных значений коэффициента броска для микропроцессорных исполнений ТЗНП. Также в существующих методиках отсутствуют рекомендации по выбору $K_{пер}$ в кабельных сетях, работающих с высокоомным заземлением нейтрали.

Отсутствие обоснованных рекомендаций по выбору значений $K_{пер}$ при расчетах уставок срабатывания ТЗНП, очевидно, является основной причиной достаточно частых нарушений селективности несрабатываний защит данного типа при внешних ОЗЗ. Средняя оценка селективности для исполнений ТЗНП с электромеханическими реле тока по данным анализа ОРГРЭС равна 2, для ТЗНП на базе статических реле тока – 3 [12].

Оценим приближенно возможности применения на различных объектах кабельных сетей 6–10 кВ цифровых исполнений ТЗНП. Принимая $K_{отс} = 1,25$, $K_{пер} = 2$ и $K_{ч. мин} = 1,5$, из (1.1) получим

$$I_{C_{собс}^*} = \leq \frac{1}{1 + 1,25 \cdot 2 \cdot 1,5} \approx 0,2,$$

т.е. ТЗНП можно применить только на присоединениях, собственный емкостный ток которых не превышает 20% от суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$.

Доля таких присоединений по данным [40] в кабельных сетях с изолированной нейтралью на ГПП не превышает $\sim 70\%$, на ТЭЦ – $\sim 90\%$, на РП – $\sim 96\%$, на ТП (сетей промышленного электроснабжения) – $\sim 100\%$.

Несмотря на отмеченные выше недостатки и ограничения по области возможного применения, без использования функции ТЗНП невозможно обеспечение непрерывности действия при УОЗЗ на объектах кабельных сетей 6–10 кВ, не оборудованных ТНКИ (РП и ТП). Поэтому важной задачей является разработка методов повышения технического совершенства ТЗНП – чувствительности при внутренних УОЗЗ и ДПОЗЗ при обеспечении достаточной отстроенности от внешних ДПОЗЗ.

На присоединениях, для которых условия (1.1) и (1.2) не выполняются, должны применяться токовые направленные защиты (ТНЗНП), условия применимости которых не зависят от значения собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{C\text{собс}}^*$.

1.4.4 Токовые направленные защиты от ОЗЗ на основе составляющих промышленной частоты тока и напряжения нулевой последовательности (ТНЗНП). В России для выполнения ТНЗНП во ВНИИЭ разработаны и выпускаются серийно ЧЭАЗ два типа направленных устройств защиты: ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) и ЗЗН [28, 29, 32]. В составе комплектного микроэлектронного устройства РЗА типа ЯРЭ-2201 предусмотрен блок МО110, принцип работы которого и область применения аналогична последним реле ЗЗП-1 [135]. Функции ТНЗНП имеются также в большинстве микропроцессорных устройств РЗА для присоединений 6–35 кВ.

Анализ опыта эксплуатации направленных устройств защиты от ОЗЗ типа ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) в электрических сетях 6–10 кВ, выполненный в 2000 г. ОРГРЭС [12], показал, что в целом эффективность функционирования защит от ОЗЗ данного типа едва ли можно считать приемлемой: средняя оценка селективности более 200 эксплуатируемых устройств ТНЗНП, выполненных с реле типа ЗЗП-1 (ЗЗП-1М), составляет 2,5, что объясняется частыми излишними срабатываниями защиты при отключении ОЗЗ, а также при ДПОЗЗ. Возможность излишних срабатываний защиты ЗЗП-1 отмечается также в [34, 136].

Защита ЗЗП-1 и блок МО110 реагируют на направление полной (емкостной) мощности нулевой последовательности и имеют угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч.} = 90^\circ$, что оптимально для сети с изолированной нейтралью. В сетях с заземлением нейтрали через высокоомный резистор сдвиг фаз между напряжением $3U_0$ и током $3I_0$ в поврежденном присоединении существенно отличается от 90° (примерно 135° при высокоомном заземлении нейтрали через резистор $R_N \approx X_{c\Sigma}$). Поэтому применение реле типа ЗЗП-1 или блока МО110 устройства ЯРЭ2201 с углом

максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч.} \approx 90^0$ в таких сетях может привести к отказам срабатывания защиты при внутренних ОЗЗ.

Для замены устройств типа ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) ЧЭАЗ с 1998 г. освоен выпуск нового реле типа ЗЗН, разработанного во ВНИИЭ [32]. Устройство защиты ЗЗН, выполненное на микроэлектронной базе, предназначено для применения в сетях для сетей с изолированной или заземленной через активный резистор нейтралью, а также с частичной компенсацией емкостного тока. Во входных цепях тока и напряжения нулевой последовательности предусмотрены полосовые фильтры с одинаковыми частотными характеристиками, выделяющие составляющую промышленной частоты 50 Гц, что, по мнению разработчиков, должно обеспечить повышение устойчивости функционирования защиты при ДПОЗЗ (т.е. динамической устойчивости функционирования). Аналогичный подход применяется, как правило, и в цифровых исполнениях ТНЗНП большинства фирм-разработчиков микропроцессорных устройств РЗА, однако данные об эффективности такого способа повышения динамической устойчивости функционирования ТНЗНП в источниках отсутствуют.

Учитывая указанные выше существенные ограничения по возможностям применения ТЗНП на ГПП и ГРУ ТЭЦ, для ЦП кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали, в качестве функции, обеспечивающей непрерывность действия комплексной многофункциональной защиты при УОЗЗ, более эффективной, чем ТЗНП, представляется функция ТНЗНП, а основной задачей, связанной с повышением ее технического совершенства, является исследование и разработка способов повышения динамической устойчивости функционирования цифровых исполнений ТНЗНП при ДПОЗЗ.

1.4.5 Токовые защиты абсолютного замера ВГ. В России максимальные токовые защиты, основанные на контроле общего уровня ВГ в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения, получили наиболее широкое применение в компенсированных сетях 6–10 кВ. К ним относится, прежде всего, устройство типа УСЗ-2/2, разработанное во ВНИИЭ и выпускаемое ЧЭАЗ [35–37]. Функция защиты от ОЗЗ на принципе абсолютного замера ВГ предусмотрена также в некоторых исполнениях цифровых устройств РЗА на микропроцессорной базе, например, в SPAC 801-13 и SPAC 801-113 фирмы АББ.

В указанных устройствах защиты для действия, как правило, используется диапазон частот от 150 до 650 Гц [35–37]. С достаточной точностью можно принять, что

распределение ВГ в диапазоне 150–650 Гц в токах нулевой последовательности соответствует распределению емкостных токов промышленной частоты в сети с изолированной нейтралью [137]. С учетом этого для обеспечения несрабатываний защиты при внешних УОЗЗ и максимальном уровне ВГ в токе $3I_{0i}$ защищаемого присоединения ток срабатывания защиты на данном присоединении должен выбираться из условия:

$$I_{0\text{с.з.}i} \geq K_{отс} \alpha_{\text{макс}} I_{ci}, \quad (1.3)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; I_{ci} – собственный емкостный ток i -го присоединения; $\alpha_{\text{макс}}$ – максимально возможный уровень ВГ в I_{ci} .

Учитывая, что при дуговых прерывистых ОЗЗ общий уровень ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения резко возрастает, несрабатывания защит рассматриваемого типа при внешних ДПрОЗЗ (включая ДПОЗЗ) обеспечиваются, как правило, блокировкой действия при прерывистом характере входного тока. Например, в устройстве токовой защиты абсолютного замера ВГ типа УСЗ-2/2 отстройка от ДПрОЗЗ, включая однократные самоустраняющиеся пробой изоляции, обеспечивается за счет задержки на срабатывание на время 20–30 мс и быстрого возврата измерительной части защиты после гашения заземляющей дуги [35–37].

Коэффициент чувствительности защиты при внутреннем УОЗЗ на i -м присоединении

$$K_{ci} = \frac{\alpha_{\text{мин}}(I_{c\Sigma} - I_{ci})}{I_{0\text{с.з.}i}} \geq K_{\text{ч.мин}}, \quad (1.4)$$

где $I_{c\Sigma}$ – суммарный емкостный ток сети; $\alpha_{\text{мин}}$ – минимальный уровень высших гармоник в токах $I_{c\Sigma}$ и I_{ci} ; $K_{\text{ч.мин}}$ – минимально допустимый коэффициент чувствительности защиты.

Из (1.3) и (1.4) получим условие применимости максимальной токовой защиты абсолютного замера ВГ:

$$I_{ci}^* = \frac{I_{ci}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{макс}}}{\alpha_{\text{мин}}} K_{отс} K_{\text{ч.мин}}} = \frac{1}{1 + Z K_{отс} K_{\text{ч.мин}}}, \quad (1.5)$$

где Z – параметр, характеризующий степень нестабильности общего уровня ВГ в контролируемой сети.

Минимальный первичный ток срабатывания $I_{0\text{с.з. мин}}$, определяемый техническими возможностями устройства защиты и ТТНП в рабочем диапазоне ВГ должен обеспечивать выполнение условия:

$$I_{0\text{ с.з. мин}} \leq \frac{\alpha_{\text{мин}} I_{\text{с}\Sigma} (1 - I_{\text{с} i^* \text{ макс}})}{K_{\text{ч. мин}}}. \quad (1.6)$$

Из (1.5) и (1.6) можно сделать вывод, что условия применимости токовой защиты абсолютного замера ВГ определяются не только величиной $I_{\text{с} i^* \text{ макс}}$, но также минимальным общим уровнем ВГ $\alpha_{\text{мин}}$ и степенью его нестабильности в токе ОЗЗ Z в контролируемой сети.

Оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ ранее были даны в конце 60-х годов в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. [138, 139]. В работе Кискачи В.М. [137] приводится также оценка параметра нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ – $Z \approx 2,5\text{--}3$. С некоторым запасом в [137] при оценке условий селективности рассматриваемой защиты рекомендуется принимать $Z_{\text{макс}} = 4$.

Принимая $K_{\text{отс}} = 1,5$, $K_{\text{ч. мин}} = 1,5$ и $Z = 4$ из (1.5) получим, что токовые защиты абсолютного замера ВГ могут применяться на присоединениях, имеющих

$$I_{\text{с} i^*} = \frac{1}{1 + 4 \cdot 1,5 \cdot 1,5} = 0,1.$$

Доля таких присоединений от общего числа подключенных к шинам защищаемого объекта на ЦП компенсированных сетей по данным [70] около ~77%, РП – ~90%, на ТП – ~100%. Однако практические показатели селективности работы токовых защит абсолютного замера ВГ, установленных на центрах питания компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, значительно хуже, чем можно было бы ожидать при указанных условиях их применимости. В частности, по результатам анализа ОРГРЭС селективность защиты типа УСЗ-2/2 характеризуется средней оценкой 2,2, а чувствительность – средней оценкой 3,1 [12]. Можно полагать, что основной причиной недостаточно высокой селективности рассматриваемых защит от ОЗЗ является большая, чем до сих пор принимается, степень нестабильности Z общего уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Причиной достаточно низких показателей эффективности функционирования токовых защит абсолютного замера ВГ может быть также не всегда достаточная чувствительность в режимах работы сетей, характеризуемых минимальным уровнем ВГ в токе ОЗЗ.

Функция токовой защиты абсолютного замера ВГ в составе комплексной многофункциональной защиты необходима для обеспечения непрерывности действия при УОЗЗ прежде всего на таких объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, как

РП и ТП, где, как правило, отсутствуют ТНКИ и нельзя применить направленные защиты. Поэтому задачи повышения технического совершенства токовой защиты абсолютного замера ВГ актуальны.

Указанные выше оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ и параметра Z получены на основе упрощенных аналитических методов и моделей кабельных сетей 6–10 кВ и их элементов, ограничивающих возможности исследователей и разработчиков. Учитывая, что в настоящее время по сравнению с 60-ми годами в составе комплексной нагрузки центров питания компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ значительно увеличилась доля нелинейных нагрузок, к основным задачам, на наш взгляд, относятся уточнение оценок возможного диапазона изменения в кабельных сетях 6–10 кВ параметра Z , а также минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей и, на этой основе, области применения токовых защит абсолютного замера ВГ.

В условиях резонансной или близкой к ней настройке ДГР интервалы времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги составляют 5–10 и более периодов промышленной частоты и не сопровождаются опасными перенапряжениями [1, 5, 26 и др.]. В реальных условиях изменяющейся суммарной емкости сети, недостаточных мощностей ДГР, неэффективности или отсутствии систем автоматической настройки компенсации обеспечить режим резонансной настройки компенсации часто оказывается невозможным. При расстройках компенсации порядка 20% и более становится возможным режим многократных пробоев изоляции через небольшие интервалы времени Δt порядка 30–50 мс, сопровождающийся опасными перенапряжениями [26], т.е. возникновение ДПОЗЗ. Как уже отмечалось выше, применяемый в существующих исполнениях токовой защиты абсолютного замера ВГ способ обеспечения селективности ее несрабатываний при внешних дуговых прерывистых ОЗЗ исключает возможность действия защиты не только при внешних, но и при внутренних дуговых прерывистых ОЗЗ, включая опасные для сети ДПОЗЗ. Учитывая это, актуальной задачей является также разработка методов, обеспечивающих возможность функционирования данной защиты не только при УОЗЗ, но и при возможных в реальных компенсированных сетях ДПОЗЗ.

1.4.6 Токовые защиты относительного замера ВГ в фазных токах защищаемого присоединения. Способ предложен Кискачи В.М. [140] и реализован в устройстве защиты типа ЗЗО. В [140] дано лишь качественное описание принципа действия защиты, и отсутствуют какие-либо количественные оценки соотношений токов ВГ в фазах

поврежденного и неповрежденных присоединений, позволяющие оценить условия применимости защиты данного типа.

Как уже отмечалось выше, с достаточной точностью можно принять, что распределение ВГ в диапазоне 150–650 Гц в токах нулевой последовательности соответствует распределению емкостных токов промышленной частоты в сети с изолированной нейтралью [137]. Поэтому для определения соотношений токов ВГ в фазах поврежденного и неповрежденных присоединений можно рассматривать соотношения емкостных токов промышленной частоты по схеме замещения рис. 1.2.

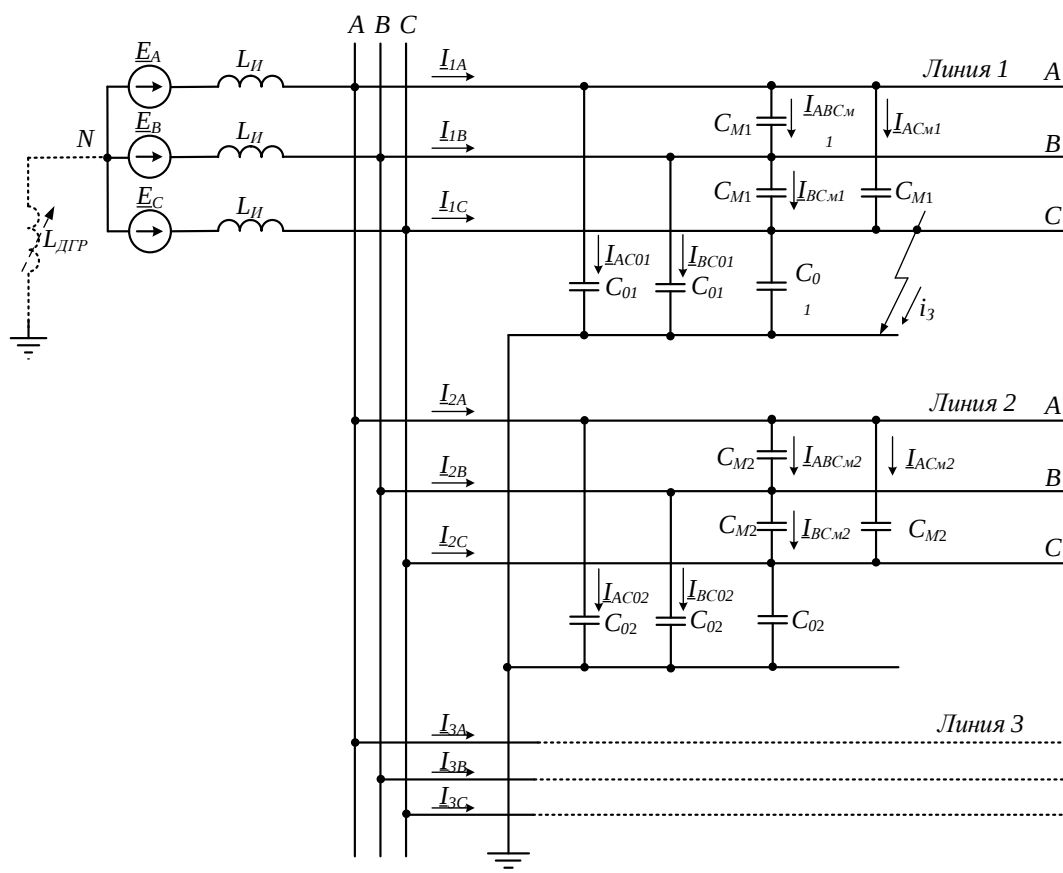


Рисунок 1.2 – К определению соотношений токов ВГ в фазах поврежденного (линия 1) и неповрежденных присоединений (линия 2 и др.)

Полагая, что источником ВГ является ЭДС питающей системы, из схемы замещения для емкостных токов (рис. 1.2) при металлическом ОЗЗ на фазе «С» получим:

– в поврежденной линии Л1:

$$\dot{I}_{1A} = \dot{I}_{ABC_{M1}} + \dot{I}_{AC_{M1}} + \dot{I}_{AC_{01}} = j\omega C_{M1}(\dot{U}_A^{(1)} - \dot{U}_B^{(1)}) + j\omega C_{M1}\dot{U}_A^{(1)} + j\omega C_{01}\dot{U}_A^{(1)}; \quad (1.7)$$

$$\dot{I}_{1B} = \dot{I}_{BAC_{M1}} + \dot{I}_{BC_{M1}} + \dot{I}_{BC_{01}} = -j\omega C_{M1}(\dot{U}_A^{(1)} - \dot{U}_B^{(1)}) + j\omega C_{M1}\dot{U}_B^{(1)} + j\omega C_{01}\dot{U}_B^{(1)}; \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{1C} = & -(\dot{I}_{AC_{M1}} + \dot{I}_{BC_{M1}} + \dot{I}_{AC_{01}} + \dot{I}_{BC_{01}} + \dot{I}_{AC_{02}} + \dot{I}_{BC_{02}} + \dot{I}_{AC_{03}} + \dot{I}_{BC_{03}} + \dots) = \\ = & -j\omega C_{M1} \dot{U}_A^{(1)} - j\omega C_{M1} \dot{U}_B^{(1)} - j\omega C_{01} \dot{U}_A^{(1)} - j\omega C_{01} \dot{U}_B^{(1)} - j\omega C_{02} \dot{U}_A^{(1)} - \\ & - j\omega C_{02} \dot{U}_B^{(1)} - j\omega C_{03} \dot{U}_A^{(1)} - j\omega C_{03} \dot{U}_B^{(1)} - \dots; \end{aligned} \quad (1.9)$$

– в неповрежденной линии Л2:

$$\dot{I}_{2A} = \dot{I}_{AB_{C_{M2}}} + \dot{I}_{AC_{M2}} + \dot{I}_{AC_{02}} = j\omega C_{M2}(\dot{U}_A^{(1)} - \dot{U}_B^{(1)}) + j\omega C_{M2} \dot{U}_A^{(1)} + j\omega C_{02} \dot{U}_A^{(1)}; \quad (1.10)$$

$$\dot{I}_{2B} = \dot{I}_{BAC_{M2}} + \dot{I}_{BC_{M2}} + \dot{I}_{BC_{02}} = -j\omega C_{M2}(\dot{U}_A^{(1)} - \dot{U}_B^{(1)}) + j\omega C_{M2} \dot{U}_B^{(1)} + j\omega C_{02} \dot{U}_B^{(1)}; \quad (1.11)$$

$$\dot{I}_{2C} = -\dot{I}_{AC_{M2}} - \dot{I}_{BC_{M2}} = -j\omega C_{M2} \dot{U}_A^{(1)} - j\omega C_{M2} \dot{U}_B^{(1)}. \quad (1.12)$$

В выражениях (1.7) – (1.12) $\dot{U}_A^{(1)}$, $\dot{U}_B^{(1)}$ – напряжения на фазах «А» и «В» при ОЗЗ на фазе «С». Принимая, что

$$\dot{U}_A^{(1)} = \dot{E}_A - \dot{E}_C; \quad (1.13)$$

$$\dot{U}_B^{(1)} = \dot{E}_B - \dot{E}_C. \quad (1.14)$$

из (1.7) – (1.9) с учетом (1.13) и (1.14) для поврежденного присоединения Л1 при $E_\phi = U_{\phi.ном}$ получим:

$$I_{повр.ф.С} = |\dot{I}_{1C}| = 3E_C \omega (C_{M1} + C_{01} + C_{02} + C_{03} + \dots) = 3U_{\phi.ном} \omega (C_{M1} + C_{0\Sigma}); \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} I_{неп.ф.А} = I_{неп.ф.В} = |\dot{I}_{1A}| &= |j\omega C_{M1}(\dot{U}_A^{(1)} - \dot{U}_B^{(1)}) + j\omega C_{M1} \dot{U}_A^{(1)} + j\omega C_{01} \dot{U}_A^{(1)}| = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \omega U_{\phi.ном} \sqrt{4(1,5C_{M1} + 0,5C_{01})^2 + 3(C_{M1} + C_{01})^2}. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Для неповрежденного присоединения Л2 из (1.10) – (1.12) с учетом (1.13) и (1.14) получим:

$$I_{повр.ф.С} = |\dot{I}_{2C}| = |\omega C_{M2} \dot{U}_A^{(1)} + C_{M2} \dot{U}_B^{(1)}| = 3U_{\phi.ном} \omega C_{M2}; \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} I_{неп.ф.А} = I_{неп.ф.В} = |\dot{I}_{2A}| &= |j\omega C_{M2}(\dot{U}_A^{(1)} - \dot{U}_B^{(1)}) + j\omega C_{M2} \dot{U}_A^{(1)} + j\omega C_{02} \dot{U}_A^{(1)}| = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \omega U_{\phi.ном} \sqrt{4(1,5C_{M2} + 0,5C_{02})^2 + 3(C_{M2} + C_{02})^2}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Для соотношений ВГ в фазах поврежденного и неповрежденных присоединений из (1.15) – (1.18) получим:

– для поврежденной линии Л1:

$$I_{повр.ф.С}^{ВГ} = \alpha |\dot{I}_{1C}| = \alpha 3U_{\phi.ном} \omega (C_{M1} + C_{0\Sigma}); \quad (1.19)$$

$$I_{неп.ф.А}^{ВГ} = I_{неп.ф.В}^{ВГ} = \alpha |\dot{I}_{1A}| = \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} \omega U_{\phi.ном} \sqrt{4(1,5C_{M1} + 0,5C_{01})^2 + 3(C_{M1} + C_{01})^2}. \quad (1.20)$$

– для неповрежденной линии Л2:

$$I_{повр.ф.С}^{ВГ} = \alpha |\dot{I}_{2С}| = \alpha 3U_{ф.ном} \omega C_{М2}; \quad (1.21)$$

$$I_{неп.ф.А}^{ВГ} = I_{неп.ф.В}^{ВГ} = \alpha |\dot{I}_{2А}| = \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} \omega U_{ф.ном} \sqrt{4(1,5C_{М2} + 0,5C_{02})^2 + 3(C_{М2} + C_{02})^2}, \quad (1.22)$$

где α – уровень ВГ в емкостном токе ОЗЗ.

Для устойчивых срабатываний защиты при внутренних ОЗЗ на линии Л1 между токами ВГ в фазах должно выполняться соотношение:

$$I_{повр.ф.С}^{ВГ} - K_{отс} I_{неп.ф.А(В)}^{ВГ} \geq \Delta I_{с.з}, \quad (1.23)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности преобразования первичных токов ВГ в сравниваемые величины, погрешности измерительного органа защиты, неравенство уровней ВГ по фазам и др.); $\Delta I_{с.з}$ – избирательная чувствительность ИО защиты.

При достаточно высокой избирательной чувствительности ИО защиты ($\Delta I_{с.з} \rightarrow 0$) из (1.23) с учетом (1.19) – (1.20) получим:

$$K_{инеп}^{ВГ} = \frac{I_{повр.ф.С}^{ВГ}}{I_{неп.ф.А(В)}^{ВГ}} = \frac{2\sqrt{3}(C_{М1} + C_{0\Sigma})}{\sqrt{4(1,5C_{М1} + 0,5C_{01})^2 + 3(C_{М1} + C_{01})^2}} \geq K_{отс}; \quad (1.24)$$

$$K_{инеп}^{ВГ} = \frac{I_{неп.ф.А(В)}^{ВГ}}{I_{повр.ф.С}^{ВГ}} = \frac{\sqrt{4(1,5C_{М2} + 0,5C_{02})^2 + 3(C_{М2} + C_{02})^2}}{2\sqrt{3}C_{М2}} \geq K_{отс}. \quad (1.25)$$

Для защит на основе ВГ, подключаемых к фазным ТТ, рекомендуется принимать значения коэффициентов, учитывающих погрешности функционирования (коэффициентов отстройки $K_{отс}$, коэффициента чувствительности $K_{ч}$) не меньше, чем 2,0–2,5 [141].

По данным [42, 70] в кабельных сетях 6–10 кВ промышленного и городского собственного присоединения может достигать 35–40% от емкости сети $C_{0i} = (0,35–0,4)C_{0\Sigma}$. Для кабельных сетей 6–10 кВ, выполненных с применением трехжильных кабелей, соотношение между рабочей емкостью и емкостью фазы на землю $K_c = C_{раб}/C_0 = (C_0 + 3C_M)/C_0 \approx 1,5...2,0$.

Принимая $C_{01} = 0,4C_{0\Sigma}$ и $K_c = 2$, из (1.24) и (1.25) получим:

$$K_{инеп}^{ВГ} \approx 3,22 \geq K_{отс} = 2,5;$$

$$K_{инеп}^{ВГ} \approx 3,22 \geq K_{отс} = 2,5,$$

т.е. условия применимости токовой защиты относительного замера ВГ в фазах защищаемого присоединения при принятых выше условиях (источником ВГ является ЭДС источника питания) в кабельных сетях 6–10 кВ выполняются с относительно небольшим запа-

сом. Так как полученные оценки не учитывают влияние на селективность и устойчивость рассматриваемой защиты ВГ фазных токов нагрузки, а также таких факторов, как погрешности фазных ТТ, переходное сопротивление в месте ОЗЗ, неравенство уровней ВГ по фазам сети и др., обеспечить приемлемую устойчивость функционирования защиты по данному способу в реальных условиях функционирования практически невозможно. Поэтому применение рассматриваемой защиты в составе функций комплексной многофункциональной защиты представляется нецелесообразным.

1.4.7 Направленные защиты, основанные на контроле фазных соотношений ВГ тока и напряжения нулевой последовательности. Первые направленные реле защиты от ОЗЗ на основе ВГ, разработанные для компенсированных электрических сетей среднего напряжения, представляли собой обычные реле направления мощности, реагирующие на одну из высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ. Однако такие устройства по принципу своего действия не могут обеспечить требуемую устойчивость функционирования из-за нестабильности частотного спектра высших гармонических составляющих в зависимости от режима работы сети, уровня напряжения состава нагрузки, суточного графика и других факторов.

В [142] предложен способ выполнения направленной защиты от ОЗЗ, предназначенный для применения в основном в компенсированных сетях, основанный на использовании для действия устройства защиты от ОЗЗ не одной гармонической составляющей, а суммы основных ВГ установившегося тока и напряжения нулевой последовательности. Принцип действия устройства по способу [142] основан на использовании соотношений ВГ в токах и напряжении нулевой последовательности, определяемых выражениями:

$$Zi_{0B\Gamma i} = 3C_{0i} \frac{du_{0\epsilon,z}}{dt} = 3C_{0i} \alpha_v \nu \omega U_{1m} \cos(\omega t \alpha_v + \phi_v); \quad (1.26)$$

$$Zi_{0B\Gamma j} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0j}) \frac{du_{0B\Gamma}}{dt} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0j}) \alpha_v \nu \omega U_{1m} \cos(\omega t \alpha_v + \phi_v). \quad (1.27)$$

Из (1.26) и (1.27) можно видеть, что в неповрежденном присоединении формы тока $Zi_{0B\Gamma i}$ и производной напряжения нулевой последовательности $du_{0B\Gamma}/dt$ всегда совпадают, а в поврежденном противоположны.

Рассмотренные соотношения ВГ токов и производной напряжения нулевой последовательности не зависят от нестабильности состава и уровня ВГ, т.е. защиты от ОЗЗ по данному способу адаптивны к изменениям спектра ВГ в контролируемой сети.

Поэтому условия применимости направленных защит на основе ВГ определяются только условиями обеспечения их чувствительности при минимальном уровне ВГ в токе ОЗЗ. Указанный способ реализован в комбинированном устройстве направленной защиты от ОЗЗ типа «Спектр», основанном на использовании высших гармонических составляющих переходного и установившегося режима ОЗЗ.

Учитывая, что токовые направленные защиты на основе принципа абсолютного замера на присоединениях ЦП компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ не имеют существенных ограничений по области применения, в качестве функции, обеспечивающей непрерывность действия комплексной многофункциональной защиты при УОЗЗ, целесообразно использовать функцию рассмотренной направленной защиты на основе ВГ.

1.5 Обоснование состава функций комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ

1.5.1 Состав функций комплексной многофункциональной защиты индивидуального исполнения для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали. С учетом результатов приведенного выше анализа принципов выполнения и известных исполнений устройств защиты от ОЗЗ для сетей, работающих с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали в составе функций комплексной многофункциональной защиты могут быть использованы:

- в качестве основной функции, обеспечивающей устойчивое функционирование и распознавание всех разновидностей дуговых прерывистых ОЗЗ (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ и КрОЗЗ) – направленная защита на основе переходных процессов с ИО непрерывного действия;
- в качестве функций, обеспечивающих непрерывность действия при УОЗЗ – ТНЗНП (для ЦП) и ТЗНП (прежде всего для РП и ТП).

1.5.2 Состав функций комплексной многофункциональной защиты индивидуального исполнения для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ в составе функций комплексной многофункциональной защиты могут быть использованы:

- в качестве основной функции, обеспечивающей устойчивое функционирование и распознавание всех разновидностей дуговых прерывистых ОЗЗ (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ и КрОЗЗ) – направленная защита на основе переходных процессов с ИО непрерывного действия;
- в качестве функций, обеспечивающих непрерывность действия при УОЗЗ – направленная защита на основе ВГ (для ЦП) и максимальная токовая защита абсолютного замера ВГ (прежде всего для РП и ТП).

1.6 Направления и задачи исследований, связанных с созданием комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю

1.6.1 Основные направления исследований. Результаты приведенного в 1.4 анализа показали, что основные проблемы с обеспечением высокой эффективности функционирования защиты от ОЗЗ имеют место прежде всего в компенсированных кабельных сетях и связаны с недостаточным техническим совершенством устройств защиты, предназначенных для действия при УОЗЗ и основанных на использовании ВГ. Проблемы защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью в основном связаны с недостаточно высокой динамической устойчивостью функционирования в условиях переходных процессов при внешних и внутренних дуговых прерывистых ОЗЗ, прежде всего, при ДПОЗЗ. Не решенными для кабельных сетей с различными режимами заземления нейтрали являются также задачи, связанные с распознаванием опасных и неопасных для контролируемой сети дуговых прерывистых ОЗЗ.

С учетом этого для решения задач, связанных с повышением технического совершенства защит от ОЗЗ, входящих в состав функций комплексной многофункциональной защиты индивидуального исполнения для кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, необходимо проведение исследований в двух основных направлениях:

- 1) исследование высших гармоник в токах ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ;
- 2) исследование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами нейтрали.

1.6.2 Основные задачи исследований. В рамках 1-го из указанных выше направлений исследования к основным задачам относятся:

- 1) оценка минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ;
- 2) оценка степени нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ современных систем промышленного и городского электро-снабжения;
- 3) на основе решения задач по пп. 1 и 2 определение требований к чувствительности по первичному току токовых и токовых направленных защит на основе ВГ и уточнение области возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ.

В рамках 2-го направления исследований должны быть решены следующие основные задачи:

- 1) анализ спектра переходных токов ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ;
- 2) определение рабочего спектра частот функции направленной защиты на основе переходных процессов;
- 3) оценка уровня высших гармонических составляющих в переходных токах и напряжении нулевой последовательности при дуговых прерывистых ОЗЗ;
- 4) определение критериев для распознавания опасных и неопасных для контролируемой сети дуговых прерывистых ОЗЗ.

1.7 Результаты патентного поиска в аспекте решения основных задач, связанных с повышением технического совершенства функций, входящих в состав комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю

1.7.1 Цель, основные задачи и методика патентного поиска. Патентный поиск выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ Р15.011-96 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».

Целью патентного поиска являлись анализ и оценка современного состояния уровня техники и определение тенденций развития объекта исследования. *Объектом* исследований являлись способы выполнения и устройства защиты и от ОЗЗ, применяемые в

кабельных распределительных сетях среднего напряжения 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали. Предметом исследований являлись технические решения, применение которых позволяет повысить техническое совершенство (селективность и устойчивость функционирования) устройств защиты от ОЗЗ на различных принципах, которые могут быть использованы в составе функций комплексной многофункциональной защиты индивидуального исполнения.

Основным методом проведения исследований являлся сплошной патентный поиск по патентным документам, опубликованным в базах международных и национальных патентных организаций, без ограничения числа стран и глубины поиска по состоянию на 2013–2014 гг. Проанализировано более 1360 единиц патентной документации. В результате патентного поиска из числа патентных документов, относящихся к теме исследования, отобран 91 патентный документ, наиболее полно соответствующих предмету исследований, которые в совокупности дают достаточно полное представление о современном состоянии уровня техники в области устройств защиты от ОЗЗ в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ.

Поиск проводился с использованием фондов Всероссийской Патентно-Технической Библиотеки на бумажных и цифровых носителях, а также с использованием автоматизированных баз данных патентной документации международных и национальных патентных организаций. Временной интервал патентного поиска для целей настоящего патентного исследования был ограничен периодом до 1960 г. включительно. Анализ классификационных рубрик МПК показал, что преобладающая часть патентов, относящихся к объектам патентного поиска, относится к классам: H02H3/16, H02H7/26, G01R31/08.

1.7.2 Результаты патентного поиска и их оценка. Анализ результатов патентного поиска показал, что патентная активность в части разработок новых и совершенствования существующих исполнений ТЗНП абсолютного замера относительно невелика. Из отобранных по результатам поиска технических решений практический интерес в аспекте решения задач, связанных с созданием комплексной многофункциональной защиты, представляют предложения по выполнению адаптивной ТЗНП с уставкой, зависящей от значения напряжения нулевой последовательности [143, 144]. В качестве основной цели применение таких адаптивных ТЗНП авторы рассматривают возможность повышения ее чувствительности при устойчивых ОЗЗ через большое переходное сопротивление. На наш взгляд, применение адаптивных ТЗНП позволяет также решать и другие задачи, в частности, повышения динамической устойчивости функционирования

при ДПОЗЗ. Поэтому разработка адаптивных ТЗНП представляет собой перспективное направление повышения технического совершенства защит данного типа.

Технические решения, направленные на совершенствование ТНЗНП абсолютного замера, представлены в 9 отобранных по результатам поиска патентах на изобретения и полезные модели [145–153]. В [145] содержится описание способа определения направления мощности, используемого в защите типа ЗЗН, в [145] – запатентованы технические решения, реализующие способ [145]. Использование данного способа представляет интерес и в цифровых исполнениях ТНЗНП.

Способ ТНЗНП абсолютного замера, предложенный в [146], представляет известную схему реле направления мощности с использованием сравнения абсолютных значений двух электрических величин. Определенный интерес представляет предложение автора использовать в качестве фазоповоротной схемы интегратора в цепи тока нулевой последовательности, т.к. такое решение в принципе может способствовать повышению динамической устойчивости функционирования направленной защиты при дуговых переключениях ОЗЗ.

В [147] предложена простейшая схема ТНЗНП, использующая для поворота фазы тока нулевой последовательности на 90° дифференцирование с использованием емкости, однако дифференцирование в цепях тока $3i_0$, подчеркивающее высокочастотные составляющие, усиливает влияние переходных токов на устойчивость функционирования защиты, т.е. уменьшает динамическую устойчивость.

В [148–150] содержатся технические решения, направленные на исключение ложных срабатываний ТНЗНП за счет низкочастотных переходных процессов, возникающих в сети после отключения ОЗЗ или гашении заземляющей дуги. В [148] для этих целей предлагается использовать два пусковых органа по напряжению $3U_0$ с разными уставками и контролем разности по времени их срабатывания, в [149] – контроль частоты колебаний напряжения $3U_0$, в [150] – контроль длительности полуволн напряжения $3U_0$. Следует отметить, что указанные проблемы возникают только при достаточно высокой чувствительности ТНЗНП по первичному току нулевой последовательности.

В патенте [151] предлагается схемотехническое решение, обеспечивающее отключение от ТНЗНП при двойных или многоместных ОЗЗ только одного из поврежденных присоединений, на котором ОЗЗ возникло первым, однако из описания неясно, в чем заключается положительный эффект такого решения.

В патенте на полезную модель [152] предложено устройство защиты от ОЗЗ, реагирующее не на направление, а на приращение т.н. пульсирующей мощности с частотой 100 Гц и мощности высших гармоник. В неповрежденных присоединениях приращения пульсирующей мощности при ОЗЗ равны нулю, в поврежденном присоединении приращение пульсирующей мощности отлично от нуля. На этом принципе может быть выполнена как защита абсолютного, так и относительного замера. Недостатком используемого в данной защите способа является необходимость замера фазных токов, т.е. использования фазных ТТ. Поэтому данное устройство представляет интерес прежде всего для воздушных линий 6–35 кВ, не оснащенных кабельными ТТНП. Для защит от ОЗЗ, подключаемых по цепям тока к фазным ТТ, основной проблемой, ограничивающей возможности их применения, как правило, являются токовые погрешности последних. В описании изобретения влияние погрешностей фазных ТТ, а также переходных процессов при ОЗЗ на работу защиты не учитывается.

Анализ патентных источников показал, что в них отсутствуют технические предложения, направленные на решение главной задачи в части ТНЗНП, а именно, повышение динамической устойчивости функционирования ТНЗНП при дуговых перемежающихся ОЗЗ.

Технические решения по совершенствованию направленных защит от ОЗЗ на основе ВГ содержатся в 5 патентах из числа отобранных по результатам патентного поиска [154–158].

В авторском свидетельстве [154] запатентован описанный выше способ направленной защиты, основанной на использовании суммы ВГ (Кискачи В.М.). В [155] предложен способ выполнения централизованной направленной защиты относительного замера, основанный на сравнении фаз 3-й гармоники в токах $3I_0$ присоединений защищаемого объекта. Защиты, основанные на использовании какой-либо одной гармонической составляющей, как было отмечено выше, не позволяют получить универсальное решение из-за нестабильности спектра ВГ в токе ОЗЗ.

В [156–158] предлагаются схмотехнические решения по выполнению централизованных направленных защит на основе ВГ, отличающиеся способами выполнения функциональных блоков, определяющих присоединение с особой фазой ВГ (т.е. поврежденного присоединения). Применение указанных решений не представляет особого интереса с точки зрения использования в современных микропроцессорных защитах от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

1.8 Выводы по главе 1

1.8.1. Установлено, что принцип действия защит от ОЗЗ и область их применимости зависит от назначения сети, особенностей объектов сети и режима заземления нейтрали, которые определяют характер и параметры электрических величин переходных и установившихся процессов при ОЗЗ.

1.8.2. Дана классификация разновидностей однофазных замыканий на землю по степени их опасности для сети и поврежденного элемента: устойчивые и неустойчивые (дуговые прерывистые, перемежающиеся и «мгновенные земли»). Определен критерий опасности для сети дуговых прерывистых ОЗЗ по перенапряжениям: $K_{пер. расч} \approx 2,7$. Способ распознавания опасных ДПОЗЗ путем прямого контроля перенапряжений ограничен своей сложностью и необходимостью наличия фазных трансформаторов напряжения. Косвенные критерии распознавания опасных для сети ОЗЗ не исследованы. Отмечено, что ток в месте дугового замыкания также может представлять опасность для поврежденного элемента.

1.8.3. Сделан вывод о том, что комплексный многофункциональный подход к повышению технического совершенства защиты от ОЗЗ предполагает также необходимость расширения существующего понятия селективности, которое должно включать также способность распознавания всех разновидностей ОЗЗ в сетях с любыми режимами заземления нейтрали для автоматической оценки степени опасности повреждения и выбора способа действия защиты (сигнал или отключение).

1.8.4. Выполнен сравнительный анализ, и оценка условий применимости известных исполнений индивидуальной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. Недостатком всех существующих устройств локальной защиты от ОЗЗ является отсутствие в них комплексного многофункционального подхода к проблеме селективной защиты от ОЗЗ, а также алгоритмов распознавания разновидностей ОЗЗ.

1.8.5. С учетом результатов анализа по п. 1.8.4 разработан состав функций комплексной многофункциональной защиты индивидуального исполнения: для сетей, работающих с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, – направленная защита непрерывного действия на основе переходных процессов и ТНЗНП или ТЗНП; для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ – направленная защита непре-

рывного действия на основе переходных процессов и направленная защита на основе ВГ или максимальная токовая защита абсолютного замера ВГ.

1.8.6. Поставлены задачи и направления исследований по созданию комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю – исследования ВГ в токе устойчивого ОЗЗ компенсированных кабельных сетей и исследование переходных процессов при ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

1.8.7. Выполнен патентный поиск по принципам действия защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали. Анализ патентных источников показал, что в них отсутствуют технические предложения, направленные на решение задачи распознавания разновидностей ОЗЗ и расширения понятия селективности защит от данного вида повреждений.

Основные результаты исследований данной главы отражены в публикациях [81, 85–86, 98].

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ТОКАХ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ УСТОЙЧИВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

2.1 Постановка задачи и выбор метода исследований

2.1.1 Задачи исследований ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Как было показано в главе 1, функция токовой защиты от ОЗЗ на основе принципа абсолютного замера ВГ в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения в составе функций комплексной многофункциональной защиты необходима для обеспечения непрерывности действия при устойчивых повреждениях в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, на объектах, не оснащенных ТННП. Для выявления причин недостаточной эффективности функционирования существующих исполнений защит данного типа, уточнения условий и области возможного применения, разработки методики выбора уставок должны быть решены две основные задачи:

1) оценка минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для определения требований к чувствительности по первичному току (как токовых, так и направленных защит на основе ВГ);

2) оценка максимальной степени нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ для уточнения условий применимости и области возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ на различных объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

2.1.2 Метод исследований. Выше отмечалось, что используемые в настоящее время при расчетах уставок и определении условий применимости токовых защит абсолютного замера ВГ оценки минимального уровня и максимальной степени нестабильности ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ были получены в конце 60-х на основе упрощенных аналитических методов и моделей кабельных сетей 6–10 кВ и их элементов, учитывающих ограниченное число влияющих факторов [например, 137–139]. В настоящее время в связи с созданием эффективных систем имитационного моделирования (например, MATLAB с пакетом расширения SIMULINK [64–66], ATPDesigner [68], PSCad [67], RTDS [69] и др.), основным методом исследования сложных режимов функционирования ЭЭС и ЭЭО стало моделирование на ЭВМ, позволяющее применять более сложные модели иссле-

дваемых объектов, учитывающие большее число влияющих факторов. Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому в данной работе для решения указанных выше задач использовалось как моделирование на ЭВМ в системе MATLAB с пакетом расширения SIMULINK, так и в необходимых случаях аналитические методы решения задачи на основе упрощенных схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ.

2.2 Источники высших гармоник в токе замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и их характеристики

2.2.1 Основные источники ВГ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

Спектр ВГ в токе ОЗЗ и, соответственно, в токах $3I_0$ неповрежденных присоединений в сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, определяется спектром ВГ напряжения на поврежденной фазе в момент, предшествующий возникновению повреждения [137]. Спектр тока $3I_0$ поврежденного присоединения содержит также ВГ, генерируемые ДГР и дугой в месте повреждения. Основные источники ВГ в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ показаны на рис. 2.1.

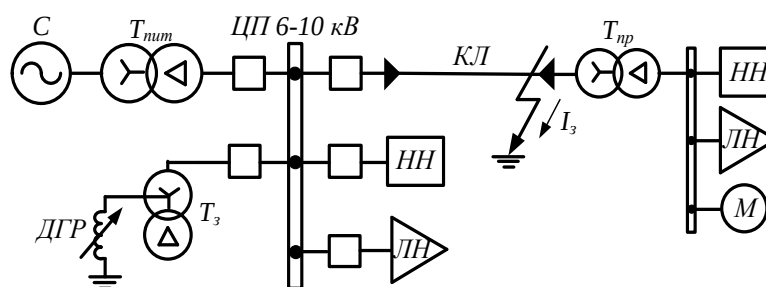


Рисунок 2.1 – Источники ВГ в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ

К ним относятся прежде всего установки и устройства, вольт-амперные характеристики которых существенно нелинейны [159–176 и др.]:

- силовые трансформаторы: питающие, установленные на ЦП T_{num} , и трансформаторы 6–10/0,4 кВ, установленные на приемных подстанциях (ТП и РТП) T_{np} ;
- нелинейная нагрузка ($НН$): вентильные неуправляемые и управляемые преобразователи ($ВП$); силовые преобразователи переменного в постоянный ток; выпрямители;

инверторы; преобразователи частоты; электросварочные установки (ЭСУ) электродуговой и контактной сварки с преобразователями в качестве источников питания и др.; электротермические установки (ЭТУ), использующие электрическую дугу, например, дуговые сталеплавильные и рудотермические печи и др.;

- питающая система C , синхронные генераторы;
- асинхронные и синхронные электродвигатели M .

В компенсированных сетях ток в месте УОЗЗ и в поврежденном присоединении содержит также ВГ, генерируемые ДГР и устойчивой электрической дугой в месте повреждения.

Наличие таких источников ВГ, как ВП, ЭТУ, ЭСУ характерно в первую очередь для кабельных сетей 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий таких отраслей промышленности, как черная и цветная металлургия, химическая промышленность, шахтная угледобыча, автомобилестроение, машиностроение, электротяга [177]. Доля основных источников ВГ – ВП, ЭТУ, ЭСУ в составе общей нагрузки ЦП кабельных сетей 6–10 кВ указанных отраслей промышленности в среднем составляет около ~15–50%, но для отдельных промышленных производств может достигать 90% (например, электротяговые подстанции, прокатное производство, мощные электродуговые сталеплавильные печи постоянного тока на металлургических заводах, ферросплавное производство и др.). Изменения режимов работы, технологические перерывы в работе или полный вывод из работы (отключение) основных источников ВГ и являются, как правило, главной причиной значительных колебаний общего уровня ВГ в токах нагрузки и, соответственно, в фазных напряжениях и в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

2.2.2 ВГ, генерируемые силовыми трансформаторами. Большой вклад в изучение ВГ, генерируемых трансформаторами, внесли советские ученые М.С. Либкинд и Г.Н. Петров [164, 165]. Источником ВГ в трансформаторах является нелинейный ток намагничивания. Наибольшее удельное значение в токах намагничивания силовых трансформаторов имеют 5 и 7-я, а также 3-я гармоники [159–165]. Величина тока намагничивания (тока холостого хода) для трансформаторов 6–10/0,4 кВ приемных подстанций (ТП, РТП) обычно составляет 1–2% от номинального тока, для питающих трансформаторов с высшим напряжением 110–220 кВ, установленных на ЦП – не более 1%. С учетом этого уровень ВГ, генерируемых трансформаторами, составляет доли процента от номинального тока трансформатора, т.е. при сопоставимой мощности источников существенно меньше уровня ВГ, генерируемых ВП, ЭТУ, ЭСУ. Однако при оценке минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ городского и

промышленного электроснабжения обычно учитываются режимы электроустановок, при которых нелинейная нагрузка (НН, рис. 2.1) в составе комплексной нагрузки ЦП отсутствует или отключена (например, в ночной период или в выходные дни). В таких режимах основным источником ВГ являются прежде всего силовые трансформаторы ЦП и приемных подстанций (ТП и РТП) [138, 139]. Поэтому в моделях кабельных сетей 6–10 кВ для решения сформулированных в 2.1 задач трансформаторы как источники ВГ должны учитываться.

2.2.3 ВГ, генерируемые ВП. В современных схемах электроснабжения промышленных предприятий в составе комплексной нагрузки присутствуют, как правило, потребители, работающие на постоянном токе, и, следовательно, ВП, преобразующие переменный ток в постоянный. В системах промышленного электроснабжения предприятий цветной металлургии мощность преобразовательных установок в среднем составляет 46%, черной металлургии – 10%, химической промышленности – 12% комплексной нагрузки ЦП [177]. Для отдельных производств, имеющих, как правило, свои ЦП (например, ГПП, питающие прокатное производство в черной металлургии и т.п.) установленная мощность ВП может достигать 80–90% мощности всего электрооборудования, а единичная мощность ВП – 10 и более МВт [159–162].

Наиболее широкое применение в системах электроснабжения промышленных предприятий получили трехфазные неуправляемые выпрямители на базе диодов и управляемые выпрямители на базе тиристоров. Для неуправляемых ВП в диапазоне изменения величины нагрузки от $P_{нагр} = P_{ном}$ до $P_{нагр} = 0,1P_{ном}$ относительный уровень ВГ в первичных токах питающего трансформатора практически не зависит от нагрузки, и действующее значение тока v -й гармоники в относительных единицах приближенно может быть определено из выражения [159–162]:

$$I_{v*} = \frac{I_v}{I_1} \approx \frac{I_v}{I_{нагр}} \approx \frac{1}{v}. \quad (2.1)$$

Практически при расчетах по (2.1) значение тока I_{v*} оказывается завышенным примерно на 10–20%. В среднем относительные значения токов ВГ, генерируемых неуправляемыми ВП, в токах нагрузки составляют для 5-й гармоники ~20%, для 7-й гармоники – ~14%, для 11-й гармоники – ~9%, для 13-й гармоники – ~8% [159–162]. Однако в емкостных токах ОЗЗ уровень 11-й и 13-й гармоник может оказаться выше, чем 5-й и 7-й.

Уровень ВГ, генерируемых управляемыми ВП, зависит не только от тока нагрузки, но и от угла управления α , задаваемого системой импульсно-фазового управления, и уг-

ла коммутации γ . Чем больше угол управления α и угол коммутации γ , тем меньше уровень всех гармоник (например, рис. 2.2).

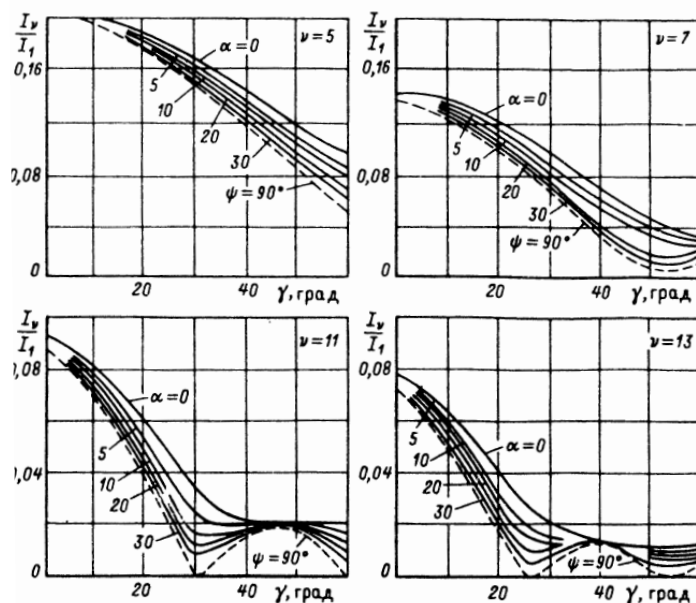


Рисунок 2.2 – Кривые относительных значений ВГ тока управляемого ВП [159, 160]

При малых значениях угла коммутации $\gamma \rightarrow 0$ относительный уровень ВГ, генерируемых управляемыми ВП, достигает максимальных значений и приближенно может быть определен из выражения (2.1). При больших значениях угла коммутации γ относительный уровень значимых гармоник 5, 7, 11 и 13-го порядка может уменьшаться в 5–6 раз (рис. 2.2). Зависимость абсолютного и относительного уровня гармоник управляемых ВП от указанных факторов определяет высокую степень нестабильности спектра ВГ в напряжениях сетей 6–10 кВ, содержащих управляемые ВП, и, соответственно, в токах ОЗЗ. Наибольшей степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ следует ожидать в кабельных сетях ЦП, в составе комплексной нагрузки которых ВП составляют основную долю (прокатное производство, электротяга и др.).

Если сравнить уровни ВГ, генерируемых управляемыми и неуправляемыми ВП (в долях или процентах от тока нагрузки), с приведенными выше уровнями ВГ, генерируемых силовыми трансформаторами, нетрудно видеть, что при наличии в составе комплексной нагрузки ЦП нелинейных преобразователей именно последние определяют максимальные уровни ВГ в напряжениях сети и, соответственно, в токах ОЗЗ сетей 6–10 кВ.

2.2.4 ВГ, генерируемые ЭСУ. В расчётах ВГ сварочная дуга учитывается, как правило, в виде постоянной противо-ЭДС [159–162, 167]. При таком допущении для от-

дельной установки дуговой или контактной электросварки токи гармоник приближенно можно определить по выражению [167]:

$$I_{v^*} = \frac{I_v}{I_{ном}} = \frac{K_3 S_{ном}}{v^2 \sqrt{3} U_{ном} I_{ном}} = \frac{K_3}{v^2}, \quad (2.2)$$

где $S_{ном}$ $U_{ном}$, $I_{ном}$ – номинальная мощность, номинальное напряжение и номинальный ток сварочного трансформатора; K_3 – коэффициент загрузки трансформатора.

Определяющими гармониками тока нагрузки сварочного трансформатора ЭСУ являются 3, 5 и 7-я. Сравнивая (2.2) с (2.1), можно видеть, что при одинаковой мощности нагрузки уровень гармоник тока, генерируемых ЭСУ, значительно меньше, чем уровень ВГ, генерируемых ВП. Циклический (повторно-кратковременный) режим работы ЭСУ обуславливает значительные колебания уровня ВГ в токе нагрузки и, соответственно, в напряжениях. По данным [175, 176] токи 3, 5 и 7-й гармоник ЭСУ с преобразователями переменного тока в постоянный в зависимости от режима их работы могут достигать значений соответственно 30, 15 и 8% от тока нагрузки сварочного трансформатора, т.е. превышать полученные по (2.1) значения в 3–4 раза, что должно учитываться при разработке их моделей.

Доля ЭСУ в составе комплексной нагрузки ЦП кабельных сетей 6–10 кВ предприятий большинства отраслей промышленности обычно в среднем не превышает 1–3% и только в машиностроении достигает 14% [7]. Поэтому при наличии в составе потребителей узла комплексной нагрузки значительной доли ВП ЭСУ не оказывают существенного влияния на максимальный уровень и степень нестабильности ВГ в токе ОЗЗ.

2.2.5 ВГ, генерируемые ЭТУ. Доля ЭТУ в составе комплексной нагрузки в таких отраслях, как цветная металлургия, черная металлургия и автомобилестроение в среднем составляет 10–22% [177], однако для отдельных производств может достигать 90% [159–162].

Среди ЭТУ основным источником ВГ являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Мощности трансформаторов, питающих ДСП емкостью от 3 до 200 т находятся в пределах от 1,5 до 60 МВА [159, 160, 169–171]. ДСП ёмкостью до 25 тонн подключаются к сетям 10 кВ, более мощные – к сетям 35–110 кВ [169–171].

Нелинейность вольт-амперной характеристики дуги ДСП в наибольшей степени проявляется в период расплавления, в течение которого ВГ проявляются более интенсивно, чем в другие периоды плавки (окисление, рафинирование). Токи ВГ в период расплавления при номинальной нагрузке трансформатора, питающего ДСП, для практических расчетов могут быть определены по выражению [169–171]:

$$I_{V^*} = \frac{I_V}{I_{ном}} \approx \frac{I_{ном}}{V^2 I_{ном}} = \frac{1}{V^2}, \quad (2.3)$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток печного трансформатора.

При нагрузке трансформатора, меньшей номинальной, следует использовать выражение (2.2). Из сравнения (2.3) с (2.1), можно видеть, что при одинаковой мощности нагрузки уровень гармоник тока, генерируемых ДСП, как и ЭСУ, значительно меньше, чем уровень ВГ, генерируемых ВП. Эквивалентное действующее значение ВГ, генерируемых ДСП, обычно не превосходит 10% от тока нагрузки, что примерно в 3–4 раза меньше, чем действующее значение ВГ, генерируемых ВП.

Дуговые вакуумные печи получают питание от ВП, поэтому кривая сетевого тока вакуумных печей оказывается такой же, как и ВП электроприводов, однако мощности данной разновидности ЭТУ значительно меньше, чем ДСП. Руднотермические печи, выплавляющие ферросплавы (ферросилиций, ферромарганец и др.), работают при шунтированной электрической дуге, благодаря чему кривая тока этих печей искажена в значительно меньшей мере, чем кривая тока ДСП [174]. Содержание ВГ в токе руднотермических печей незначительно и не превышает 1–1,5%.

2.2.6 ВГ, генерируемые синхронными генераторами. Наиболее выраженной в ЭДС турбогенераторов, применяемых на ТЭЦ, является 3-я гармоника, значение которой в различных режимах работы генератора обычно лежит в пределах 1,5–4% [178, 179]. ЭДС гармоник, кратных трем, образует систему нулевой последовательности, токи которой могут протекать только через емкости фаз на землю обмотки статора генератора, соединенной по схеме «звезда», что значительно ограничивает их величину в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. В современных турбогенераторах 5 и 7-я гармоники ЭДС сводятся к минимуму рациональным выбором отношения обмотанной и необмотанной частей ротора и параметров обмотки статора, и их относительная величина не превышает долей процента. Например, для турбогенератора типа ТВС-30 с $U_{ном} = 6,3$ кВ действующие значения ВГ ЭДС при номинальной нагрузке: $E_3 = 159$ В (2,52%); $E_5 = 12,4$ В (~0,2%); $E_7 = 2,62$ В (0,04%). Для генераторов с обмоткой статора, соединенной по схеме «треугольник», ЭДС можно считать практически синусоидальной.

Если генератор с учетом 3-й гармоники ЭДС представить П-образной схемой замещения (рис. 2.3), то относительное значение 3-й гармоники в токе ОЗЗ можно определить из выражения

$$I_{3^*} = 3E_{3^*} \frac{I_{CG}/2}{I_{CZ}}, \quad (2.4)$$

где $I_{CG} = 3\omega C_{0G} E_1 = 3\omega C_{0G} U_{\phi.ном}$ – собственный емкостный ток генератора;
 $I_{C\Sigma} = 3\omega (C_{0c} + C_{0G}) U_{\phi.ном}$ – суммарный емкостный ток сети.

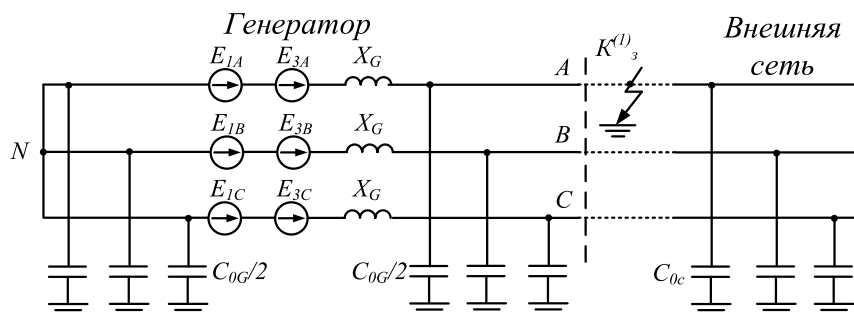


Рисунок 2.3 – Схема замещения для расчета тока ОЗЗ в сети генераторного напряжения

Для турбогенераторов, работающих на сборные шины ГРУ ТЭЦ, I_{CG} обычно не превышает 1–2 А, для компенсированных сетей 6–10 кВ $I_{C\Sigma} \geq 20$ –30 А. Принимая $E_{3*} = 0,04$, из (2.4) при $I_{CG} = 2$ А, $I_{C\Sigma} = 20$ А получим

$$I_{3*} = 3 \cdot 0,04 \frac{2/2}{20} = 0,006,$$

т.е. величина токов 3-й гармоники в токе ОЗЗ в худшем случае составляет доли процента от суммарного емкостного тока сети.

Учитывая изложенное, при оценке максимального уровня и степени неустойчивости ВГ генераторы как источники ВГ, как правило, не учитываются [159–162]. Третья гармоника ЭДС синхронных генераторов может оказывать лишь некоторое влияние на минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

2.2.7 ВГ, генерируемые ДГР. Ток ДГР, включая генерируемые им ВГ, протекает только в месте ОЗЗ и через поврежденное присоединение. Поэтому гармоники, генерируемые ДГР, не оказывают влияния на условия отстроенности токовых защит абсолютного замера ВГ от внешних ОЗЗ, и должны учитываться только при оценке чувствительности защит на основе ВГ при внутренних повреждениях, т.е. при определении минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ.

В кабельных сетях 6–10 кВ в основном применяются 2 типа ДГР – ступенчатые (75,5% от общего числа ДГР) и плавно-регулируемые (24,5%) [180]. Почти 95% ступенчатых реакторов – это реакторы типа ЗРОМ или РЗДСОМ, которые на протяжении 50 лет выпускались по устаревшим ТУ, в которых было предусмотрено только 5 ответвлений. Большинство плавнорегулируемых реакторов (93,1%)

составляют плунжерные реакторы типа РЗДПОМ (производства ПК «ХК Электрозавод», ЦРМЗ «Мосэнерго» и др.) или аналогичные реакторы западного производства (ZTC, GEUF и т.п.). Плавнорегулируемые реакторы с подмагничиванием постоянным током (например, типа РУОМ, УАРК [181–183]) получили ограниченное применение.

Принято считать, что нелинейность характеристик намагничивания ДГР обычно не превышает $\sim 1\%$, поэтому в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. [138, 139] ДГР не рассматриваются как источники ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Однако экспериментальные данные показывают [например, 180, 184], что при больших токах компенсации нелинейность характеристик намагничивания различных типов ДГР возрастает (например, рис. 2.4).

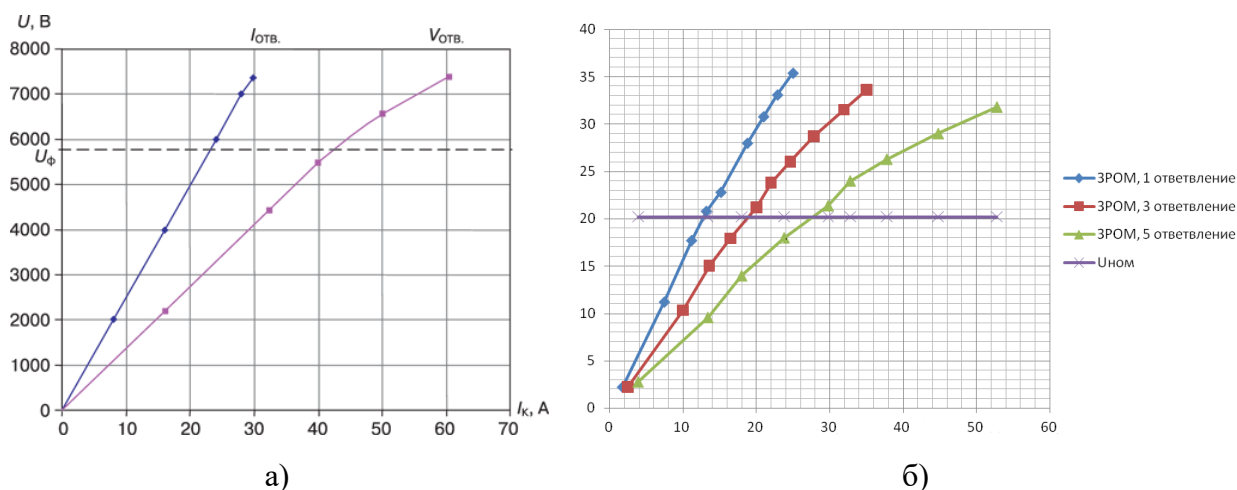


Рисунок 2.4 – Вольтамперные характеристики ДГР: а – плавно-регулируемого реактора типа РЗДПОМ [180]; б – ступенчато-регулируемого реактора типа ЗРОМ [184]

Из рис. 2.4 можно видеть, что кривые намагничивания таких ДГР практически линейны на участке компенсации емкостных токов при номинальном напряжении и ниже. Однако, если напряжение на катушке превысит номинальное на 10–20% и более, кривая становится нелинейной, что вызовет появление в токе ОЗЗ ВГ. При этом отклонения вольтамперной характеристики от линейной не превышают $\sim 5\%$ при наибольшем рабочем напряжении реактора и при наибольшем предельном токе реактора. При такой степени нелинейности ток ДГР может содержать ВГ, оказывающие влияние на чувствительность защит на основе ВГ при внутренних ОЗЗ, однако в известных автору источниках информация о величине токов ВГ, генерируемых ДГР, отсутствует. Оценки, полученные автором с использованием модели ДГР, приведены ниже (раздел 2.3 настоящей главы).

2.2.8 ВГ, генерируемые устойчивой дугой в месте ОЗЗ. Поскольку процесс горения устойчивой дуги является стационарным стохастическим, то получение ее точной детерминированной модели практически невозможно. Поэтому при расчетах ВГ в кабельных сетях 6–10 кВ кривые напряжения на устойчиво горящей дуге в электроустановках в первом приближении принимаются прямоугольно-ступенчатыми [159–162 и др.]. Исследования низкочастотных дуг в электрических аппаратах и в электрических сетях показывают, что моменты перехода через нуль тока и напряжения дуги практически совпадают (например, рис. 2.5).

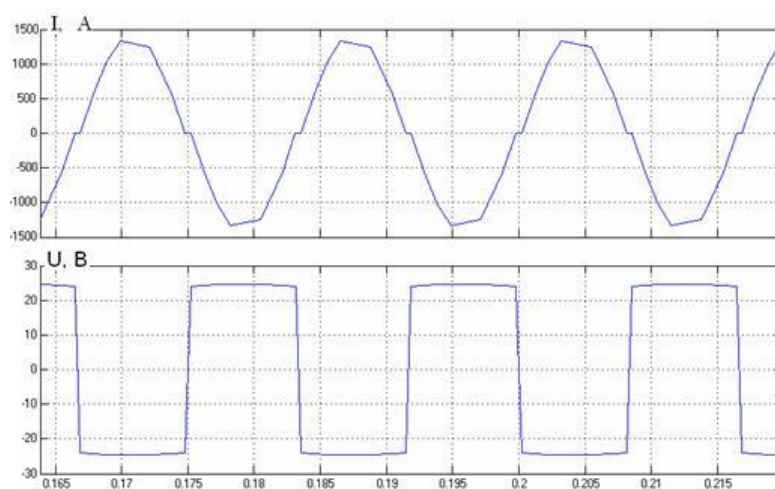


Рисунок 2.5 – Аппроксимация напряжения на устойчиво горящей электрической дуге прямоугольно-ступенчатой функцией

Величина генерируемых устойчивой дугой ВГ в токе ОЗЗ определяется напряжением на дуге. Напряжение на дуге u_d зависит от величины тока и длины дуги, и в электрических аппаратах обычно не превышает нескольких десятков вольт. В частности, в кабельных сетях 6–10 кВ при дуговых ОЗЗ u_d даже в переходных режимах ОЗЗ (т.е. при токах, достигающих значений порядка сотен и даже тысяч ампер) не превышает 50...100 В [40], что значительно меньше амплитуды ЭДС источника питания $E_m = \sqrt{2}(6000...10000) / \sqrt{3}$ В. Можно ожидать, что при $U_d \ll E_m$ уровень генерируемых дугой ВГ в токе ОЗЗ будет незначительным, однако какие-либо оценки этого уровня в источниках отсутствуют. Учитывая это, ниже (раздел 2.3) с использованием разработанных моделей кабельных сетей даны расчетные оценки ВГ, генерируемых устойчивой дугой, в токе ОЗЗ.

2.2.9 Другие источники ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. К ним относятся источник питания (эквивалентная система C , рис. 2.1), нелинейная осветительная нагрузка, синхронные или асинхронные электродвигатели (M , рис. 2.1). При расчетах ВГ

в напряжениях сетей 6–10 кВ влиянием указанных источников обычно пренебрегают [159–162, 185 и др.].

Уровень ВГ в токах нагрузки, генерируемых питающими трансформаторами, обычно не превышает 10% от уровня ВГ, генерируемых трансформаторами приемных подстанций (см. раздел 2.4). Поэтому влиянием трансформаторов питающей системы и, соответственно, питающей эквивалентной системы, как источника ВГ, на величину коэффициента несинусоидальности напряжений в питаемой сети 6–10 кВ можно пренебречь [185].

Относительные значения гармоник, генерируемых электродвигателями, газоразрядными и люминесцентными лампами, в токах нагрузки, как правило, не превышают в сумме нескольких процентов, что практически на порядок меньше уровня ВГ в токах нагрузки, генерируемых ВП, ЭСУ и ЭТУ. Поэтому при наличии в составе комплексной нагрузки ЦП кабельных сетей 6–10 кВ более мощных источников ВГ (ВП, ЭСУ, ЭТУ) влиянием электродвигателей и нелинейной осветительной нагрузки на стабильность общего уровня ВГ в токе ОЗЗ также можно пренебречь.

2.2.10 О составе источников ВГ, учитываемых в моделях кабельных сетей 6–10 кВ для оценки степени нестабильности и минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ. При оценке минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, как уже отмечалось выше, принимается такой расчетный режим, в котором источниками ВГ являются только силовые трансформаторы [138, 139]. Практически возникновение таких режимов работы возможно в некоторых сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий, работающих по сменному суточному графику работы, на которых при ночном спаде нагрузки или в выходные дни все основные технологические установки и, соответственно, основные источники ВГ (прежде всего, ВП), кроме трансформаторов, могут полностью отключаться. Таким образом, модель кабельной сети для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ должна содержать только модели силовых трансформаторов с нелинейной кривой намагничивания и линейной нагрузкой.

Наибольшую степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ Z следует ожидать в сетях, в комплексной нагрузке ЦП которых значительную долю составляют ВП, ЭСУ и ЭТУ. Модель кабельной сети для оценки значения параметра Z должна содержать модели нелинейных силовых трансформаторов, ВП, ЭСУ и ЭТУ.

Модели ДГР и устойчивой электрической дуги необходимы прежде всего для оценки величины генерируемых ими гармоник в токе ОЗЗ компенсированных кабель-

ных сетей 6–10 кВ и оценки их возможного влияния на общий минимальный уровень и степень неустойчивости уровня ВГ в токе замыкания на землю.

2.3 Модели источников высших гармоник в токе замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ

2.3.1 Модели силовых трансформаторов с нелинейной кривой намагничивания.

Точность оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ в значительной мере определяется точностью моделей силовых трансформаторов.

Модели трехфазных трансформаторов, устанавливаемых на ЦП, и трансформаторов приемных подстанций, устанавливаемых на ТП и РТП, имеющих нелинейную кривую намагничивания, в системе Matlab могут быть получены на базе стандартного блока Saturable Transformer библиотеки SimPowerSystem. На рис. 2.6 приведена схема замещения двухобмоточного трансформатора, реализуемая блоком Saturable Transformer. Аналогичным образом может быть представлена модель трехобмоточного трансформатора.

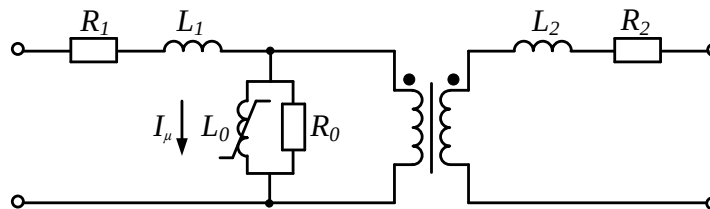


Рисунок 2.6 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора с нелинейным магнитопроводом пакета SimPowerSystem

Нелинейность индуктивности L_0 , определяющая уровень ВГ, генерируемых силовыми трансформаторами, учитывается заданием кривой намагничивания (Saturation characteristic) $\psi^* = f(i_{\mu}^*)$ в именованных или относительных единицах. При расчетах и моделировании установившихся режимов работы трансформаторов, как правило, используется основная кривая намагничивания (ОКН) электротехнической стали, из которой выполнен магнитопровод.

О выборе аппроксимации кривой намагничивания модели силового трансформатора. Точность модели в части ВГ, генерируемых током намагничивания, существенно зависит от точности задания кривой намагничивания. Для упрощенного анализа ВГ, обу-

словленных нелинейностью трансформатора, М.С. Либкиндом было предложено в [165] представить кривую намагничивания полиномом вида:

$$H_* = \alpha B_*^m, \quad (2.5)$$

где H_* – напряженность, в о.е., B_* – индукция, в о.е., α – коэффициент пропорциональности, m – показатель степени (целое число).

В [138] предлагается при использовании для аппроксимации кривой намагничивания, заданной в относительных единицах (о.е.), для всех электротехнических сталей принимать в (2.5) $m = 5$. Данный подход значительно упрощают аналитическое определение ВГ тока намагничивания и напряжений на обмотках трансформатора, что было немаловажно в 60-е годы. Однако, как показал анализ, выполненный на имитационных моделях трансформаторов, принятая в [138] аппроксимация недостаточно точно совпадает с реальной кривой намагничивания электротехнических трансформаторных сталей (например, рис. 2.7), что приводит к заметным погрешностям в оценке значений ВГ, особенно существенным для 7-й гармоники. Известно, что наиболее точно кривую намагничивания можно аппроксимировать функцией арктангенса $B = \alpha \arctg(\beta H) + \gamma H^m$, практически точно повторяющей кривую намагничивания электротехнических сталей в рабочем диапазоне напряжений трансформатора (рис. 2.8).

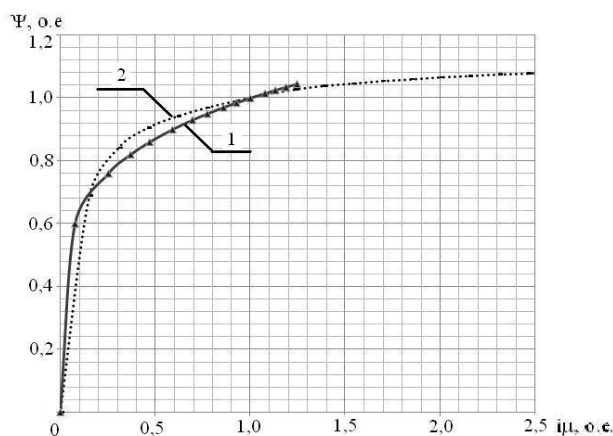


Рисунок 2.7 – К оценке погрешности аппроксимации кривой намагничивания электротехнической стали Э42 полиномом 5-й степени: 1 – реальная кривая намагничивания; 2 – аппроксимация

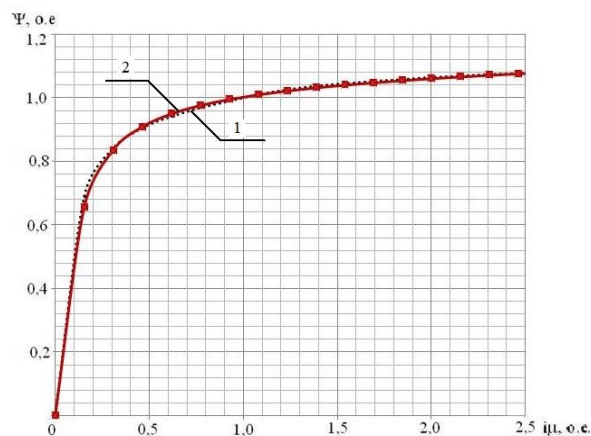


Рисунок 2.8 – К оценке погрешности аппроксимации кривой намагничивания электротехнической стали Э330 функцией арктангенса: 1 – реальная кривая намагничивания; 2 – аппроксимация

Для оценки погрешностей в определении ВГ, обусловленных неточностями аппроксимации кривой намагничивания по уравнению (2.5), в программе SimPowerSystem системы моделирования Simulink были созданы модели трансформаторов одного

типа и мощности с кривой намагничивания, соответствующей реальным характеристикам намагничивания электротехнических сталей марок Э42 и Э330 [186] и их аппроксимации полиномом 5-й степени. На рис. 2.9 приведены результаты измерения ВГ в токе намагничивания указанных моделей трансформаторов.

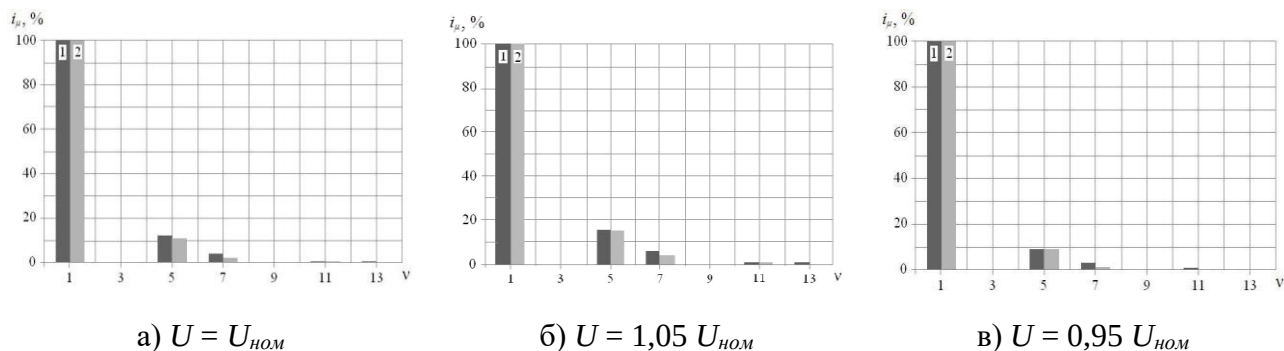


Рисунок 2.9 – Спектр ВГ в токе намагничивания силового трансформатора ТМ-1000 с соединением обмоток «треугольник-звезда» с магнитопроводом из стали Э330 при различных значениях напряжения на обмотке: 1 – реальная характеристика намагничивания; 2 – аппроксимации кривой намагничивания полиномом 5-й степени

Анализ результатов расчетов показал, что при использовании для моделирования кривой намагничивания полинома 5-й степени по уравнению (2.5) погрешности в оценке значений 5-й гармоники тока намагничивания могут составлять 10–15%, в оценке значений 7-й гармоники – до 40%. Учитывая полученные результаты, при построении моделей силовых трансформаторов для исследования генерируемых ими ВГ использовалась аппроксимация кривой намагничивания функцией арктангенса $B = \alpha \arctg(\beta H) + \gamma H^m$.

База моделей трансформаторов, применяемых на объектах кабельных сетей 6–10 кВ. На основе рассмотренного выше подхода были разработаны математические модели питающих двухобмоточных силовых трансформаторов типа ТДН, ТРДН и ТРДЦН с высшим напряжением 110–220 кВ мощностью 10–80 МВА, устанавливаемых на ЦП компенсированных сетей 6–10 кВ, и двухобмоточных трансформаторов, устанавливаемых на приемных подстанциях: масляных (типа ТМ) и сухих (типа ТСЗ) напряжением 6–10/0,4 кВ и мощностью 250–2500 кВА.

Представление моделей трансформаторов с использованием эквивалентных источников тока. Представление в моделях кабельных сетей 6–10 кВ большого числа трансформаторов 6–10/0,4 кВ приемных подстанций полными нелинейными моделями в пакете SimPowerSystem системы моделирования Simulink приводит, как показали практические расчеты, к значительному увеличению времени моделирования. Для сокраще-

ния затрат времени на проведение вычислительных экспериментов удобнее вместо полных моделей трансформаторов использовать эквивалентную модель трансформатора с источниками токов ВГ (рис. 2.10).

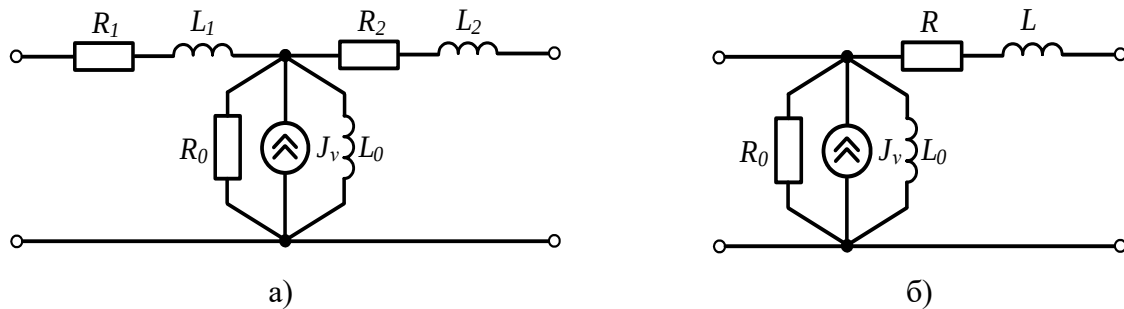


Рисунок 2.10 – Представление моделей трансформаторов с использованием схемы замещения с эквивалентным источником тока ВГ: а – Т-образная схема замещения фазы трансформатора; б – Г-образная схема замещения фазы трансформатора;

J_v – эквивалентный источник тока v -й гармоники

Так как сопротивление ветви намагничивания на порядки больше продольных сопротивлений активно-индуктивных сопротивлений обмоток, применение вместо Т-образной схемы замещения трансформатора (рис. 2.10, а) Г-образной схемы (рис. 2.10, б) практически не вносит погрешностей в расчеты ВГ в сетях 6–10 кВ.

Известно [например, 159–162, 164, 165], что вследствие несимметрии магнитопровода трехфазных трехстержневых трансформаторов действующие значения намагничивающих токов крайних фаз в 1,3–1,35 раза больше намагничивающего тока средней фазы, что обуславливает и различие уровней ВГ по фазам. Это различие просто учитывается при определении параметров эквивалентных источников тока разных фаз трансформатора.

2.3.2 Модели ВП. В пакете программ SimPowerSystem системы Simulink для моделирования различного рода вентильных преобразователей переменного тока в постоянный существует универсальный мостовой модуль Universal Bridge, реализующий варианты выполнения ВП на различной элементной базе. Модель ВП Universal Bridge позволяет реализовать как неуправляемые, так и управляемые преобразователи, выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), тип полупроводниковых приборов, на базе которых он выполнен (диоды, тиристоры, идеальные ключи, полностью управляемые тиристоры GTO, транзисторы IGBT, шунтированные обратными диодами). Наиболее широкое применение в системах электроснабжения промышленных предприятий получили трехфазные неуправляемые выпрямители на базе диодов и управляемые выпрямители на базе тиристоров (рис. 2.11).

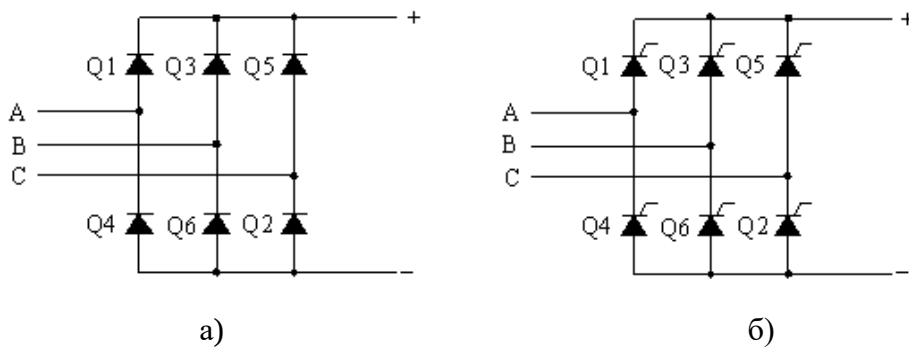


Рисунок 2.11 – Варианты принципиальных схем ВП, реализуемых блоком Universal Bridge пакета программ SimPowerSystem: а – неуправляемый ВП на базе диодов; б – управляемый ВП базе тиристоров

Неуправляемые ВП в SimPowerSystem системы Simulink также достаточно просто можно моделировать непосредственно на уровне принципиальных схем (например, рис. 2.11, а).

Уровень ВГ, генерируемых неуправляемыми выпрямителями, определяется практически только напряжением сети и током нагрузки ВП. Поэтому при заданных значениях напряжения сети и нагрузки питающий трансформатор и ВП для упрощения и ускорения расчетов также можно представить эквивалентной схемой замещения с источниками токов гармоник (рис. 2.12).

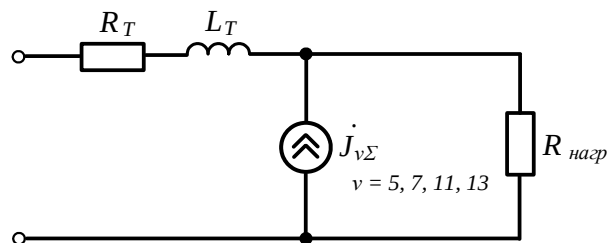


Рисунок 2.12 – Эквивалентная модель питающего трансформатора и неуправляемого ВП с источниками токов ВГ

На рис. 2.12 трансформатор представлен Г-образной схемой замещения, $J_{v\Sigma}$ – эквивалентный источник тока суммы ВГ, генерируемых трансформатором и ВП.

2.3.3 Модели ЭСУ и ЭТУ. Модель ЭСУ с преобразователем переменного тока в постоянный наиболее просто получить на базе моделей трансформатора и неуправляемого ВП, нагрузкой которого является дуга, представленная постоянной противо-ЭДС и активным сопротивлением. Параметры нагрузки ВП выбираются таким образом, чтобы токи гармоник трансформатора, питающего ВП, соответствовали уравнению (2.2).

Выше отмечалось, что среди ЭТУ основным источником ВГ являются ДСП, а нелинейность вольт-амперной характеристики дуги ДСП в наибольшей степени проявляется в период расплавления, в течение которого токи ВГ при номинальной нагрузке могут быть определены по выражению (2.3), аналогичном выражению (2.2) при $K_3 = 1$. Поэтому для ДСП, работающей в режиме расплавления, можно применить модель, аналогичную модели ЭСУ.

2.3.4 Модель устойчивой электрической дуги переменного тока. Допущения, приведенные в п. 2.2.8, позволяют моделировать дугу в виде постоянной противо-ЭДС и последовательно включенной активно-индуктивного сопротивления (рис. 2.13, а). При этом моменты перехода через нуль тока и напряжения дуги практически совпадают (рис. 2.5). Поэтому сопротивление электрической дуги можно с достаточной точностью считать чисто активным, а ее индуктивность – близкой к нулю. С учетом этого дугу наиболее просто можно моделировать схемой замещения из двух параллельно-встречно включенных реальных диодов. В этом случае противо-ЭДС моделируется напряжением отсечки диода E_δ , а активное сопротивление дуги – динамическим сопротивлением диода r_δ (рис. 2.13, б и в).

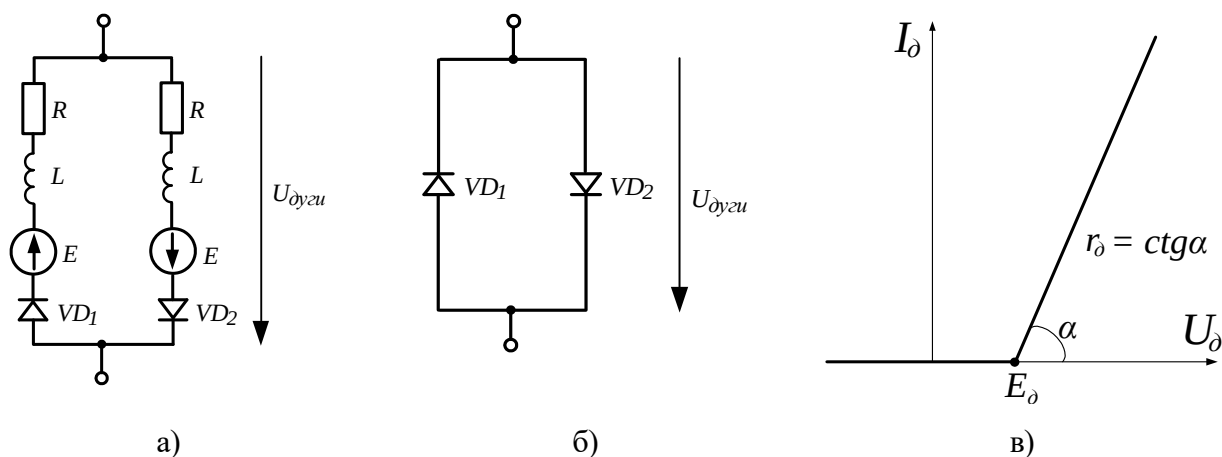


Рисунок 2.13 – Моделирование электрической дуги переменного тока:

- а – в виде постоянной противо-ЭДС (с использованием идеальных диодов или ключей) с учетом индуктивности активного сопротивления; б – с использованием реальных диодов; в – вольт-амперная характеристика реального диода

С использованием рассмотренной модели и имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ были даны оценки уровня ВГ, генерируемых электрической дугой при УОЗЗ. Выше отмечалось, что в кабельных сетях 6–10 кВ при дуговых ОЗЗ U_δ даже в переходных режимах ОЗЗ не превышает 50...100 В [40], поэтому можно полагать, что при УОЗЗ U_δ

может быть меньше указанных величин. С учетом этого при расчетах принималось, что $U_{\partial} = 30 \dots 100$ В. Активное сопротивление дуги в месте ОЗЗ приближенно можно оценить по формуле, применяемой в расчетах токов КЗ [например, 187]:

$$r_{\partial} = \frac{1050 \cdot l_{\partial}}{I_{\partial}}, \quad (2.6)$$

где l_{∂} – длина дуги, м; I_{∂} – ток дуги, А.

Расчеты по формуле (2.6) при реальных длинах дуги (искры) при ОЗЗ в кабелях 6–10 кВ и величинах тока в месте повреждения в компенсированных сетях дают значение r_{∂} порядка десятых долей Ом. Результаты расчетов на имитационных моделях при различных параметрах кабельных сетей 6–10 кВ и дуги приведены в табл. 2.1. Из данных табл. 2.1 можно видеть, что общий уровень ВГ, генерируемых дугой в месте ОЗЗ, даже при максимальных значениях u_{∂} не превышает нескольких процентов.

Таблица 2.1 – Спектр и уровень гармоник, генерируемых устойчивой дугой в месте ОЗЗ

Параметры сети		Параметры дуги		Относительный уровень гармоник в токе ОЗЗ, %							
U_n , кВ	I_{Σ} , А	U_{∂} , В	R_{∂} , Ом	1	3	5	7	9	11	13	Σ
6	30	30	0,1	100	0,79	0,82	0,86	0,93	1,06	1,29	2,39
		50	0,1	100	1,31	1,34	1,39	1,47	1,62	1,91	3,73
		100	0,1	100	2,59	2,56	2,54	2,53	2,57	2,72	6,33
6	100	30	0,1	100	0,83	0,93	1,15	1,21	0,53	0,17	2,16
		50	0,1	100	1,37	1,54	1,88	1,97	0,85	0,45	3,55
		100	0,1	100	2,72	3,01	3,61	3,68	1,54	0,45	6,75

Ниже (раздел 2.5) будет показано, что максимальный уровень ВГ в токе УОЗЗ может достигать 40 и более процентов. Поэтому при оценке степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ влиянием гармоник, генерируемых устойчивой дугой, можно пренебречь. При оценках минимального уровня ВГ в токе УОЗЗ расчетным режимом является металлическое ОЗЗ.

2.3.5 Модель ДГР. Модель реактора наиболее просто получить на основе модели однофазного трансформатора, работающего в режиме холостого хода, выполненную на базе стандартного блока Saturable Transformer пакета SimPowerSystem системы моделирования Simulink.

Анализ экспериментальных данных для отдельных исполнений ДГР (например, РДПОМ, ЗРОМ, рис. 2.4) показал, что в относительных единицах вольтамперная характеристика (кривая намагничивания) с достаточной точностью описываются полиномом 5-го порядка:

$$U_*(I_*) = \psi_*(I_*) = a_5 I_*^5 + a_3 I_*^3 + a_1 I_*, \quad (2.7)$$

где a_1, a_3, a_5 – коэффициенты, $U_* = U/U_{ф.ном}$ – напряжение на ДГР; $\psi_* = \psi/\psi_{ном}$ – потокосцепление; $I_* = I/I_{отв.ном}$ – ток компенсации ДГР.

С использованием указанной модели и имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ были проведены расчеты ВГ, генерируемых ДРГ плунжерного и ступенчатого типов при различных уровнях напряжения при наибольшем токе компенсации (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Спектр ВГ в токе ДГР плунжерного и ступенчатого типов

Спектр ВГ в токе ДГР типа РЗДПОМ-480/11 при $I_{к.макс} = 63$ А, $U_{ф.ном} = 11/1,732 = 6,35$ кВ					Спектр ВГ в токе ДГР типа ЗРОМ-1100/35 при $I_{к.макс} = 50$ А (5 ответвление), $U_{ф.ном} = 35/1,732 = 20,2$ кВ				
№ гармоник ν	$I_{\nu,т}, \% \text{ при } U_k$			Фаза, градусы	№ гармоники ν	$I_{\nu,т}, \% \text{ при } U_k$			Фаза, градусы
	$0,9U_{ф.ном}$	$U_{ф.ном}$	$1,1U_{ф.ном}$			$0,9U_{ф.ном}$	$U_{ф.ном}$	$1,1U_{ф.ном}$	
1	100	100	100	90	1	100	100	100	90
3	0,655	1,097	1,888	90	3	0,655	1,097	1,888	-90
5	0,157	0,294	0,565	90	5	0,157	0,294	0,565	90
7	0,009	0,042	0,109	90	7	0,009	0,042	0,109	90
9	0,001	0,015	0,039	90	9	0,001	0,015	0,039	-90
11	0,005	0,010	0,020	90	11	0,005	0,010	0,020	-90
13	0,003	0,003	0,009	90	13	0,003	0,003	0,009	90

Из приведенных в табл. 2.2 значений можно видеть, что в отличие от других источников ВГ в сетях 6–10 кВ (ВП, трансформаторов и др.), в спектре ВГ, генерируемых ДГР, наиболее выражена 3-я гармоника. Общий уровень значимых гармоник (3, 5 и 7-й), генерируемых ДГР при номинальном напряжении и максимальном регулировании, составляет примерно 1–2%, что достаточно хорошо коррелируется с данными [187]. По данным [188] общий уровень ВГ в токе ДГР указанных типов обычно лежит в пределах 1–1,5%. С учетом результатов анализа влияния ДГР, как источника ВГ, на степень нестабильности общего уровня гармоник в токе ОЗЗ можно пренебречь.

Анализ на моделях ДГР показал также, что при работе ДГР с меньшими, чем предельный, токами компенсации, степень линейности вольтамперных характеристик значительно возрастает, а уровень генерируемых реактором гармоник уменьшается практически до нуля. Учитывая, что в эксплуатации такие режимы работы ДГР возможны, при оценке минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ ДГР из расчетной схемы сети 6–10 кВ также можно исключить.

2.4 Оценка минимального и максимального уровней высших гармоник в токе замыкания на землю кабельных сетей 6–10 кВ

2.4.1 Анализ схем замещения компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, применяемых для оценки минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ. В работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. [138 и 139] для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ используются схемы замещения сети, приведенная на рис. 2.14.



Рисунок 2.14 – Расчетные схемы замещения компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ: а – по [138]; б – по [139]

В схеме замещения по рис. 2.14, а: $C = 3C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость трех фаз сети на землю, e – эквивалентная ЭДС источника питания; L – суммарная индуктивность питающих трансформаторов центра питания (ЦП); L_μ – суммарная индуктивность ветвей намагничивания подключенных трансформаторов нагрузки всех присоединений, R_n – суммарное сопротивление нагрузки трансформаторов. Из рис. 2.14, а можно видеть, что в целях упрощения в расчетной схеме замещения не учитывается влияние на уровень ВГ напряжения в месте ОЗЗ ряда существенных факторов: сопротивлений линий, связывающих ЦП с приемными подстанциями, сопротивления системы, сопротивлений обмоток трансформаторов нагрузки, междуфазных емкостей сети, комплексного характера сопротивления нагрузки, различия токов намагничивания для трансформаторов различной мощности и др.

В [139] для расчета ν -й гармоники в токе ОЗЗ используется схема замещения по рис. 2.14, б. Из рис. 2.14, б можно видеть, что в расчетной схеме замещения по [139], как и в схеме замещения по [138], так же не учитывается ряд факторов, которые могут оказывать существенное влияние на уровень ВГ в токе ОЗЗ.

Применение современных систем моделирования, например, Matlab с пакетами расширения Simulink и SimPowerSystem, позволяет создать более точные модели сетей 6–10 кВ для расчета ВГ в токах ОЗЗ и получить более точные оценки минимального уровня ВГ в токах замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

2.4.2 Схема и параметры имитационной модели компенсированной кабельной сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ. С учетом изложенного в разделе 2.3 обобщенную схему компенсированной кабельной сети для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ можно представить в виде, показанном на рис. 2.15.

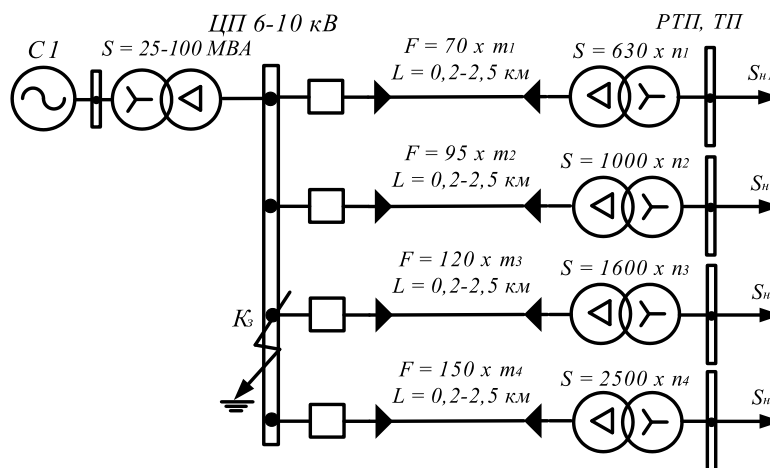


Рисунок 2.15 – Обобщенная схема компенсированной кабельной сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ

В отличие от схем замещения, используемых в работах [138, 139], приведенных на рис. 2.14, в модели сети, используемой в данной работе, учитываются: влияние мощности КЗ на шинах питающей системы (сопротивление системы); различное число трансформаторов разной мощности 6–10/0,4 кВ, установленных на приемных подстанциях (ТП, РТП), имеющих в общем случае различные параметры (ток намагничивания I_μ в о.е., напряжение короткого замыкания u_k и др.); сопротивление линий связи ЦП с ТП и РТП (длины и сечения кабельных линий); влияние междуфазных емкостей кабельной сети; положение места ОЗЗ в сети (его удаленность от шин ЦП); комплексный характер сопротивления нагрузки; несимметрию токов намагничивания трансформаторов нагрузки по фазам и др.

На рис. 2.16 приведена схема модели кабельной сети по рис. 2.15 в системе Simulink.

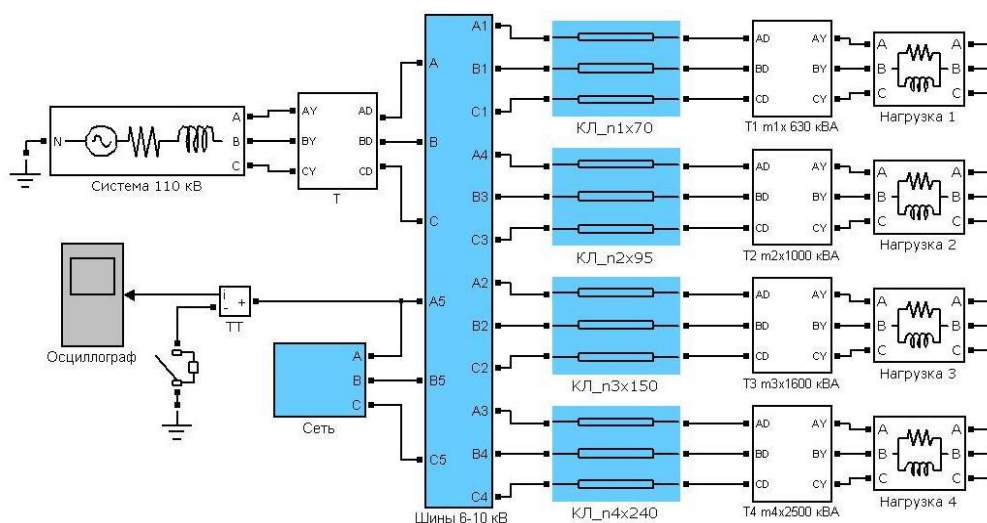


Рисунок 2.16 – Модель кабельной сети 6–10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ в системе Simulink

2.4.2 Параметрирование расчетной модели. На основе анализа данных по реальным компенсированным кабельным сетям 6–10 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ систем промышленного электроснабжения предприятий металлургической, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности для сетей были определены соотношение мощности питающих трансформаторов и трансформаторов нагрузки (параметр S в [138]), доли трансформаторов нагрузки различной мощности в общем числе приемных трансформаторов 6–10/0,4 кВ, средние значения и диапазоны изменения мощности (тока) КЗ на шинах ЦП, определяющей сопротивление источника питания, длин и эквивалентных сечений кабельных линий, соединяющих ЦП с трансформаторными подстанциями (ТП, РТП). Значения основных параметров расчетной схемы компенсированной кабельной сети 6–10 кВ по рис. 2.16, полученные на основе статистической обработки данных, приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Основные параметры расчетной схемы замещения для оценки уровня ВГ, генерируемых трансформаторами нагрузки, в токе ОЗЗ

$I_{c\Sigma}$, А	$I_k^{(3)}$, кА	$S_{sum.mp}$, МВА	$l_{кл}$, км	$S = \frac{S_{sum\Sigma}}{S_{np\Sigma}}$	Доля в общей мощности трансформаторов с S_n			
					630 кВА	1000 кВА	1600 кВА	2500 кВА
20 ... 100	5 ... 20	25 ... 100	0,3 ... 2,5	0,7 ... 1,5	25%	65%	6%	4%

2.4.3 Проверка достоверности модели. Проверка достоверности расчетов гармоник напряжения и тока ОЗЗ с использованием предложенной обобщенной модели (рис. 2.15, 2.16) производилась посредством сравнения результатов расчетов, полученных с ее использованием, с результатами расчета, полученными на полной модели реальной сети 6 кВ. Для этих целей была создана расчетная модель сети 10 кВ одного из ГПП Новолипецкого металлургического комбината. Сравнение результатов расчета ВГ в напряжениях на шинах основных узлов сети и токах ОЗЗ в различных точках сети, выполненных с использованием полной и обобщенной моделей, показало, что погрешности расчетов ВГ с использованием модели по рис. 2.15 не превышают нескольких процентов, что можно считать приемлемым для целей релейной защиты.

2.4.4 Результаты исследований минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ с использованием имитационных моделей компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Расчеты проводились на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ при вариации параметров модели в соответствии с данными табл. 2.3. Анализ на имитационных моделях показал, что минимальный уровень ВГ в фазных напряжениях сети имеет место на шинах ЦП и уменьшается при увеличении мощности трехфазного КЗ на шинах системы (т.е. сопротивления системы), сопротивлений линий, связывающих приемные подстанции с шинами ЦП, нагрузки трансформаторов и уменьшении напряжения на шинах ЦП. Поэтому минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ также имеет место при ОЗЗ на шинах (вблизи шин) ЦП при указанных расчетных условиях.

В табл. 2.5 и 2.6 приведены результаты расчетов уровней основных гармоник, генерируемых трансформаторами (5 и 7-й), в токе ОЗЗ при замыкании на шинах 6 кВ ЦП для указанных выше наиболее неблагоприятных условий.

На рис. 2.17 и 2.18 приведены зависимости минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ от суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, построенные по данным табл. 2.5 и 2.6 и по данным, приведенным в публикациях Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. [138, 139].

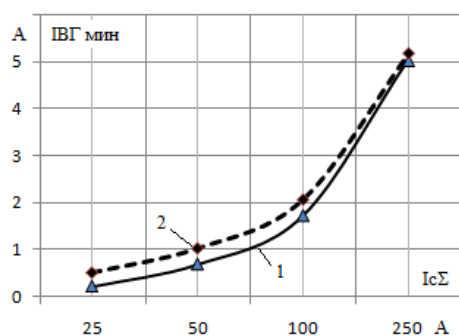
Таблица 2.5 – Расчетные значения уровней 5 и 7 гармоник в сети 6 кВ при $S = S_{num\Sigma}/S_{np\Sigma} = 1,5$

Уровень ВГ в токе ОЗЗ	$I_{c\Sigma} = 25\text{A}$	$I_{c\Sigma} = 50\text{A}$	$I_{c\Sigma} = 100\text{A}$	$I_{c\Sigma} = 250\text{A}$
	$S_{num\Sigma} = 20 \dots 25$ МВА	$S_{num\Sigma} = 31,5 \dots 40$ МВА	$S_{num\Sigma} = 50 \dots 63$ МВА	$S_{num\Sigma} = 80 \dots 100$ МВА
$I_{5\text{ мин}}, \text{A}$	0,33 ... 0,38	0,88 ... 0,98	2,43 ... 2,67	6,46 ... 7,11
$I_{7\text{ мин}}, \text{A}$	0,17 ... 0,19	0,4 ... 0,43	1,04 ... 1,15	2,56 ... 2,82
$I_{ВГ\text{ мин}}, \text{A}$	0,37 ... 0,42	0,97 ... 1,07	2,64 ... 2,91	6,95 ... 7,65
$\alpha_{\text{мин}} = I_{ВГ\text{ мин}}/I_{c\Sigma}, \%$	1,48 ... 1,68	1,37 ... 1,51	2,64 ... 2,91	2,78 ... 3,06

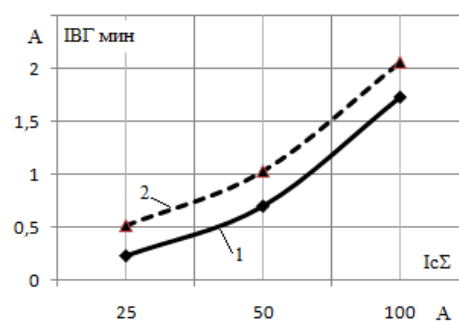
Таблица 2.6 – Расчетные значения уровней 5 и 7 гармоник в сети 6 кВ при $S = S_{\text{sum}\Sigma}/S_{\text{np}\Sigma} = 0,7$

Уровень ВГ в токе ОЗЗ	$I_{c\Sigma} = 25\text{A}$	$I_{c\Sigma} = 50\text{A}$	$I_{c\Sigma} = 100\text{A}$	$I_{c\Sigma} = 250\text{A}$
	$S_{\text{sum}\Sigma} = 20 \dots 25$ МВА	$S_{\text{sum}\Sigma} = 31,5 \dots 40$ МВА	$S_{\text{sum}\Sigma} = 50 \dots 63$ МВА	$S_{\text{sum}\Sigma} = 80 \dots 100$ МВА
$I_{5\text{мин}}, \text{A}$	0,2 ... 0,23	0,56 ... 0,65	1,55 ... 1,78	4,73 ... 5,44
$I_{7\text{мин}}, \text{A}$	0,11 ... 0,13	0,32 ... 0,35	0,78 ... 0,9	1,85 ... 2,13
$I_{\text{ВГ мин}}, \text{A}$	0,23 ... 0,26	0,7 ... 0,74	1,73 ... 1,99	5,02 ... 5,84
$\alpha_{\text{мин}} = I_{\text{ВГ мин}}/I_{c\Sigma}, \%$	0,92 ... 1,04	1,4 ... 1,48	1,73 ... 1,99	2,01 ... 2,34

Из данных, приведенных в табл. 2.5 и 2.6 можно видеть, что минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ примерно равен $I_{\text{ВГ мин}} = \sim(0,92 \dots 2,8)\%$, по данным [138] – примерно $\sim 2,7\%$, по данным [139] – примерно $\sim 1,9\%$ от значения $I_{c\Sigma}$. Из рис. 2.17 и 2.18 можно видеть, что оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, полученные в данной работе и в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. [138, 139] практически точно совпадают при больших значениях суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma} \geq 100 \text{ A}$, что подтверждает достоверность полученных на имитационных моделях результатов. Однако при меньших значениях $I_{c\Sigma}$ оценки $I_{\text{ВГ мин}}$, полученные на имитационных моделях кабельных сетей, примерно в два раза меньше полученных в указанных выше работах, что определяется большей точностью применяемых для расчета моделей кабельных сетей 6–10 кВ и их элементов.

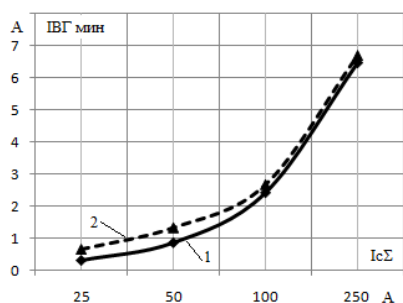


а)

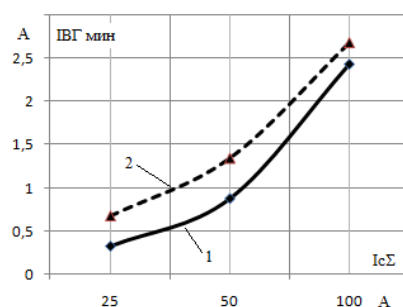


б)

Рисунок 2.17 – Зависимости $I_{\text{ВГ мин}} = f(I_{c\Sigma})$ (б – в увеличенном масштабе при небольших значениях $I_{c\Sigma}$): 1 – по результатам расчетов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ; 2 – по данным, приведенным в работе Кискачи В.М. [138]



а)



б)

Рисунок 2.18 – Зависимости $I_{BG\min} = f(I_{c\Sigma})$ (б – в увеличенном масштабе при небольших значениях $I_{c\Sigma}$): 1 – по результатам расчетов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ; 2 – по данным, приведенным в работе Жежеленко И.В. [139]

Принимая за основу более жесткие оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей, полученные в данной работе, при определений требований к чувствительности по первичному току защит на основе ВГ с некоторым запасом можно принять $I_{BG\min} \approx 0,01 I_{c\Sigma}$ (~1% от $I_{c\Sigma}$). Для защит от ОЗЗ на основе ВГ рекомендуется иметь коэффициент чувствительности не менее 1,5–2,0 [10, 137]. С учетом этого при $I_{c\Sigma\min} = 20$ А получим

$$I_{с.з. мин} = \frac{I_{BG\min}}{K_{ч. мин}} = \frac{0,01 I_{c\Sigma\min}}{K_{ч. мин}} = \frac{0,01 \cdot 20}{2} = 0,1 \text{ А.}$$

Измерения в реальных сетях дают обычно большие значения минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. Например, по данным [141], полученным на основе измерений в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, ЦП которых являются ГРУ ТЭЦ, минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ, как правило, не меньше 4%, что можно объяснить действием в режиме измерений, кроме трансформаторов, и других источников ВГ (генераторов, ДГР и др.).

2.4.5 Приближенный аналитический расчет минимального уровня ВГ в токах ОЗЗ. Для приближенных оценок минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ можно применить аналитический метод расчета с использованием упрощенной схемы замещения сети 6–10 кВ. Учитывая наличие в токах фаз ВГ составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей, аналитические расчеты более просто выполнять с использованием комплексной схемы замещения, составленной с использованием метода симметричных составляющих (рис. 2.19).

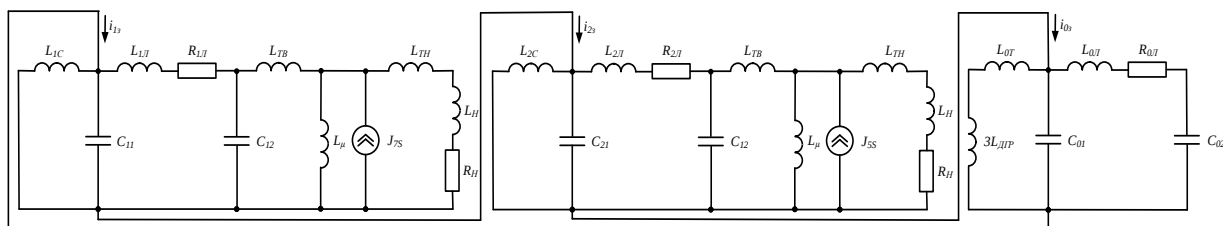


Рисунок 2.19 – Комплексная схема замещения для расчета минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ на шинах ЦП

В схеме по рис. 2.19 в источниках тока учтены гармоники, входящие в рабочий спектр частот устройств защиты от ОЗЗ на основе ВГ ($\nu = 3, 5, 7, 9, 11, 13$), причем гармоники, кратные 3-м, образуют систему нулевой последовательности, 5 и 11 гармоники – систему обратной последовательности, гармоники 7, 13 – систему прямой последовательности. Аналитические расчеты и расчеты на трехфазных моделях сетей 6–10 кВ показали, что без существенного ущерба для приближенных расчетов в схеме рис. 2.19 можно пренебречь влиянием на уровень ВГ ДГР, индуктивностей намагничивания и сопротивлений обмоток трансформаторов нагрузки и представить кабельные линии Г-образной схемой замещения. С учетом указанных допущений аналитическое решение для схемы замещения рис. 2.19 имеет вид

$$I_{3\nu}^{(1)} = 3I_{0\nu} = \frac{3J_{\nu\Sigma} Z_{H\nu} Z_{c\nu}}{(Z_{L\nu} + Z_{H\nu})(Z_{c\nu} + Z_{I(2)\nu} + Z_{0\nu}) + Z_{c\nu}(Z_{I(2)\nu} + Z_{0\nu})}, \quad (2.8)$$

где $Z_{H\nu}$, $Z_{c\nu}$, $Z_{L\nu}$, $Z_{0\nu}$, $Z_{I(2)\nu}$ – комплексные сопротивления нагрузки, сети, линии, эквивалентное сопротивление системы нулевой и прямой (обратной) последовательности соответственно, $J_{\nu\Sigma}$ – ток источника ВГ.

Сравнение результатов расчетов минимального уровня ВГ в сетях 6–10 кВ, выполненных на моделях в системе Simulink и с использованием упрощенной схемы замещения по рис. 2.19 по (2.8) показало, что погрешности аналитического решения могут быть оценены величиной 10–15%.

2.4.6 Оценка максимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ можно оценить по предельно допустимым ГОСТ 13109-97 для сетей 6–10 кВ значениям коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{Uнс макс} = 0,08$ и предельно допустимым коэффициентам $K_{U\nu пред}$ отдельных гармонических составляющих $\nu = 5, 7, 11, 13$, определяемых по выражению $K_{U\nu пред} = 1,5 K_{U\nu норм}$ (табл. 2.7). Наибольший уровень ВГ в токе ОЗЗ гармоник $\nu = 5, 7, 11, 13$ будет иметь место, если $K_{Uнс}$ определяется только указанными гармониками,

при этом для обеспечения $K_{U_{нс макс}} \leq 0,08$ необходимо принять $K_{U5 пред} \approx 5\%$, т.е. несколько меньше $K_{U5 пред} = 6\%$ (табл. 2.7).

Таблица 2.7 – Значения нормально и предельно допустимых коэффициентов несинусоидальности напряжения для гармоник в диапазоне частот до 650 Гц

Номер гармоники ν	5	7	11	13
$K_{U\nu норм}, \%$	4	3	2	2
$K_{U\nu пред}, \%$	6	4,5	3	3

Тогда при определенных рассмотренным способом относительных уровнях гармонических составляющих напряжения максимальный общий уровень ВГ в токе ОЗЗ будет равен:

$$\alpha_{макс} = K_{нс\%} = 100 \sqrt{(5K_{U5 пред})^2 + (7K_{U7 пред})^2 + (11K_{U11 пред})^2 + (13K_{U13 пред})^2} \approx 65\%. \quad (2.9)$$

По данным [189], полученным на основе измерений в реальных компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ $\alpha_{макс.эксп}$ может достигать значений 35–40% и более. Таким образом, экспериментальные оценки $\alpha_{макс.эксп}$ относительно близки к полученной выше расчетной оценке $\alpha_{макс} \approx 65\%$.

2.5 Анализ колебаний уровня высших гармоник в токе замыкания на землю кабельных сетей 6–10 кВ

2.5.1 Факторы, влияющие на степень неустойчивости уровня ВГ. Степень неустойчивости уровня ВГ в токе ОЗЗ оценивается параметром [137]:

$$Z = \frac{I_{v\Sigma макс}}{I_{v\Sigma мин}} = \frac{\alpha_{макс} I_{C\Sigma}}{\alpha_{мин} I_{C\Sigma}} = \frac{\alpha_{макс}}{\alpha_{мин}}, \quad (2.10)$$

где $\alpha_{макс}$, $\alpha_{мин}$ – соответственно максимальный и минимальный уровень ВГ по отношению к суммарному емкостному току сети $I_{C\Sigma}$.

Основными факторами, определяющими степень неустойчивости уровня ВГ в токах ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ являются:

- состав комплексной нагрузки узла (ЦП);
- изменения нагрузки в течение суток (суточный график нагрузки);
- изменения режимов работы ВП, ЭСУ и ЭТУ в составе комплексной нагрузки;

– колебания напряжения в сети.

Для большинства предприятий наибольшее влияние на степень нестабильности уровня ВГ оказывают первые три фактора.

В табл. 2.8 приведен типовой состав узлов комплексной нагрузки, содержащей основные источники ВГ, для предприятий различных отраслей промышленности [187].

Таблица 2.8 – Типовой состав комплексной нагрузки ЦП, содержащей основные источники ВГ

Отрасль промышленности	Состав потребителей узла комплексной нагрузки, %						
	СД	АДВ	АДН	ЭО	ЭТУ	ЭСУ	ВП
Цветная металлургия	10	5	27,5	1,5	10	-	46
Химическая промышленность	35±7	15±6	29±8	~2,4	~3	~1	~12
Угледобыча шахтная	4	7	67	15	-	-	7
Черная металлургия	25	8	29,5	2,5	22	3	10
Автомобилестроение	9	10	48	5	19	3	6
Машиностроение	8	5	52	5	13	14	3
Электротяга	-	-	5	5	-	-	90

В табл. 2.8: СД – синхронные электродвигатели, АДВ – асинхронные электродвигатели высоковольтные; АДН – асинхронные электродвигатели низковольтные; ЭО – электрическое освещение; ЭТУ – электротермические установки; ЭСУ – электросварочные установки; ВП – нелинейные (вентильные) преобразователи переменного тока в постоянный.

Относительные значения гармоник в токах нагрузки существенно зависят от суточных графиков нагрузки ЦП. Характерные суточные графики нагрузок [177] для рассматриваемых в табл. 2.8 отраслей промышленности приведены на рис. 2.20.

Наиболее резкие колебания общего уровня ВГ в течение суток и рабочей недели следует ожидать прежде всего на предприятиях, работающих в сменах с выходным днем, когда возможны резкое уменьшение общей нагрузки, сопровождаемое частичным или полным отключением основных источников ВГ (например, черная металлургия (ЧМ), автомобилестроение (АС)). Более стабильный уровень ВГ следует ожидать на предприятиях, имеющих непрерывное производство (цветная металлургия (ЦМ), химическая промышленность (ХП)).

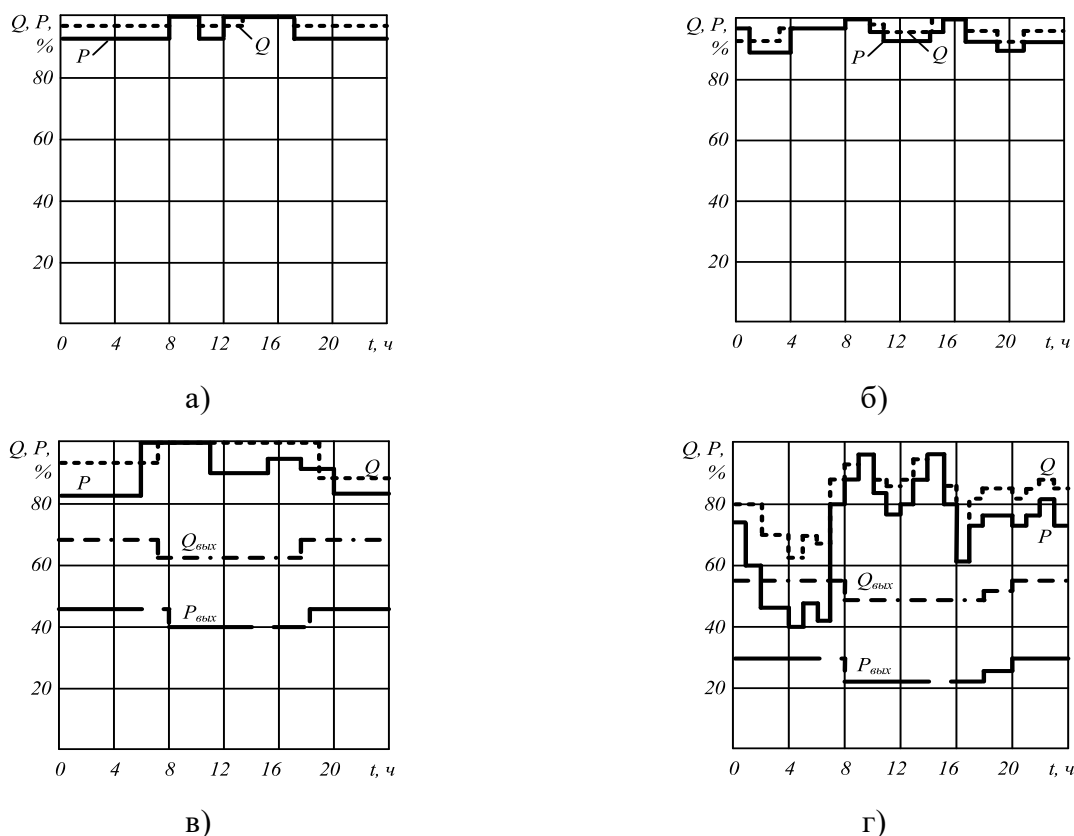


Рисунок 2.20 – Характерные суточные графики нагрузок предприятий различных отраслей промышленности: а – цветная металлургия; б – химия; в – черная металлургия; г – автомобилестроение

При оценке нестабильности уровня ВГ в токах нагрузки, обусловленных ВП и ЭСУ, принималось, что их уровень в зависимости от режима их работы может меняться в среднем от 3-х до 5-6 раз (раздел 2.3).

В цикле работы различного рода электропечей имеются периоды, связанные с загрузкой печи, выгрузкой металла, когда печь не является источником ВГ, что также учитывалось при оценке степени нестабильности ВГ в токах ОЗЗ.

Наибольшую степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ Z следует ожидать в кабельных сетях 6–10 кВ, питаемых от электротяговых подстанций из-за большой доли в составе нагрузки ВП и резкопеременного режима нагрузки. Высокая степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ Z характерна также для сетей, основной нагрузкой ЦП которых являются мощные электродуговые печи из-за высокого уровня генерируемых ими гармоник и резкопеременного режима работы. В таких кабельных сетях обеспечить высокую устойчивость функционирования токовых защит от ОЗЗ абсолютного замера ВГ практически невозможно, и ниже они не рассматриваются.

2.5.2 Расчеты колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. Расчетная модель для оценки степени неустойчивости уровня ВГ в токе ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий указанных отраслей промышленности приведена на рис. 2.21.

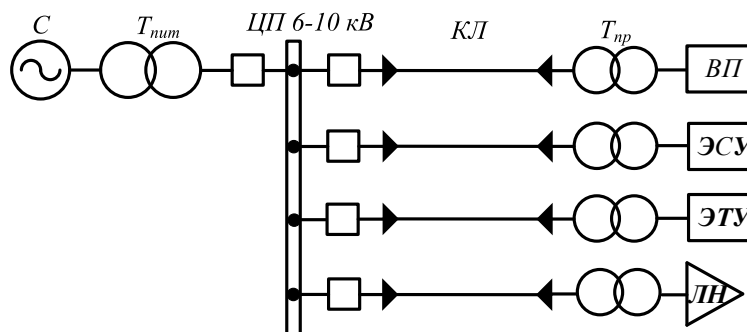


Рисунок 2.21 – Расчетная модель компенсированной кабельной сети 6–10 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия для оценки степени неустойчивости уровня ВГ в токе ОЗЗ

Расчеты на имитационных моделях выполнены для ЦП кабельных сетей 6–10 кВ отраслей промышленности, характеризующихся значительной долей в составе нагрузки ВП, ЭСУ, ЭТУ, суточные графики которых приведены на рис. 2.20. При расчетах максимального уровня ВГ в токе ОЗЗ $I_{ВГ\max} = \alpha_{\max} I_{СЗ}$ приняты следующие допущения:

- предприятие рассматриваемой отрасли работает в режиме максимальной нагрузки в соответствии с суточным графиком;
- все основные источники ВГ (НП, ЭСУ, ЭТУ) включены и работают в режиме, обуславливающем максимальный уровень ВГ токах нагрузки;
- напряжение на шинах ЦП равно $1,05 U_{ном}$.

При расчетах минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ принимались следующие допущения:

- предприятие рассматриваемой отрасли работает в режиме минимальной нагрузки в соответствии с суточным графиком;
- доля нелинейной нагрузки уменьшается пропорционально уменьшению общей нагрузки ЦП;
- ЭТУ могут быть полностью выведены из работы как источники ВГ;
- минимальный уровень ВГ, генерируемых ВП и ЭСУ, в 5–6 раз меньше, чем максимальный;
- напряжение на шинах ЦП равно $U_{ном}$.

Расчеты выполнены для следующих условий:

- номинальное напряжение сети $U_{ном} = 6$ кВ;
- суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma} = 25$ А;
- мощность питающего трансформатора $S_{пит. тр} = 31,5$ МВА (63/2);
- суммарная мощность трансформаторов приемных подстанций $S_{\Sigma пр. тр} = 47,25$ МВА ($s = S_{\Sigma пр. тр} / S_{пит. тр} = 1,5$);
- коэффициент загрузки трансформаторов приемных подстанций $K_{загр} = 0,7$.

В табл. 2.9 приведены полученные на имитационных моделях кабельных сетей оценки параметра Z для отдельных гармоник $\nu = 5, 7, 11, 13$ и суммы указанных гармонических составляющих, используемых в защитах от ОЗЗ на основе ВГ.

Таблица 2.9 – Расчетные значения степени неустойчивости ν -й гармоники Z_ν и Z_Σ для гармоник $\nu = 5, 7, 11, 13$ в токе ОЗЗ

Отрасль промышленности	Z_ν				
	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$	Z_Σ
Цветная металлургия	3,36	2,77	1,25	0,85	2,01
Химическая промышленность	3,38	3,05	1,91	1,24	2,44
Черная металлургия	9,22	7,57	3,98	2,98	4,99
Автомобилестроение	11,1	8,61	4,9	2,59	5,87

Из данных табл. 2.9 можно видеть, что, как и следовало ожидать, степень неустойчивости общего уровня ВГ в токе ОЗЗ Z выше в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий со сменным режимом работы: $Z = 5$ –6 (например, черная металлургия, автомобилестроение). Отметим, что полученные оценки параметра Z для кабельных сетей 6–10 кВ систем электроснабжения таких предприятий в 1,5–2 раза больше рекомендуемых для использования при расчетах токовых защит на основе ВГ и оценке области их возможного применения $Z = 2$ –3,5 [137].

Для кабельных сетей 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий с непрерывным суточным графиком работы (цветная металлургия, химическая промышленность) расчетные значения параметра $Z \approx 2$ –3, т.е. соответствуют оценкам, приведенным в [137].

2.5.3 Приближенная аналитическая оценка степени неустойчивости уровня ВГ в токе ОЗЗ. Исследования на имитационных моделях показали, что максимальный уровень ВГ в фазных напряжениях и, соответственно, в токе ОЗЗ определяют ВП. Для при-

ближенной оценки степени неустойчивости уровня ВГ в токах ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ примем, что в составе комплексной нагрузки ЦП источниками ВГ являются только силовые трансформаторы 6–10/0,4 кВ приемных подстанций и ВП, что характерно для предприятий ряда отраслей промышленности (табл. 2.8). Тогда максимальный и минимальный относительные уровни ν -й гармоники в фазных токах и пропорциональные им уровни ν -й гармоники в фазных напряжениях, генерируемых указанными источниками, можно определить из выражений:

$$k_{U\nu\max} = \frac{U_{\nu\max}}{U_{\phi.m}} \approx \left| \dot{k}_{U\nu\max}^{(T)} + \dot{k}_{U\nu\max}^{(ВП)} \right| \approx K_{\phi} (k_{U\nu\max}^{(T)} + k_{U\nu\max}^{(ВП)}); \quad (2.11)$$

$$k_{U\nu\min} = \frac{U_{\nu\min}}{U_{\phi.m}} \approx \left| \dot{k}_{U\nu\min}^{(T)} + \dot{k}_{U\nu\min}^{(ВП)} \right| \approx K_{\phi} (k_{U\nu\min}^{(T)} + k_{U\nu\min}^{(ВП)}), \quad (2.12)$$

где $k_{U\nu\max}^{(T)}, k_{U\nu\max}^{(ВП)}, k_{U\nu\min}^{(T)}, k_{U\nu\min}^{(ВП)}$ – соответственно максимальные и минимальные уровни ν -й гармоники, генерируемые силовыми трансформаторами и вентильными преобразователями; $K_{\phi} \leq 1$ – коэффициент, приближенно учитывающий, что гармоники ν -го порядка, генерируемые разными источниками, в общем случае не совпадают по фазе.

В [159–163] рекомендуется принимать коэффициент $K_{\phi} \approx 0,7$.

При известных $k_{U\nu\max}$ и $k_{U\nu\min}$ коэффициент Z , характеризующий степень неустойчивости уровня ВГ в токе ОЗЗ, равен

$$Z = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} = \frac{K_{\text{Инс макс}}}{K_{\text{Инс мин}}} = \frac{\sqrt{\sum_{\nu=5}^{13} (\nu \cdot k_{U\nu\max})^2}}{\sqrt{\sum_{\nu=5}^{13} (\nu \cdot k_{U\nu\min})^2}}. \quad (2.13)$$

Расчеты на имитационных моделях показывают, что нагрузка трансформаторов приемных подстанций – ТП и сопротивление КЛ, связывающих ЦП с ТП, приводят к уменьшению гармоник напряжения на шинах ЦП примерно на 10–15% как в режимах, соответствующих максимальному, так и минимальному уровню ВГ в фазных напряжениях и, соответственно, в токе ОЗЗ, т.е. практически не влияет на отношение $\alpha_{\max}/\alpha_{\min}$, и указанные факторы при приближенных расчетах можно не учитывать. Примем также, что трансформаторы приемных подстанций имеют примерно одинаковые относительные значения тока холостого хода (тока намагничивания) – для современных трансформаторов 6–10/0,4 кВ $I_{x.x} \approx 1,5–2\%$. Тогда относительный уровень ν -й гармоники напряжения на шинах ЦП, со-

здаваемый соответствующей гармоникой тока намагничивания трансформаторов приемных подстанций, приближенно можно определить из выражений:

$$k_{U_{V.макс}}^{(T)} \approx \nu \frac{I_{x.x\%}}{100} \alpha_{V.макс}^{(T)} \frac{S_{\Sigma ном}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}; \quad (2.14)$$

$$k_{U_{V.мин}}^{(T)} \approx \nu \frac{I_{x.x\%}}{100} \alpha_{V.мин}^{(T)} \frac{S_{\Sigma ном}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}, \quad (2.15)$$

где $S_{\Sigma ном}^{(T)} = \sum_1^n S_{i ном}^{(T)}$ – суммарная установленная мощность трансформаторов приемных подстанций; $S_{\kappa}^{(3)}$ – мощность трехфазного КЗ на шинах 6–10 кВ ЦП в расчетном режиме; $\alpha_V^{(T)}$ – доля ν -й гармоники в токе $I_{x.x}$ трансформаторов.

Для ВП максимальный и минимальный уровни генерируемой ими ν -й гармоники напряжения на шинах ЦП при указанных выше расчетных условиях приближенно можно определить по выражению:

$$k_{U_{V.макс}}^{(ВП)} \approx \nu \cdot \alpha_{V.макс}^{(ВП)} \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{*макс}^{(ВП)} \cdot S_{\Sigma ном}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}; \quad (2.16)$$

$$k_{U_{V.мин}}^{(ВП)} \approx \nu \cdot \alpha_{V.мин}^{(ВП)} \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{*мин}^{(ВП)} \cdot S_{\Sigma ном}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}, \quad (2.17)$$

где $K_3^{(T)}$ – коэффициент загрузки трансформаторов; $S_{*макс}^{(ВП)}$, $S_{*мин}^{(ВП)}$ – нагрузка ВП в долях от $S_{\Sigma ном}^{(T)}$ с учетом суточного графика для данного производства.

Для силовых трансформаторов значения $\alpha_{V.макс}^{(T)}$ и $\alpha_{V.мин}^{(T)}$ определяются напряжением на вводах и нагрузкой. При загрузке трансформатора, составляющей примерно 70% от номинальной мощности, для 5-й и 7-й гармоник значения $\alpha_{V.макс}^{(T)}$ и $\alpha_{V.мин}^{(T)}$ (табл. 2.5, 2.6) равны: $\alpha_{5макс}^{(T)} \approx 0,137$; $\alpha_{7макс}^{(T)} \approx 0,051$; $\alpha_{5мин}^{(T)} \approx 0,079$; $\alpha_{7мин}^{(T)} \approx 0,01$.

Для управляемых и неуправляемых ВП $\alpha_{5макс}^{(ВП)} \approx 0,2$; $\alpha_{7макс}^{(ВП)} \approx 0,14$; $\alpha_{11макс}^{(ВП)} \approx 0,02$; $\alpha_{13макс}^{(ВП)} \approx 0,01$. Для управляемых ВП значения $\alpha_{V.мин}^{(ВП)}$ могут быть приближенно определены из зависимостей, приведенных на рис. 2.2. При значениях угла управления $\alpha \leq 30^\circ$ и угла коммутации γ до 40° можно приближенно принять $\alpha_{5мин}^{(ВП)} \approx 0,12$; $\alpha_{7мин}^{(ВП)} \approx 0,04$; $\alpha_{11мин}^{(ВП)} \approx 0,02$; $\alpha_{13мин}^{(ВП)} \approx 0,01$.

Из (2.13) с учетом (2.14) – (2.17) получим:

$$Z = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} K_{\phi}^2 \left(v \frac{I_{x.x\%}}{100} \alpha_{v\max}^{(T)} \frac{S_{\Sigma\text{ном}}^{(T)}}{S_k^{(3)}} + v \cdot \alpha_{v\max}^{(ВП)} \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{* \max}^{(ВП)} \cdot S_{\Sigma\text{ном}}^{(T)}}{S_k^{(3)}} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} K_{\phi}^2 \left(v \frac{I_{x.x\%}}{100} \alpha_{v\min}^{(T)} \frac{S_{\Sigma\text{ном}}^{(T)}}{S_k^{(3)}} + v \cdot \alpha_{v\min}^{(ВП)} \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{* \min}^{(ВП)} \cdot S_{\Sigma\text{ном}}^{(T)}}{S_k^{(3)}} \right)^2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} \left(v \frac{I_{x.x\%}}{100} \alpha_{v\max}^{(T)} + v \cdot \alpha_{v\max}^{(ВП)} K_3^{(T)} \cdot S_{* \max}^{(ВП)} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} \left(v \frac{I_{x.x\%}}{100} \alpha_{v\min}^{(T)} + v \cdot \alpha_{v\min}^{(ВП)} K_3^{(T)} \cdot S_{* \min}^{(ВП)} \right)^2}}. \quad (2.18)$$

Отметим, что рассмотренным способом можно учесть в уравнениях не только силовые трансформаторы и ВП, но и другие источники ВГ (например, ЭСУ, ЭТУ и др.), что позволит повысить точность аналитической модели для оценки степени нестабильности уровня гармоник в токе ОЗЗ.

В табл. 2.10 приведены результаты расчетов по выражению (2.18) колебаний общего уровня ВГ для предприятий различных отраслей промышленности, в т.ч. для тяговых подстанций и сетей с преобладающей коммунально-бытовой нагрузкой.

Таблица 2.10 – Результаты приближенных аналитических оценок по (2.18) степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ

	$I_{x.x}, \%$	$K_z, \text{о.е.}$	$S_{* \max}^{(ВП)}, \text{о.е.}$	$S_{* \max}^{(ВП)}, \text{о.е.}$	$Z, \text{о.е.}$
Цветная металлургия	2	0,7	0,46	0,46	2,01
Химическая промышленность	2	0,7	0,12	0,12	1,95
Черная металлургия	2	0,7	0,1	0,04	4,04
Автомобилестроение	2	0,7	0,06	0,015	4,66
Электротяга	2	0,7	0,9	0,09	17,57
Коммунально-бытовая нагрузка	2	0,7	0,1	0	7,51

Из данных табл. 2.9 можно видеть, что аналитические оценки параметра Z отличаются от оценок, полученных на имитационных моделях кабельных сетей, не более, чем на 15–20%, что можно считать приемлемым для приближенных оценочных расчетов.

В табл. 2.10 приведены также результаты оценочных расчетов параметра Z для тяговых ГПП и ГПП, питающей коммунально-бытовую нагрузку. Расчеты для тяговой ГПП выполнены в предположении, что максимальная нагрузка ВП отличается от минимальной в 10 раз. Приведенные результаты оценочных расчетов для предприятий элек-

тот же подтверждают предположение о высокой степени нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей таких подстанций, обусловленной большой долей мощных нелинейных источников ВГ и резко-переменным режимом их работы. При таких больших значениях параметра Z обеспечить устойчивость функционирования токовых защит абсолютного замера ВГ невозможно. Аналогичную высокую степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ следует также ожидать в сетях ГПП, питающих электродуговые печи большой мощности, из-за большой доли нелинейной нагрузки в составе комплексной нагрузки и резко-переменного режима ее работы.

Для коммунально-бытовой нагрузки принято, что доля ВП от суммарной комплексной нагрузки в максимальном режиме составляет 5%, а в минимальном режиме все ВП отключаются, например, в ночное время. Обращает на себя внимание, что при возможности режимов полного вывода из работы ВП даже при небольшой доле ВП в составе комплексной нагрузки ЦП степень нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ может быть достаточно высокой.

2.5.4 Оценка области возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ. Область возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ определяется соотношением (1.5). Если принять $Z_{\max} = 6$, из (1.5) при $K_{отс} = K_{ч.мин} = 1,5$ получим, что токовые защиты абсолютного замера ВГ можно применить на присоединениях, собственный емкостный ток которых не превышает значений

$$I_{ci*} = \frac{I_{ci}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + Z_{\max} K_{отс} K_{ч.мин}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot 1,5 \cdot 1,5} \approx 0,07.$$

Доля таких присоединений на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ по данным [70] не превышает 70%, что заметно ограничивает область возможного применения токовых защит абсолютного замера ВГ на таких объектах. Дополнительные ограничения области применения рассматриваемых защит возникают в связи с приближенным характером методики выбора уставки по току срабатывания $I_{0с.з.}$, что приводит к необходимости увеличения $K_{отс}$ и $K_{ч.мин}$ в (1.5). В [137] из-за невозможности достаточно точно рассчитать максимальный и минимальный уровни ВГ рекомендуется принимать $K_{отс}$ и $K_{ч.мин}$ не менее 1,5–2, в [190] для токовых защит на основе ВГ рекомендуется принимать $K_{отс} = 3–4$. При таких значениях $K_{отс} = 3$, $K_{ч.мин} = 2$ и $Z = 6$ из (1.5) получим $I_{C\text{собс}*} \leq 0,03$. Доля присоединений на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ, удовлетворяющих данному условию, не

более 50%, на РП – 80–85% [70], что практически делает нецелесообразным применение токовых защит абсолютного замера ВГ на ЦП, а в некоторых случаях и на РП.

Учитывая полученные оценки, можно сделать вывод, что токовые защиты абсолютного замера ВГ неперспективны для применения на ЦП компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, и на объектах данного типа необходимо применять направленные защиты на основе ВГ. В то же время токовые защиты на основе ВГ могут быть достаточно эффективны при применении их, прежде всего, на ТП кабельных сетей систем промышленного электроснабжения.

2.6 Выводы по главе 2

2.6.1 Разработаны математические модели основных источников ВГ в кабельных сетях 6–10 кВ: нелинейных силовых трансформаторов, ВП, ЭСУ, ЭТУ, ДГР, электрической дуги в месте ОЗЗ.

2.6.2 С использованием пакетов расширения Simulink и SimPowerSystem системы моделирования Matlab разработаны математические имитационные модели компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, содержащих источники ВГ, для исследований минимального уровня и колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗЗ в зависимости от режимов работы сети и источников ВГ.

2.6.3 С использованием имитационных моделей по п. 2.6.2 получены оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, определяющего требования к чувствительности защит на основе ВГ. Установлено, что минимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей может составлять ~1% от суммарного емкостного тока защищаемой сети, что в 2–3 раза меньше оценок, полученных в конце 60-х годов Кискачи В.М. и Жежеленко И.В.

2.6.4 С использованием имитационных моделей по п. 2.6.2 получены оценки максимальной степени возможных колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗЗ в зависимости от режимов работы сети и основных источников ВГ. На основе расчетов на моделях установлено, что в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий, имеющих непрерывный режим работы, степень неустойчивости Z уровня ВГ в токе ОЗЗ

имеет значения порядка 2–3, что совпадает с оценками Кискачи В.М., полученными в 60-х годах. В кабельных сетях систем электроснабжения предприятий, имеющих сменный режим работы и выходные дни и существенную долю в составе комплексной нагрузки центра питания ВП или других мощных источников, Z может достигать значений до 5–6 и более. Наибольших значений (до 15 и более) параметр Z может достигать в кабельных сетях ЦП, в комплексной нагрузке которых основную долю составляют мощные источники ВГ, имеющие резко-переменный режим работы (электротяга, мощные электродуговые печи и т.п.).

2.6.5 Получены аналитические решения для оценочных расчетов минимального уровня ВГ и степени нестабильности уровня ВГ в токах ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Погрешности приближенных аналитических решений по сравнению с решениями, полученными на имитационных моделях, можно оценить величиной порядка 15–20%.

2.6.6 При степени нестабильности уровня ВГ в токах ОЗЗ порядка 6 и более условия применимости токовых защит абсолютного замера выполняются примерно для 50% присоединений ЦП, что делает неперспективным их применение на объектах данного типа, поэтому на ЦП необходимо применять направленные защиты. Токовые защиты на основе ВГ могут обеспечить достаточную эффективность функционирования при их использовании на ТП кабельных сетей систем промышленного электроснабжения.

Результаты исследований данной главы отражены в публикациях [76–80, 82, 84, 87–88, 90–93, 102–104, 106, 109].

Глава 3. ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В ТОКАХ И НАПРЯЖЕНИЯХ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

3.1 Постановка задач и обоснование метода исследования

3.1.1 Задачи исследования. В аспекте создания комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю для кабельных сетей 6–10 кВ наиболее важной задачей является распознавание опасных и неопасных для сети и поврежденного элемента разновидностей ОЗЗ. Как показано в главе 1, при дуговых неустойчивых ОЗЗ распознавание наиболее опасных ДПОЗЗ и относительно безопасных ДПрОЗЗ, а также селективная фиксация КрОЗЗ обеспечивается функцией направленной защиты, основанной на использовании электрических величин переходного процесса с измерительным органом направления мощности, обеспечивающим непрерывность действия на интервале времени существования переходного тока. Для данной функции защиты входными информационными величинами являются высшие гармонические составляющие переходных токов и переходного напряжения нулевой последовательности. Фиксация устойчивого характера ОЗЗ и непрерывность действия при УОЗЗ обеспечивается функциями токовых или направленных защит, основанными на использовании составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ. Для последних высшие гармонические составляющие переходных токов и напряжения нулевой последовательности являются сигналами помехи, от которых защита должна быть отстроена.

С учетом изложенного для создания комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ должны быть решены следующие основные задачи:

- 1) анализ частотного спектра переходных токов нулевой последовательности;
- 2) определение рабочего частотного диапазона направленной защиты на основе переходных процессов с измерительным органом непрерывного действия;
- 3) определение требований к чувствительности направленной защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов;

4) анализ зависимости перенапряжений от интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги в целях обоснования критерия опасности дугового прерывистого ОЗЗ для контролируемой сети;

5) исследование зависимости общего уровня высших гармонических составляющих в переходных токах и переходном напряжении нулевой последовательности от интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

3.1.2 Метод исследования. В данной работе исследование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для решения указанных выше задач выполнялось в системе моделирования Matlab с пакетом расширения Simulink. В необходимых случаях использовались также аналитические методы на основе упрощенных схем замещения кабельных сетей 6–10 кВ для выделения основных влияющих факторов и диапазонов их изменения.

3.2 Модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования высших гармонических составляющих в переходных токах и напряжениях при однофазных замыканиях на землю

3.2.1 Эквивалентные модели кабельной сети 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения для исследования переходных процессов при ОЗЗ. Возможности пакетов Simulink и SimPowerSystem позволяют создавать в среде Matlab практически полные модели кабельных сетей 6–10 кВ, достаточно точно учитывающие их реальную конфигурацию, характеристики и параметры линий и других элементов сети. На рис. 3.1 и 3.2 приведены схемы моделей кабельных сетей 6–10 кВ, ЦП которых являются ГПП.

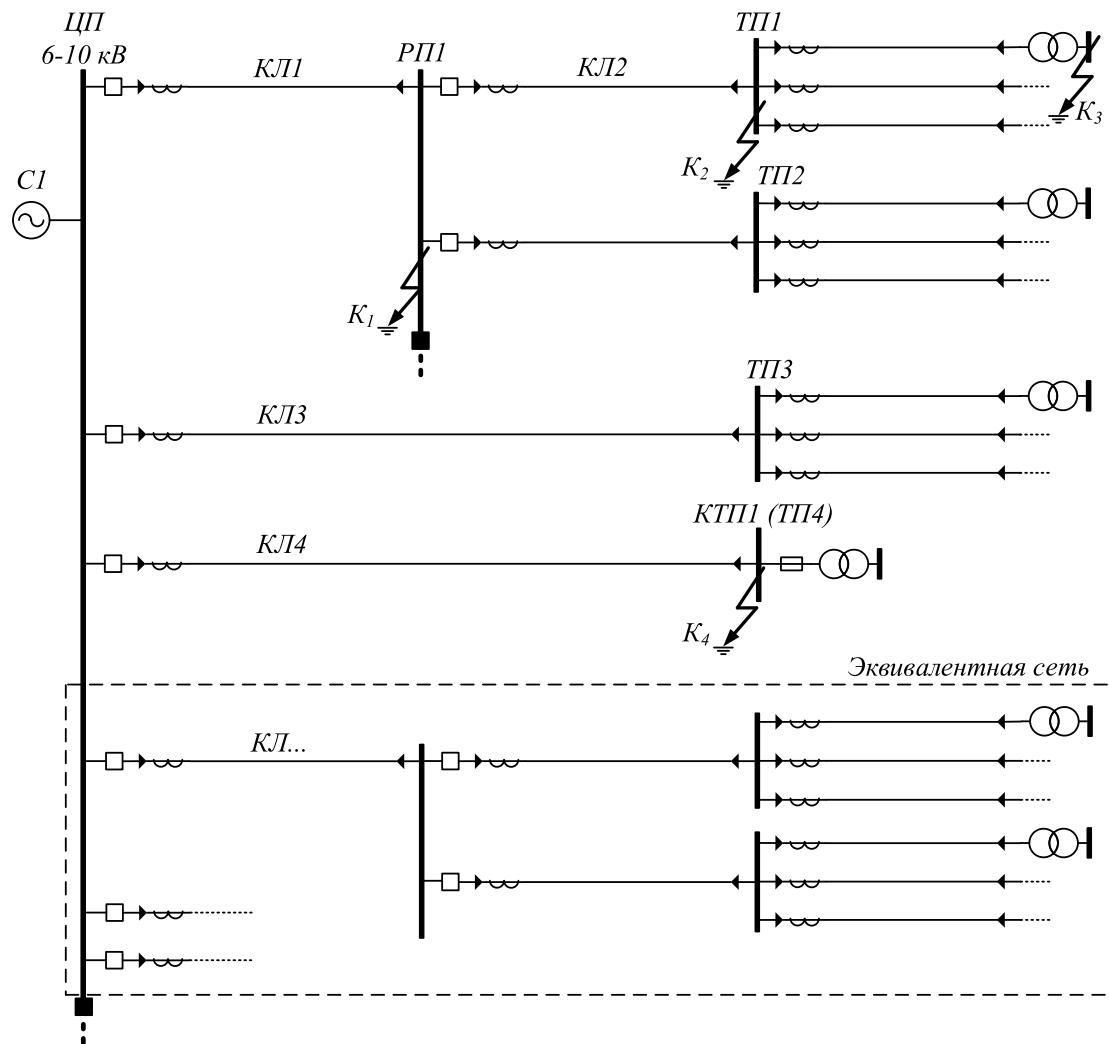


Рисунок 3.1 – Схема модели кабельной сети 6–10 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия и принцип ее эквивалентирования

Аналогичным образом могут быть построены модели, ЦП которых являются шины 6–10 кВ ГРУ ТЭЦ или реактированное ответвление от генератора, работающего в блоке с трансформатором. Однако вычислительные модели для расчета переходных процессов в полных схемах кабельных сетей 6–10 кВ (например, соответствующих рис. 3.1, 3.2), на каждом шаге интегрирования описываются системами алгебраических уравнений большого порядка, что приводит к значительным затратам времени на проведение вычислительных экспериментов.

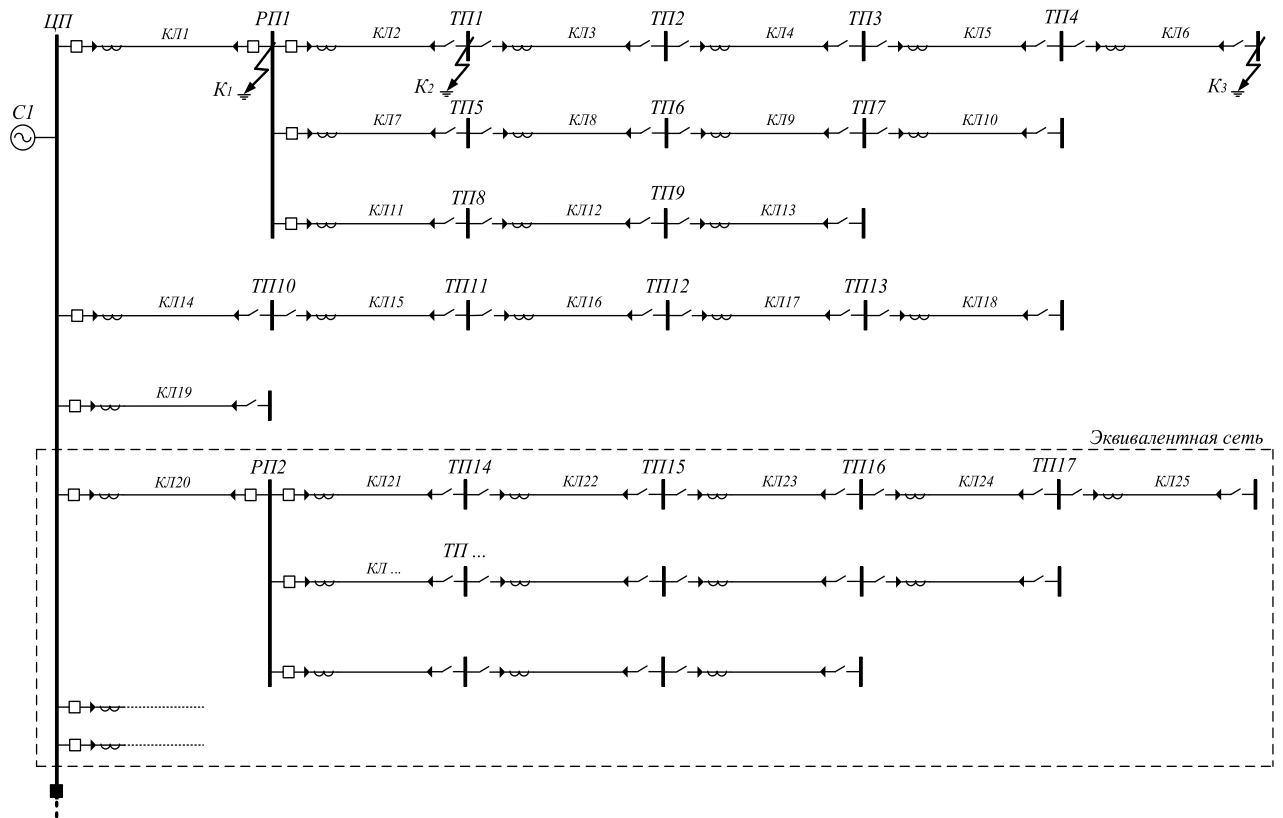


Рисунок 3.2 – Схема модели кабельной сети 6–10 кВ системы городского электроснабжения и принцип ее эквивалентирования

В [190] показано, что без ущерба для точности оценки основных параметров разрядной и зарядной составляющих переходных токов нулевой последовательности в месте ОЗЗ, в поврежденном и неповрежденных присоединениях и переходного напряжения нулевой последовательности можно использовать эквивалентную схему, в которой полными моделями учтены только поврежденное и неповрежденное присоединения, а вся остальная часть сети представлена упрощенной эквивалентной схемой замещения (обведена пунктиром на рис. 3.1 и 3.2). С учетом этого расчеты временных зависимостей и частотных характеристик переходных токов ОЗЗ проводились с использованием эквивалентированных указанным выше образом моделей.

3.2.2 Методика определения параметров кабельных линий 6–10 кВ при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ. Для моделирования кабельных линий с учетом распределенного характера их параметров в среде Matlab, как правило, используется стандартный блок SimPowerSystem Distributed Parameters Line, параметры которого задаются удельными (на 1 км длины) индуктивностями, активными сопротивлениями и емкостями прямой и нулевой последовательности. Индуктивность и активное сопротивление КЛ с

распределенными параметрами в общем случае зависят от частоты переходного тока, однако в блоке Distributed Parameters Line такая возможность не предусмотрена.

Известно, что в переходных токах и напряжениях можно выделить две основные частотные составляющие: разрядную (высокочастотную) и зарядную (среднечастотную), соответствующие двум стадиям переходного процесса электрических сетях среднего напряжения [33, 41, 62, 72, 120, 130, 192]. В [120] показано, что частоты разрядных составляющих в основном определяются индуктивностью поврежденного участка КЛ от шин ЦП до места ОЗЗ. Частота зарядной составляющей в кабельных сетях в основном зависит от индуктивности источника питания [например, 1, 8, 120]. С учетом этого параметры модели КЛ в первую очередь должны обеспечивать максимальную точность отображения разрядной стадии переходного процесса. Выполнение этого требования обеспечивается, если индуктивности прямой и нулевой последовательности в модели КЛ определять по скорости распространения электромагнитных волн в соответствующих контурах:

$$L_1 \approx \frac{1}{v_1^2 C_1}; \quad (3.1)$$

$$L_0 \approx \frac{1}{v_0^2 C_0}, \quad (3.2)$$

где $C_1 = C_{раб} = C_{0л} + 3C_{мл}$; $C_0 = C_{0л}$ – емкости для составляющих прямой и нулевой последовательностей; v_1, v_0 – скорости распространения электромагнитных волн в каналах «фаза – фаза» (прямая последовательность) и «фаза – земля» (нулевая последовательность).

Для кабельных линий 6–10 кВ $v_1 \approx v_0 = 150\text{--}160$ м/мкс [193].

Более сложно учесть зависимость от частоты активных сопротивлений кабельных линий. При выполнении данной работы активное сопротивление линий подбиралось таким образом, чтобы обеспечить время затухания разрядной и зарядной составляющих переходного тока примерно равным времени их затухания в реальных кабельных сетях 6–10 кВ. Зарядные составляющие в реальных кабельных сетях полностью затухают примерно через 3–5 мс, разрядные – через доли миллисекунды [1, 8, 129].

При параметрировании моделей использовались предельные и средние значения параметров элементов кабельных сетей 6–10 кВ, полученные на основе статистического анализа данных по системам промышленного и городского электроснабжения (глава 1, табл. 1.1).

3.3 Соотношения и параметры переходных токов, влияющие на селективность и устойчивость функционирования защит от замыканий на землю

3.3.1 Особенности соотношений мгновенных значений переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Исследования проводились на моделях кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения, приведенных на рис. 3.1 и 3.2. При исследованиях изменялись место ОЗЗ (на шинах ЦП, в конце и в промежуточных точках питающих и распределительных линий), а также режим заземления нейтрали и параметры сети, переходное сопротивление в месте повреждения. При всех ОЗЗ фиксировались и анализировались расчетные осциллограммы переходного тока в месте повреждения i_z , переходные токи в поврежденном и неповрежденных присоединениях, переходное напряжение нулевой последовательности $3u_0$.

Анализ расчетных осциллограмм показал, что принимаемое часто допущение о том, что переходный ток в месте ОЗЗ распределяется между неповрежденными присоединениями пропорционально их емкостям фаз на землю и, соответственно, о достаточной близости по форме переходных токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденных присоединениях [например, 1, 4, 71 и др.] в кабельных сетях 6–10 кВ из-за больших значений амплитуд разрядных составляющих не всегда соответствует действительности. В наибольшей степени влияние разрядных составляющих на форму переходных токов нулевой последовательности в поврежденном присоединении проявляется при близких к шинам ОЗЗ (например, рис. 3.3, 3.4).

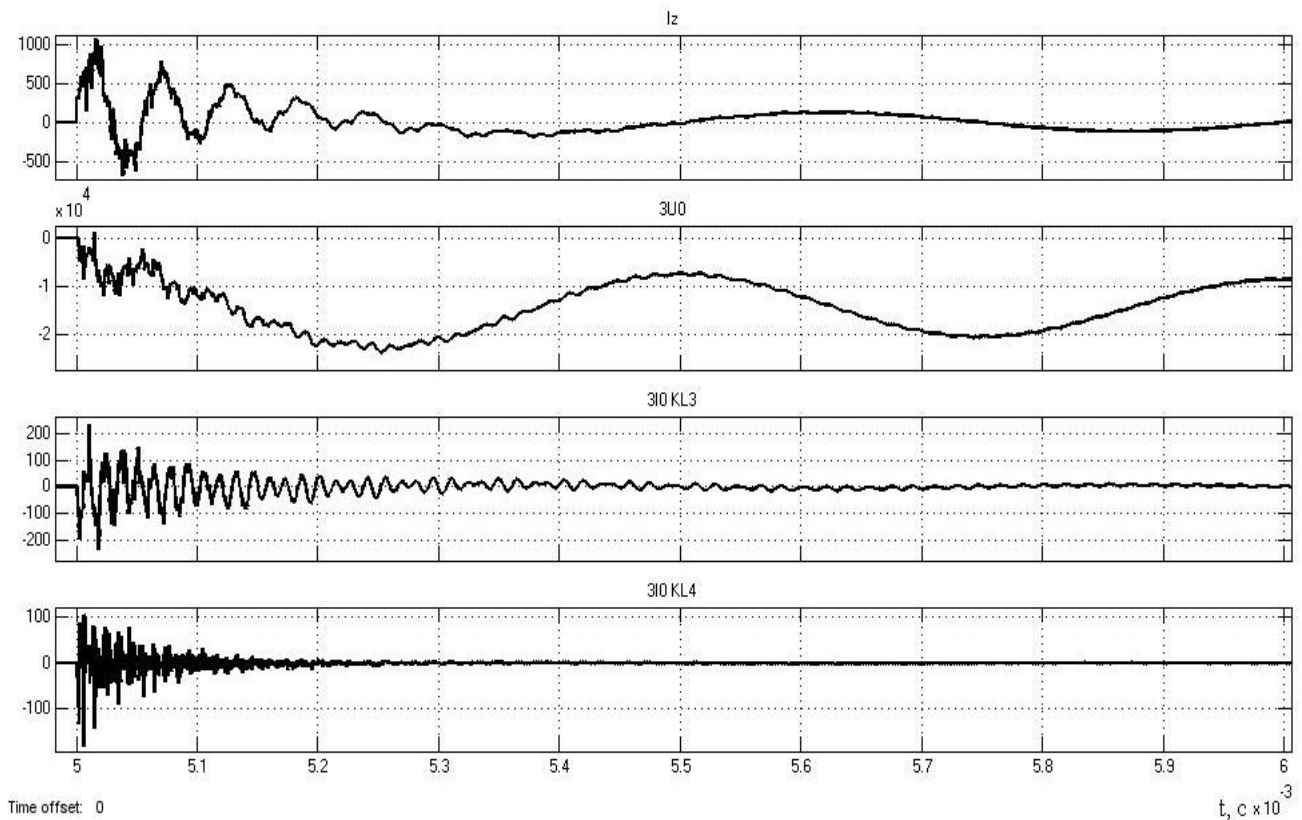


Рисунок 3.3 – Расчетные осциллограммы тока в месте повреждения I_z , напряжения $3U_0$ на шинах, токов в неповрежденных линиях $3I_{0KL3}$ и $3I_{0KL4}$ кабельной сети промышленного электроснабжения (рис. 3.1) с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{c\Sigma} = 5$ А при ОЗЗ в точке K_1

На осциллограммах рис. 3.3 для кабельной сети с $I_{c\Sigma} = 5$ А: I_z – ток в месте ОЗЗ (близкий по форме и значению к току $3i_0$ в поврежденной линии); $3I_{0KL3}$ – ток $3i_0$ в неповрежденной КЛЗ с $l_l = 0,3$ км; $3I_{0KL4}$ – ток $3i_0$ в неповрежденной КЛ с $l_l = 0,03$ км. На осциллограммах рис. 3.4 для сети с $I_{c\Sigma} = 30$ А $3I_{0KL3}$ – ток $3i_0$ в неповрежденной КЛ с $l_l = 5$ км и $3I_{0KL4}$ – ток $3i_0$ в неповрежденной КЛ с $l_l = 0,1$ км.

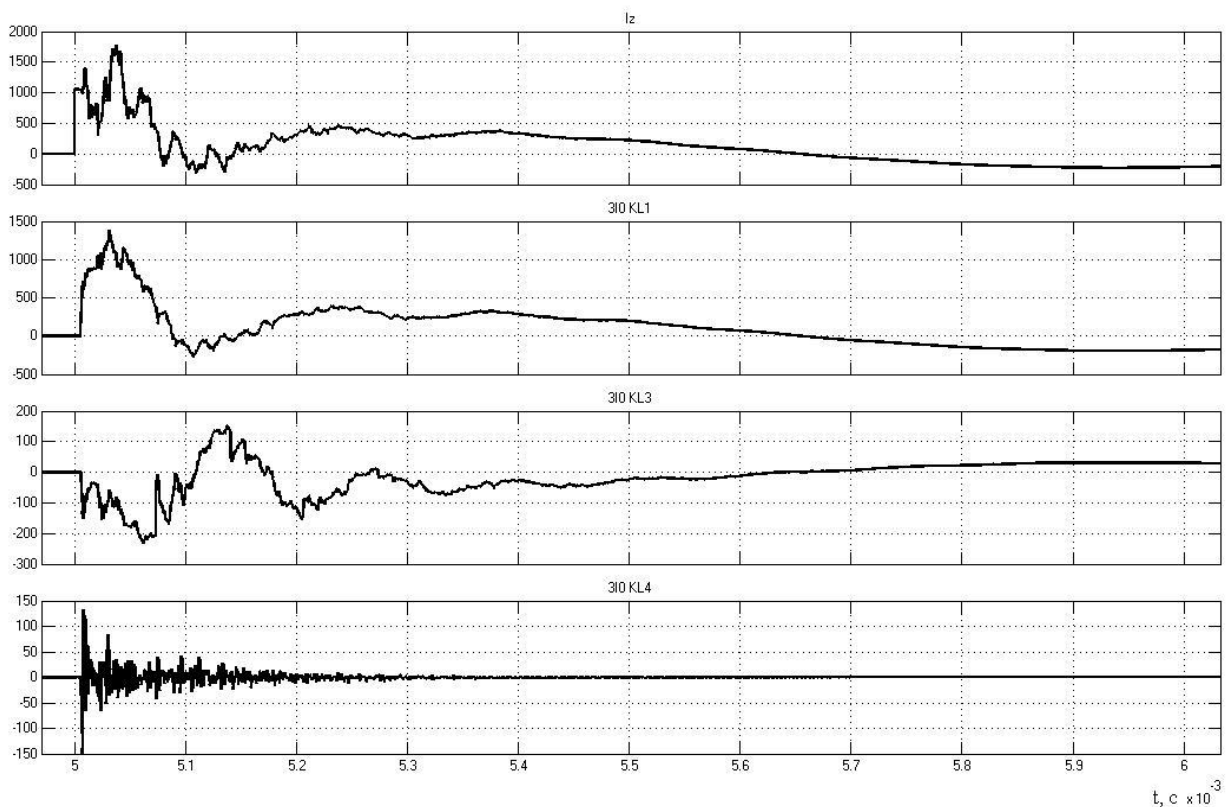


Рисунок 3.4 – Расчетные осциллограммы тока в месте повреждения I_z , напряжения $3U_0$ на шинах, токов в неповрежденных линиях $3I_{0KL3}$ и $3I_{0KL4}$ кабельной сети промышленного электроснабжения (рис. 3.1) с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{с\Sigma} = 30$ А при ОЗЗ в точке K_1

Влияние разрядных составляющих на форму и соотношения мгновенных значений переходных токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденных присоединениях остается весьма существенным даже при удаленных от шин ОЗЗ. Из анализа осциллограмм (рис. 3.3, 3.4) можно видеть, что разрядная составляющая переходного тока в неповрежденных линиях, как правило, имеет явно выраженный многочастотный характер, в то время как в переходном токе в месте ОЗЗ (и соответственно) в переходном токе нулевой последовательности поврежденного присоединения явно выражена одна основная разрядная частотная составляющая. Аналогичные результаты получены также при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ на моделях кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения и кабельных сетей наиболее сложной конфигурации, источником питания которых является ГРУ 6–10 кВ ТЭЦ.

Рассмотренные различия формы переходных токов $3i_0$ в поврежденном и неповрежденных присоединениях означают, что, используя полные переходные токи ОЗЗ, построить направленную защиту, реализующую принцип непрерывного сравнения электрических величин переходного процесса на интервале времени существования переходного тока в общем случае нельзя. Для построения такой защиты из спектра токов переходного процес-

са с помощью фильтров должна быть выделена часть частотного спектра, для которой с достаточной точностью можно принять, что переходный ток в месте ОЗЗ распределяется между неповрежденными присоединениями пропорционально их емкостям фаз на землю.

Следует отметить также, что многочастотный характер разрядных составляющих переходного тока $3i_0$ в неповрежденных присоединениях создает определенные трудности и при выполнении импульсных направленных защит, фиксирующих начальные фазные соотношения электрических величин переходного процесса в момент пробоя изоляции. Из осциллограмм, приведенных на рис. 3.3 и 3.4, можно видеть, что фиксация начальных фазных соотношений первых полуволн переходных токов в неповрежденных КЛ небольшой длины должна осуществляться на первых микросекундах переходного процесса при ОЗЗ, что технически невозможно, например, из-за собственных переходных процессов и погрешностей ТННП на высоких частотах [194, 195].

3.3.2 Частотные спектры переходных токов нулевой последовательности поврежденного и неповрежденных присоединений при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Оценки амплитудно-частотных спектров переходных токов нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденных присоединениях необходимы для определения допустимого рабочего диапазона частот направленной защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов, требований к фильтрам, используемым в каналах тока и напряжения измерительной части защиты, а также способов отстройки от влияния переходных процессов функций защиты, основанных на использовании различных составляющих установившегося режима ОЗЗ.

Для спектрограмм переходных токов нулевой последовательности неповрежденных линий характерно наличие нескольких высокочастотных пиков, подтверждающих явно выраженный многочастотный характер разрядной составляющей (например, рис. 3.5).

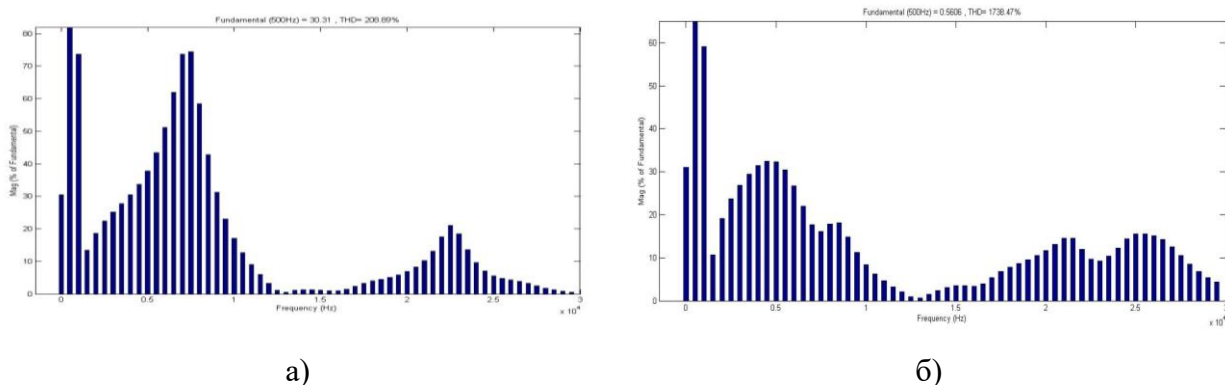


Рисунок 3.5 – Спектрограммы переходных токов неповрежденных линий КЛ3 (а) и КЛ4 (б) при замыкании на землю в точке K_1 кабельной сети системы промышленного электроснабжения с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{сΣ} = 30$ А (рис. 3.1)

Многочастотный характер разрядной составляющей переходного тока нулевой последовательности и возможность наличия в разрядном токе поврежденного присоединения, кроме одной преобладающей (основной) частотной составляющей, также и других высокочастотных составляющих подтверждает и анализ спектрограмм переходных токов в месте ОЗЗ (рис. 3.6).

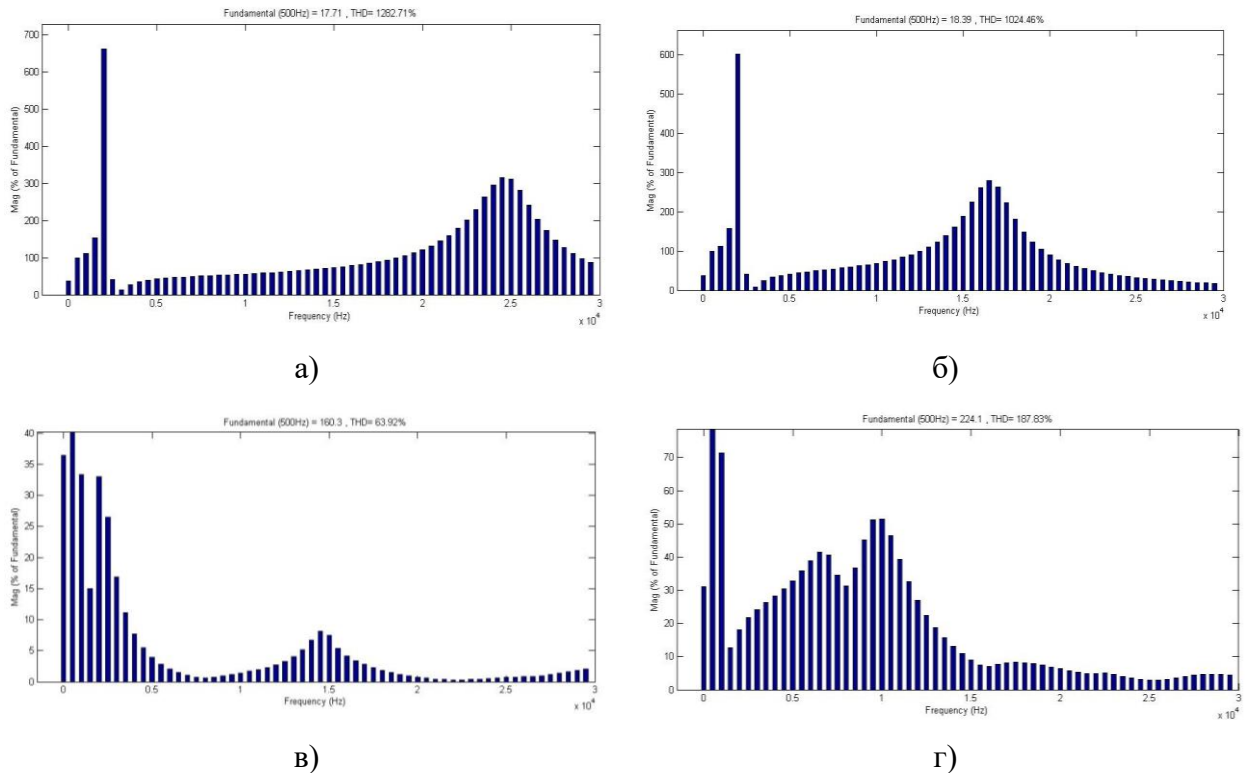


Рисунок 3.6 – Характерные спектрограммы переходных токов в месте ОЗЗ в кабельной сети системы промышленного электроснабжения с $U_{ном} = 6$ кВ с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ (модель по рис. 3.1): а – $I_{c\Sigma} = 5$ А; ОЗЗ в точке K_4 ; б – $I_{c\Sigma} = 5$ А; ОЗЗ в точке K_5 ; в – $I_{c\Sigma} = 30$ А; ОЗЗ в точке K_4 ; г – $I_{c\Sigma} = 30$ А; ОЗЗ в точке K_5

Из осциллограмм рис. 3.6 можно видеть, что в сетях с малыми значениями $I_{c\Sigma}$, имеющими достаточно простую конфигурацию, в переходном токе в месте ОЗЗ (и, соответственно, в переходном токе нулевой последовательности в поврежденном присоединении), кроме зарядной составляющей, имеющей наименьшую частоту колебаний, явно выражена только одна разрядная частотная составляющая, при этом частота последней может достигать значений до нескольких десятков килогерц (рис. 3.6, а и б). В кабельных сетях с большими значениями $I_{c\Sigma}$, имеющими более сложную конфигурацию, кроме основной частотной разрядной составляющей могут быть достаточно явно выражены и другие разрядные частотные составляющие, имеющие, как правило, существенно меньшие амплитуды, чем основная частотная составляющая (рис. 3.6, в – г). При уве-

личении суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, а также при увеличении удаленности места ОЗЗ от шин ЦП спектр разрядных составляющих смещается в область меньших частот. Частотный спектр переходных токов также изменяется в зависимости от длительности горения и условий гашения заземляющей дуги (т.е. от протекания процессов зажигания и гашений дуги по модели W. Petersen или по модели J.F. Peters, J. Slepian [38, 39]), величины переходного сопротивления в месте ОЗЗ и др. Таким образом, даже при ОЗЗ на одном и том же присоединении частотный спектр переходного тока зависит от множества факторов случайного характера.

3.3.3 Влияние режима заземления нейтрали на переходный процесс, возникающий при пробое изоляции фазы сети на землю. В большинстве работ, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ, принято считать, что включение высокоомного сопротивления в нейтраль сети практически не влияет на значения и фазные соотношения переходных токов и напряжения нулевой последовательности [например, 1, 71, 26 и др.]. Для проверки обоснованности приведенного выше допущения на разработанных моделях кабельных сетей 6–10 кВ проведены исследования влияния режима заземления нейтрали на переходные токи при ОЗЗ. Анализ влияния режима заземления нейтрали проводился путем сравнения расчетных осциллограмм переходных токов в месте ОЗЗ, в поврежденном и неповрежденных присоединениях и переходного напряжения нулевой последовательности для сети с изолированной нейтралью с аналогичными сигналами для сети с исследуемым режимом заземления нейтрали (например, рис. 3.7, 3.8).

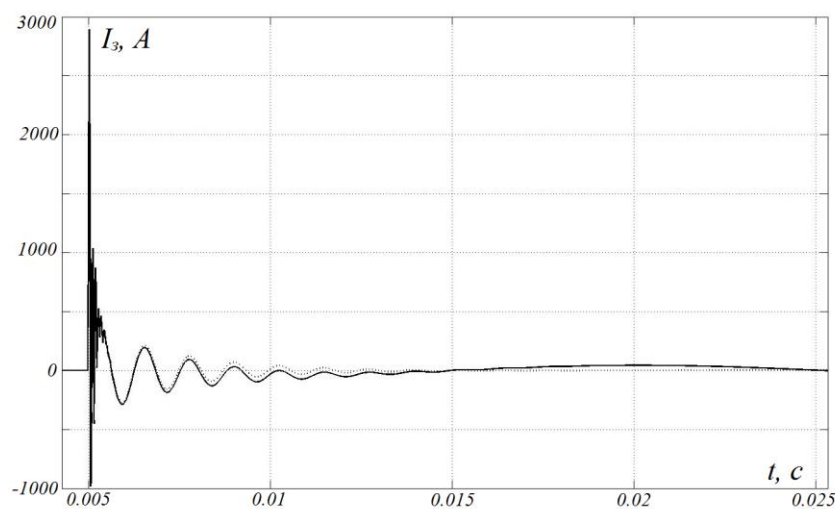


Рисунок 3.7 – Сравнение расчетных осциллограмм переходного тока в месте ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{c\Sigma} = 30$ А при изолированной нейтрали (сплошная линия) и при заземлении нейтрали через ДГР (пунктирная линия) при ОЗЗ в т. в точке K_1 (рис. 3.1)

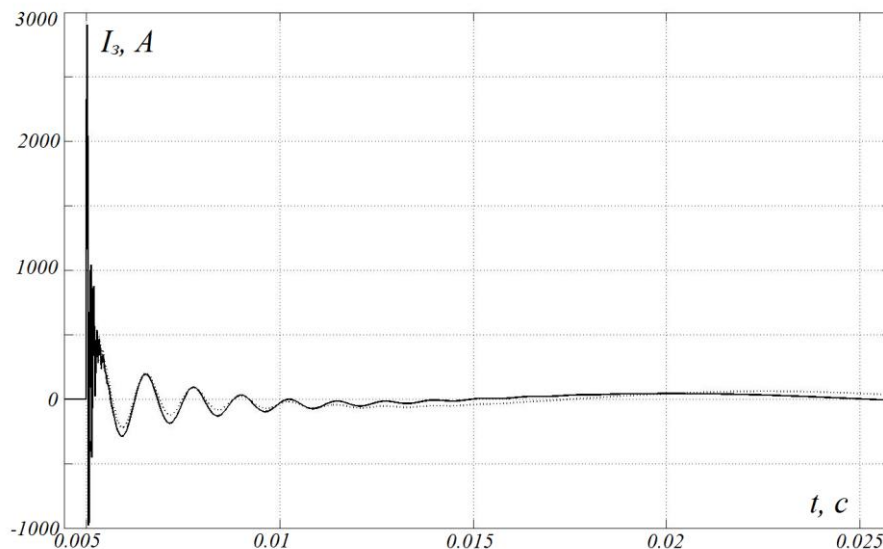


Рисунок 3.8 – Сравнение расчетных осциллограмм переходного тока в месте ОЗЗ для сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{с\sum} = 5$ А при изолированной нейтрали (сплошная линия) и при заземлении нейтрали через высокоомный резистор (пунктирная линия) при ОЗЗ в т. в точке K_1 (рис. 3.1)

Анализ результатов вычислительных экспериментов показал, что в кабельных сетях 6–10 кВ заземление нейтрали через ДГР, высокоомный резистор и комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор практически не влияют на переходный ток в месте ОЗЗ и, соответственно, переходный ток в поврежденном присоединении.

Еще в меньшей степени указанные режимы заземления нейтрали влияют на переходные токи нулевой последовательности в неповрежденных присоединениях и переходное напряжение нулевой последовательности. Режим заземления нейтрали оказывает существенное влияние на характер изменения напряжения нулевой последовательности при гашении заземляющей дуги, что должно учитываться при выполнении часто применяемых в защитах от ОЗЗ для отстройки от коммутационных переключений в сети и других режимов, не связанных с ОЗЗ, пусковых органов по напряжению $3U_0$.

3.3.4 Оценка диапазона изменения частот основных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ. Приближенную оценку диапазона частот основных составляющих (разрядной и зарядной) переходного тока ОЗЗ можно сделать, используя предложенную в [120] аналитическую модель кабельной сети 6–10 кВ. В [120] на основе исследований, выполненных на физической модели кабельной сети 6–10 кВ, учитывающей распределенный характер параметров линий, предложена двухчастотная схема замещения, учитывающая наличие в переходных токах и напряжениях разрядной и зарядной составляющих (рис. 3.9).

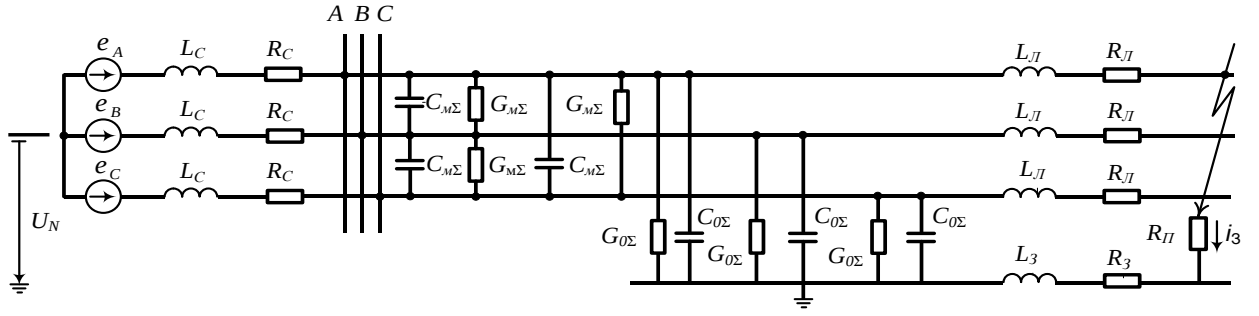


Рисунок 3.9 – Двухчастотная схема замещения сети 6–10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ в фазных координатах [120]

Для схемы замещения по рис. 3.9 частоты основной разрядной f_p и зарядной составляющих f_z определяются по формулам [120]:

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}; \quad (3.3)$$

$$f_z \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} \sqrt{k_c \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2 \omega_2^2}}, \quad (3.4)$$

где $\omega_1^2 = 1/(L_{Л} + 3L_3)C_{0\Sigma}$; $\omega_2^2 = 1/L_{II}(C_{0\Sigma} + 3C_{M\Sigma}) = 1/L_{II}C_{раб.\Sigma}$; $k_c = 1 + 2C_{0\Sigma}/C_{раб.\Sigma}$.

Для трехжильных кабелей 6–10 кВ значение отношения $C_{раб.\Sigma}/C_{0\Sigma}$ равно ~1,5–1,85, т.е. изменяется в относительно небольших пределах. Поэтому значения величин ω_1^2 , ω_2^2 , k_c , входящих в формулы (3.3) и (3.4), зависят в основном от суммарной емкости фазы на землю $C_{0\Sigma}$ (т.е. суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$), индуктивности поврежденного участка линии от шин ЦП до места ОЗЗ (удаленности места ОЗЗ от шин ЦП) и индуктивности источника питания L_{II} , определяемой с достаточной точностью значением тока трехфазного КЗ на шинах ЦП:

$$L_{II} = \frac{U_{ф.ном}}{\omega I_k^{(3)}}. \quad (3.5)$$

На рис. 3.10 приведены рассчитанные по (3.3) – (3.5) зависимости частот основной разрядной f_p и зарядной f_z составляющих переходного тока и напряжения нулевой последовательности от суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ при различных значениях удаленности места ОЗЗ от шин ЦП. Расчеты выполнены для сети с $U_{ном} = 6$ кВ, $I_k^{(3)} = 10$ кА и поврежденной линии, выполненной кабелем ААБ-6-3х240.

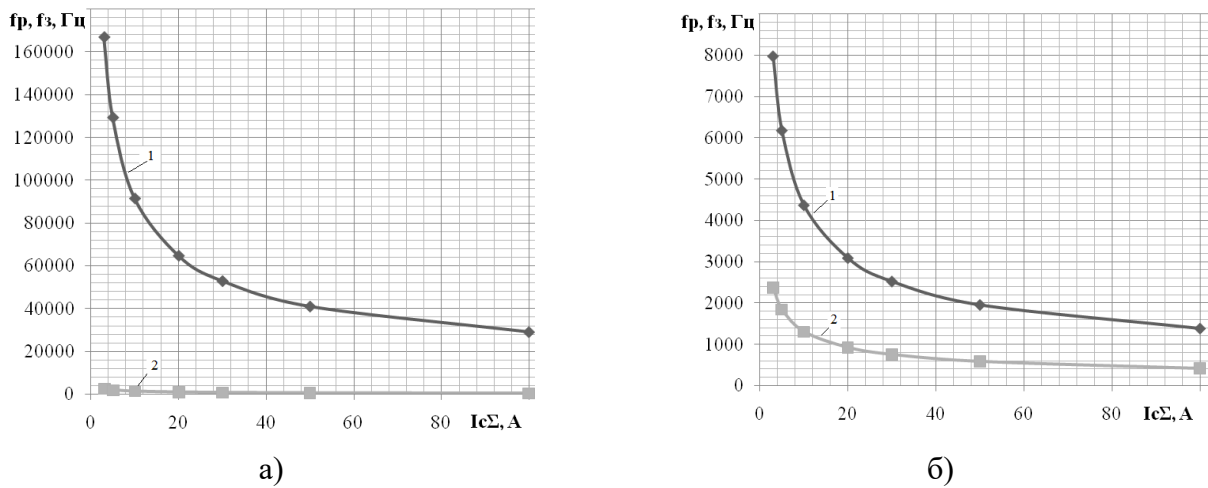


Рисунок 3.10 – Зависимости частоты разрядных f_p (1) и зарядных f_z (2) колебаний от $I_{c\Sigma}$ кабельной сети $U_{ном} = 6$ кВ при различных удаленностях места ОЗЗ от шин:
а – $l_3 = 0,01$ км; б – $l_3 = 5$ км

Из приведенных зависимостей можно видеть, что частота разрядных колебаний (основной частотной составляющей) в зависимости от параметров сети и удаленности места ОЗЗ от шин ЦП может изменяться в диапазоне от единиц до сотен килогерц, частота зарядной составляющей – от сотен герц до единиц килогерц. Обеспечить селективность и устойчивость функционирования направленных устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов в таком большом диапазоне частот нельзя, поэтому верхняя частота рабочего диапазона частот должна быть ограничена с помощью фильтров. Практически это означает необходимость подавления высокочастотных разрядных составляющих переходных токов.

3.3.5 Влияние фильтрации высокочастотных составляющих на потери энергии сигнала переходных токов. Наиболее общей оценкой частотного спектра переходного тока при ОЗЗ может быть диапазон частот, в котором сосредоточена основная часть энергии сигнала. Из приведенных на рис. 3.5 и 3.6 спектрограмм можно видеть, что значительная часть энергии сигналов, пропорциональных переходным токам при ОЗЗ, сосредоточена в высокочастотной части спектра. Поэтому фильтрация высокочастотных составляющих связана с потерей части энергии входного сигнала и уменьшением чувствительности по первичному току устройств защиты на основе переходных процессов.

Уровень высокочастотных составляющих в спектре достигает максимального значения при ОЗЗ вблизи шин ЦП и минимальной длительности броска переходного тока, т.е. при гашении заземляющей дуги при первом переходе через нулевое значение среднечастотной (зарядной) составляющей (модель дугового прерывистого ОЗЗ W. Petersen [38]). Поэтому наибольшие потери энергии входного сигнала переходного за счет фильтрации высокочастотных составляющих будут иметь место при указанных условиях.

Влияние фильтрации высокочастотных составляющих на значение энергии сигнала переходного тока исследовалось на моделях кабельных сетей по рис. 3.1 при значениях суммарного емкостного тока $I_{C\Sigma} = 5$ и 30 А.

Для оценки влияния фильтрации на значение энергии сигнала выходной ток модели (ток в месте ОЗЗ, ток $3i_0$ в поврежденном или неповрежденном присоединении) пропущен через фильтр низших частот (ФНЧ) с изменяемой частотой среза f_c , задающей «верхнюю» частоту рабочего диапазона частот защиты. Потери энергии сигнала оценивались отношением:

$$E_* = \frac{E_\phi}{E} = \frac{\int_0^{t_{c,\phi}} (3i_{0\phi})^2 dt}{\int_0^{t_c} (3i_0)^2 dt}, \quad (3.6)$$

где E_* – относительное значение энергии сигнала на выходе ФНЧ; E – энергия броска первичного переходного тока (например, в месте ОЗЗ); E_ϕ – энергия броска переходного тока на выходе ФНЧ; t_c – длительность броска первичного переходного тока; $t_{c,\phi}$ – длительность броска переходного тока на выходе ФНЧ.

На рис. 3.11 в качестве примера приведены результаты оценки влияния фильтрации высокочастотных составляющих броска переходного тока на относительное значение энергии сигнала.

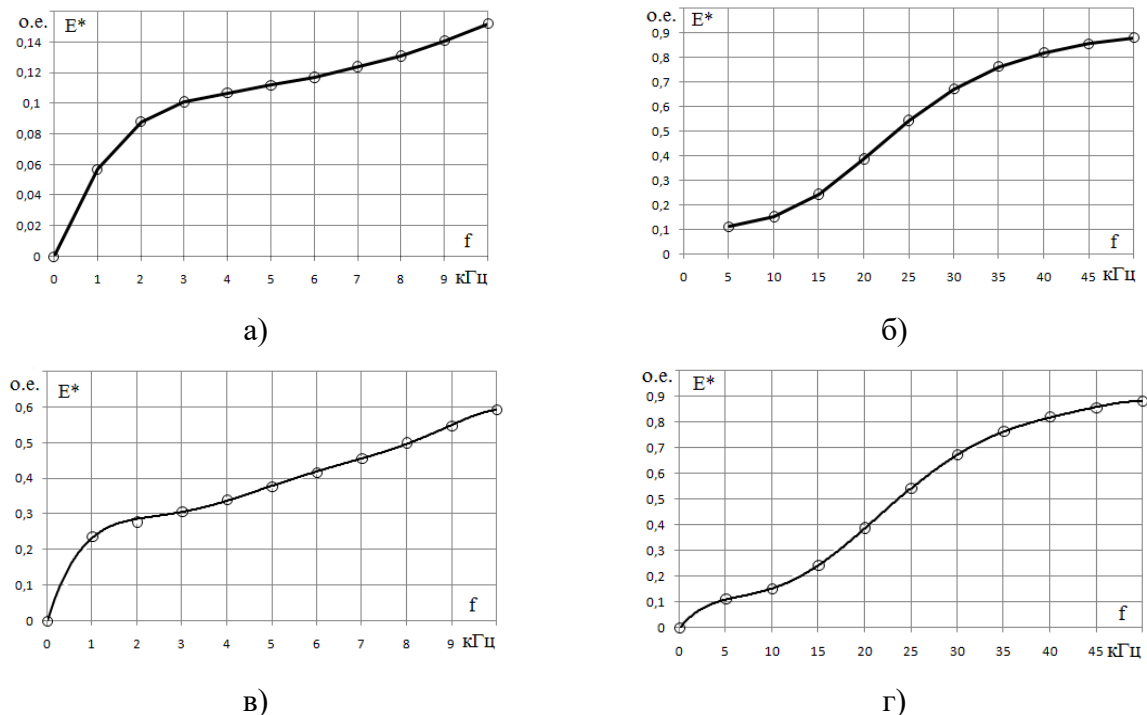


Рисунок 3.11 – Зависимость энергии броска переходного тока в месте ОЗЗ на выходе ФНЧ E_* от верхней частоты рабочего диапазона частот устройства защиты;
а, б – ОЗЗ на шинах ЦП сети с $I_{C\Sigma} = 5$ А; в, г – ОЗЗ на шинах ЦП сети с $I_{C\Sigma} = 30$ А

Из приведенных примеров можно видеть, что необходимость фильтрации высокочастотных составляющих приводит к значительному уменьшению энергии входного сигнала переходного тока, прежде всего, в сетях с малыми значениями $I_{C\Sigma}$. Например, в сети с $I_{C\Sigma} = 5$ А ограничение верхней частоты рабочего диапазона частот защиты на основе переходных процессов значением $f_c = 3$ кГц может привести к уменьшению энергии входного сигнала тока примерно в 10 раз (рис. 3.11, а) и, соответственно, значительному уменьшению его амплитуды (рис. 3.12).

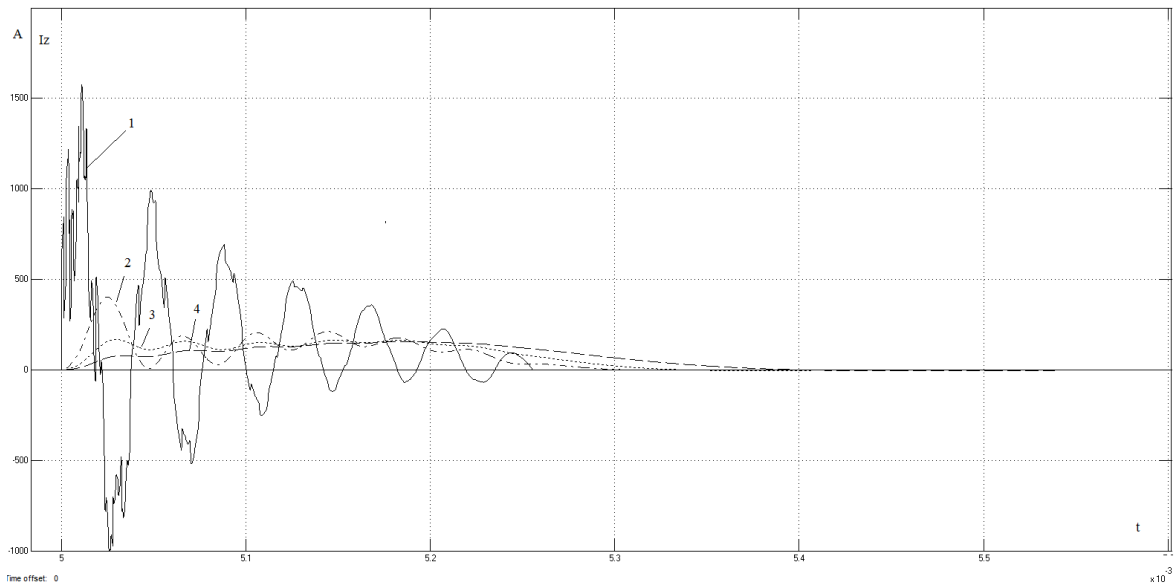


Рисунок 3.12 – Изменение формы и амплитуды сигнала переходного тока при фильтрации высокочастотных составляющих: 1 – исходный сигнал при ОЗЗ на шинах ЦП сети с $I_{C\Sigma} = 5$ А:

2 – сигнал на выходе ФНЧ с $f_c = 10$ кГц; 3 – сигнал на выходе ФНЧ с $f_c = 5$ кГц;

4 – сигнал на выходе ФНЧ с $f_c = 3$ кГц

С увеличением суммарного емкостного тока сети $I_{C\Sigma}$ и смещением частотного спектра переходных токов в область более низких частот влияние фильтрации на чувствительность защиты по первичному току уменьшается (рис. 3.11, в, г). Значительное уменьшение энергии входного сигнала переходного тока и его амплитуды при фильтрации высокочастотных составляющих должно учитываться при обосновании рабочего диапазона частот и требований к чувствительности направленной защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов.

Из зависимостей рис. 3.11 можно видеть также, что при близких к шинам ОЗЗ в сетях с малыми значениями $I_{C\Sigma}$ (порядка единиц ампер) в области спектра частот до 5 кГц сосредоточено примерно ~10% энергии броска переходного тока, в сетях с $I_{C\Sigma}$ порядка десятков ампер доля энергии сигнала, сосредоточенная в указанной области частотного спектра броска переходного тока, возрастает, но остается менее 50%. Полученные в данной

работе оценки существенно отличаются от оценок распределения энергии сигнала в частотном спектре бросков переходного тока при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, приводимых в ряде источников [например, 40], что можно объяснить более точным учетом в данной работе влияющих на частотный спектр факторов.

3.4 Обоснование рабочего диапазона частот направленной защиты от замыканий на землю, основанной на использовании переходных процессов

3.4.1 Условия селективности направленной защиты на основе переходных процессов с измерительным органом непрерывного действия. Как уже отмечалось в главе 1 (раздел 1.4), большинство известных исполнений направленных защит на основе переходных процессов представляют собой импульсные реле направления мощности, осуществляющие фиксацию знака мгновенной мощности нулевой последовательности практически в момент пробоя изоляции фазы сети на землю [например, 44–50, 57–59, 61, 63]. Принцип действия направленной импульсной защиты поясняется осциллограммами переходных токов и напряжения нулевой последовательности на рис. 3.13. Из рис. 3.13 можно видеть, что правильная фиксация направления мгновенной мощности нулевой последовательности в переходном режиме ОЗЗ возможна только в течение первой полуволны переходного тока или поляризующей величины (u_0 или du_0/dt).

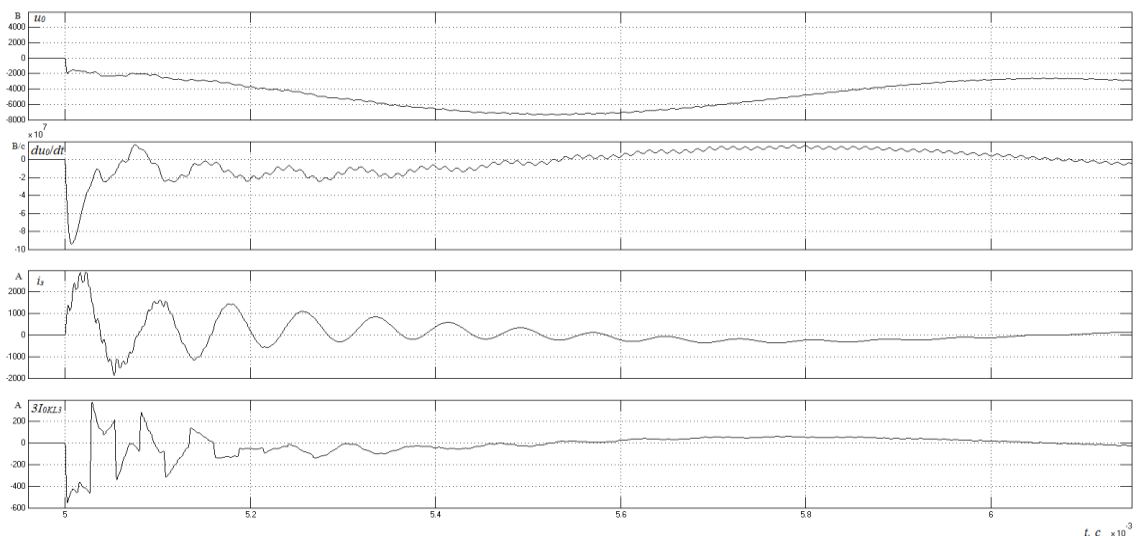


Рисунок 3.13 – К пояснению принципа фиксации знака мгновенной мощности в импульсных направленных защитах на основе переходных процессов:

I_z – ток в месте ОЗЗ (ток $3i_0$ в поврежденном присоединении);

$3I_{0KL3}$ – ток в неповрежденном присоединении (рис. 3.1)

Импульсные направленные защиты от ОЗЗ по принципу действия не обладают способностью распознавать опасные и неопасные для сети разновидности дуговых прерывистых ОЗЗ. Недостатком направленных защит импульсного действия является также возможность отказов их функционирования под влиянием импульсных помех по цепям тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Указанные недостатки можно устранить, если измерительный орган защиты выполнить таким образом, чтобы контроль направления мощности осуществлялся непрерывно на всем интервале времени существования переходного тока в защищаемом присоединении [8, 31, 59, 60, 62, 127, 128].

Практически возможность непрерывного контроля направления мощности нулевой последовательности обеспечивается, если в качестве поляризующей величины использовать производную u_0/dt и если для сравниваемых величин на всем интервале времени переходного процесса выполняются соотношения:

$$3i_{0\text{ непер.}i} \approx 3C_{0i} du_0 / dt ; \quad (3.7)$$

$$3i_{0\text{ пов.}j} \approx -3(C_{0\Sigma} - C_{0j}) du_0 / dt , \quad (3.8)$$

где C_{0i} – емкость фазы на землю неповрежденного i -го присоединения; $C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость фазы на землю сети; C_{0j} – емкость фазы на землю поврежденного j -го присоединения.

3.4.2 Определение рабочего диапазона частот, обеспечивающего непрерывность действия направленных защит на основе переходных процессов. Соотношения (3.7) и (3.8) для сравниваемых величин переходного процесса будут выполняться, если в рабочем диапазоне частот входное сопротивление всех КЛ защищаемой сети по отношению к земле имеет практически емкостный характер. Приближено можно считать, что входное сопротивление КЛ имеет емкостный характер, если выполняется соотношение

$$X_{C\text{ лин}} \geq 10 X_{L\text{ лин}} , \quad (3.9)$$

где $X_{C\text{ лин}}$ и $X_{L\text{ лин}}$ – соответственно емкостная и индуктивная составляющая реактивного сопротивления линии по отношению к земле.

Для определения соотношений между $X_{C\text{ лин}}$ и $X_{L\text{ лин}}$ воспользуемся Т-образной схемой замещения линии (рис. 3.14).

Из рассматриваемой схемы можно получить, что отношение емкостной к индуктивной составляющей входного реактивного сопротивления трех фаз линии по отношению к земле равно:

$$\frac{X_{C\text{ лин}}}{X_{L\text{ лин}}} = \frac{1/3\omega C_0 l_n}{\omega l_n (L/6 + L_s/2)} = \frac{2}{\omega^2 l_n^2 C_0 (L + 3L_s)} . \quad (3.10)$$

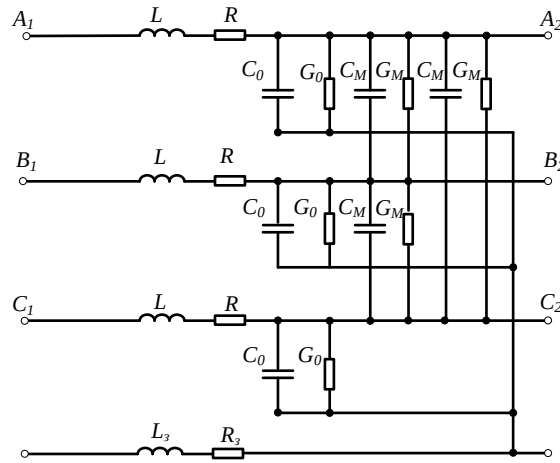


Рисунок 3.14 – Схема замещения элементарного звена трехфазной цепной схемы замещения КЛ с распределенными параметрами

С учетом (3.9) из (3.10) получим приближенное соотношение для оценки верхней частоты f_{ϵ} рабочего диапазона частот, при которой с приемлемой точностью обеспечивается выполнение соотношений (3.7) и (3.8):

$$f_{\epsilon} \leq \frac{0,1}{2\pi l_{\epsilon}} \sqrt{\frac{2}{C_0(L + 3L_3)}}. \quad (3.11)$$

Примем, что индуктивности прямой и нулевой последовательности КЛ L_1 и L_0 для разрядных составляющих переходных токов с приемлемой точностью определяются соотношениями (3.1), (3.2). Тогда с учетом (3.1) и (3.2) для индуктивностей L и L_3 схемы замещения по рис. 3.14 получим

$$L = L_1; \quad (3.12)$$

$$L_3 = \frac{L_0 - L_1}{3}. \quad (3.13)$$

Из выражения (3.11), принимая с запасом $l_{\epsilon} = 5$ км (подраздел 2.1), для кабеля с сечением жил 240 мм², имеющего наибольшие значения емкостей фаз на землю, для кабелей с $U_{ном} = 6$ кВ и 10 кВ соответственно получим:

$$f_{\epsilon} \leq \frac{1}{2\pi \cdot 5} \sqrt{\frac{0,2}{0,383 \cdot 10^{-6} \cdot (0,000077 + 3 \cdot 0,0000131)}} \approx 2134 \text{ Гц};$$

$$f_{\epsilon} \leq \frac{1}{2\pi \cdot 5} \sqrt{\frac{0,2}{0,292 \cdot 10^{-6} \cdot (0,000097 + 3 \cdot 0,0000185)}} \approx 2134 \text{ Гц}.$$

3.4.3 Оценки частоты f_c на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ.

Полученные рассмотренным выше способом значения верхней граничной частоты f_{ϵ} рабочего диапазона частот устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов,

при которой обеспечивается выполнение соотношений (3.7) и (3.8), были проверены на разработанных моделях кабельных сетей 6–10 кВ (рис. 3.1, 3.2). Для удобства сравнения формы сигналов переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях переходный ток нулевой последовательности последних нормировался в соответствии с соотношением:

$$Zi_{0\text{неп.}j}^{(\text{норм})} = Zi_{0\text{неп.}j} \frac{C_{0\Sigma} - C_{0\text{повр.собс}}}{C_{0\text{неп.собс}}}. \quad (3.14)$$

Если соотношения (3.7) и (3.8) выполняются, то мгновенное значение нормированного по (3.14) переходного тока в неповрежденном присоединении будет равно мгновенному значению тока в поврежденном присоединении на всем интервале времени существования тока переходного процесса.

На рис. 3.15 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях различной длины, полученные на модели кабельной сети 6 кВ.

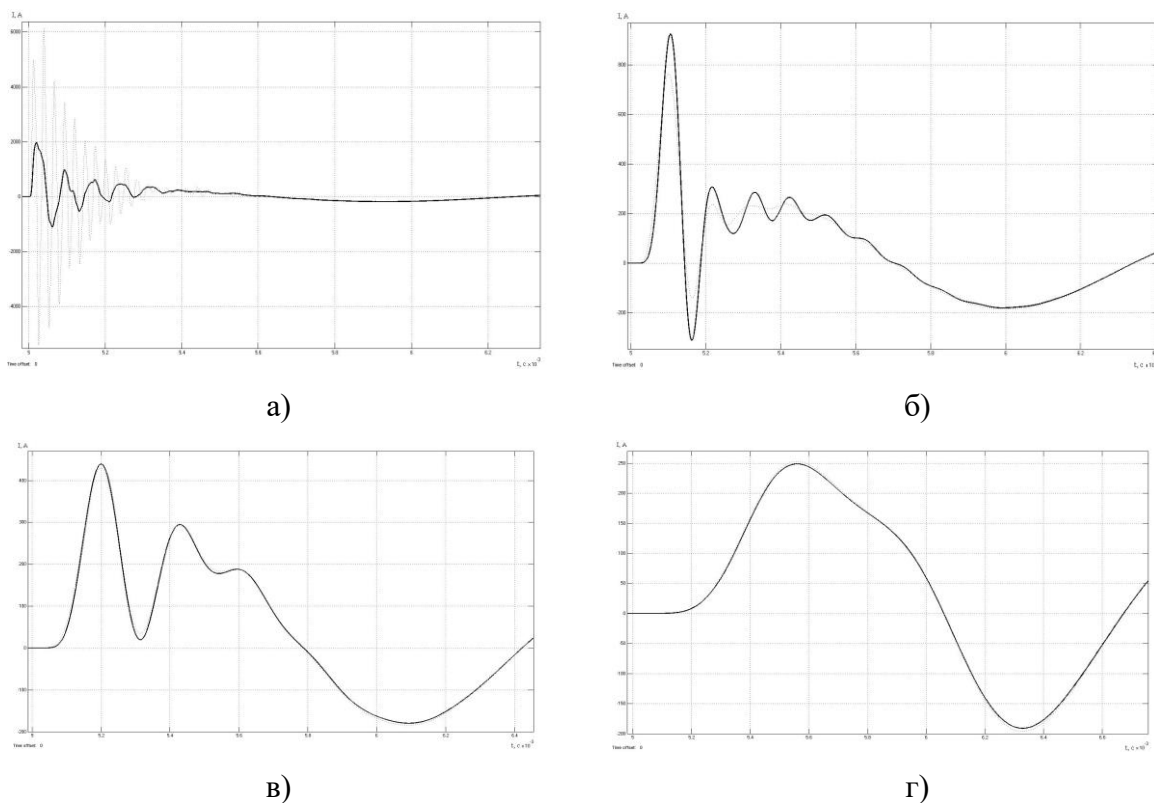


Рисунок 3.15 – Расчетные осциллограммы переходного тока в поврежденной линии КЛ1 (сплошная линия) и нормированного по (3.14) переходного тока в неповрежденной линии КЛ3 с $l_{\text{л}} = 1$ км (пунктирная линия) при ОЗЗ в точке K_1 кабельной сети промышленного электроснабжения с $U_{\text{ном}} = 6$ кВ и $I_{\Sigma} = 30$ А (рис. 3.1): а – без ФНЧ; б – ФНЧ с $f_c = 10$ кГц; в – ФНЧ с $f_c = 5$ кГц; г – ФНЧ с $f_c = 2$ кГц

Анализ результатов вычислительных экспериментов, выполненных на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ по рис. 3.1, 3.2 показал, что для обеспечения выполнения с допустимыми погрешностями соотношений (3.7) и (3.8) рабочий диапазон частот направленных устройств защиты, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, должен быть ограничен «сверху» частотой $f_c \leq 2...3$ кГц.

3.5 Определение требований к чувствительности защит на основе переходных процессов

3.5.1 Требования к чувствительности защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, основанных на использовании процессов. В ПУЭ [10] отсутствуют требования к минимальной чувствительности по первичному току для защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса. Для защит от ОЗЗ, основанных на использовании токов не промышленной частоты, минимально допустимое значение коэффициента чувствительности $K_{ч. мин}$, как правило, принимается большим по сравнению с защитами на основе составляющих промышленной частоты. В частности, для защит на основе ВГ по требованиям ПУЭ [10] $K_{ч. мин}$ должен быть не менее 1,5. Однако разработчики защит на основе электрических величин не промышленной частоты, имеющие внедрения в реальных сетях, как правило, рекомендуют обеспечивать большие, чем требуемые ПУЭ, значения $K_{ч. мин}$. Например, для защит на основе ВГ, учитывая погрешности оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗЗ, рекомендуется принимать $K_{ч. мин}$ не меньше, чем 2–3 [137, 190]. Очевидно, что для защит на основе переходных процессов в части чувствительности по первичному току должны приниматься не менее жесткие требования.

В [196] показано, что для обеспечения вероятности отказов срабатывания защит на основе переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ не превышающей 1%, коэффициент чувствительности $K_{ч. мин}$ при пробое изоляции в момент максимума напряжения на поврежденной фазе должен быть не менее 3. При $K_{ч} > 3$ вероятность отказов срабатывания уменьшается [196].

Учитывая изложенное, для защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, представляется целесообразным принять $K_{ч. мин} \geq 3$ (при пробое изоляции в момент максимума напряжения на поврежденной фазе).

3.5.2 Расчетные условия для определения минимальной амплитуды переходного тока для оценки чувствительности устройств защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов. Коэффициент чувствительности по первичному току для защит на основе переходных процессов определяется по выражению:

$$K_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{т пер. расч. мин}}}{I_{\text{с.з. мин}}} \geq K_{\text{ч. мин}}, \quad (3.15)$$

где $3I_{0\text{т пер. расч. мин}}$ – расчетная амплитуда переходного тока в поврежденном присоединении при ОЗЗ в наиболее тяжелых расчетных условиях; $I_{\text{с.з. мин}}$ – минимальный первичный ток срабатывания защиты в рабочем диапазоне частот.

Из (3.15) получим

$$I_{\text{с.з. мин}} \leq \frac{3I_{0\text{т пер. расч. мин}}}{K_{\text{ч. мин}}}. \quad (3.16)$$

Расчетное значение $3I_{0\text{т пер. расч. мин}}$ зависит от ряда влияющих факторов, основными из которых являются:

- номинальное напряжение сети $U_{\text{ном}}$;
- величина суммарного емкостного тока сети $I_{\text{с}\Sigma}$;
- величина собственного емкостного тока защищаемой КЛ $I_{\text{с собс}}$;
- удаленность места ОЗЗ l_3 от шин ЦП;
- сечение жил F поврежденной КЛ;
- переходное сопротивление R_n в месте ОЗЗ в момент пробоя изоляции;
- частотные характеристики фильтров в цепях тока, ограничивающих «верхнюю» частоту рабочего диапазона частот защиты.

Амплитуда переходного тока в поврежденном присоединении уменьшается при уменьшении $I_{\text{с}\Sigma}$, увеличении $I_{\text{с собс}}$, сопротивления контура нулевой последовательности, зависящего от l_3 , F , R_n , а также «верхней» частоты рабочего диапазона устройства защиты.

Статистический анализ данных по кабельным сетям 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения, показал, что минимальное значение суммарного емкостного можно принять равным $I_{\text{с}\Sigma \text{ мин}} \approx 3$ А (табл. 1.1). Сети с такими малыми значениями $I_{\text{с}\Sigma}$ по параметрам подключенных к шинам ЦП КЛ аналогичны участкам сетей, питаемых от ТП (табл. 1.1). Для таких сетей максимальная длина кабельных линий l_n обычно не превышает 350 м, минимальное сечение жил кабелей 70 мм^2 , $I_{\text{с собс}} \leq 0,1$ (табл. 1.1). Переходное сопротивление R_n определяется электрической дугой в месте повреждения в мо-

мент пробоя изоляции. Как отмечалось выше (раздел 2.3), напряжение на дуге U_d в переходных режимах ОЗЗ в КЛ не превышает 50...100 В [40], а величина r_d – десятых долей Ом. С учетом изложенного при оценке минимального значения амплитуд переходных токов в кабельных сетях 6–10 кВ были приняты следующие расчетные условия (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Расчетные условия для оценки минимальной амплитуды переходного тока при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ

$U_{ном}, \text{кВ}$	$I_{с\sum}, \text{А}$	$L_3, \text{м}$	$F, \text{мм}^2$	$\varphi_{пр}, \text{рад}$	$U_d, \text{В}$	$r_d, \text{Ом}$	$f_c \text{ ФНЧ}, \text{Гц}$	$I_{с\text{ собс.}}, \text{о.е.}$
6	3	300	50	$0,1\pi$	100	0,1	2000	0,1

Расчеты на имитационной модели для расчетных условий по табл. 3.1 показали, что в кабельных сетях напряжением 6 кВ в наиболее тяжелых расчетных условиях минимальное значение амплитуды переходного тока $3i_0$ в поврежденной линии может составлять ~30–35 А.

Принимая $K_{ч.мин} = 3$, из (3.16) получим

$$I_{с.з. мин} \leq \frac{3I_{0т пер. расч. мин}}{K_{ч. мин}} = \frac{30}{3} = 10 \text{ А}.$$

Практически многие известные исполнения направленных защит от ОЗЗ на основе переходных процессов, выполненные на микроэлектронной базе, обеспечивают минимальный первичный ток срабатывания значительно меньше 10 А. Например, в устройствах УЗС-01, КЗЗП, «Импульс», «Спектр», УИЗЗ $I_{с.з. мин}$ не превышает 1–2 А [8, 44, 45, 57–63]. Уменьшение минимального первичного тока срабатывания по сравнению с расчетной величиной $I_{с.з. мин} \leq 10 \text{ А}$ уменьшает вероятность отказов ее срабатывания из-за недостаточной чувствительности. Следует отметить также, что опыт внедрения и эксплуатации указанных выше направленных устройств защиты, выполненных на микроэлектронной базе, не выявил отказов защит вследствие недостаточной чувствительности по первичному току. Учитывая положительный опыт эксплуатации в части обеспечения требуемой чувствительности направленных защит на микроэлектронной базе, при разработке направленной защиты на микропроцессорной базе целесообразно также принять первичный минимальный ток срабатывания $I_{с.з. мин} \leq 1–2 \text{ А}$.

3.6 Способы распознавания опасных дуговых прерывистых замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали

3.6.1 Область применения задачи распознавания опасных дуговых прерывистых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ. Как отмечалось выше, при дуговых прерывистых ОЗЗ, сопровождающихся опасными перенапряжениями во всей электрически связанной сети, может оказаться необходимым действие защиты на отключение поврежденного элемента. Для автоматического выбора способа действия в процессе функционирования комплексной multifunctionальной защиты должна решаться задача выявления дугового прерывистого характера ОЗЗ и оценки степени его опасности для контролируемой сети. Необходимость в оценке степени опасности для сети дуговых ОЗЗ возникает прежде всего в кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью, в которых наиболее вероятно возникновение ДПОЗЗ, сопровождающихся опасными перенапряжениями.

В компенсированных сетях при настройках ДГР, близких к резонансной, повторные зажигания заземляющей дуги возможны только после практически полного стекания дополнительного заряда с емкостей фаз на землю после гашения заземляющей дуги (при средней величине активных потерь в изоляции сети и в ДГР ~5% через 200 и более миллисекунд). Поэтому перенапряжения при таких повторных зажиганиях дуги не превышают перенапряжений при первоначальном пробое изоляции ($K_n = U_{\text{макс}}/U_{\text{т ф.ном}} \approx 2,2\text{--}2,4$ [1–3, 5, 26, 123, 124 и др.]) и не представляют особой опасности для сети. В реальных условиях эксплуатации компенсированных сетей обеспечить режим благоприятной резонансной настройки ДГР удастся не всегда [1, 26]. При расстройках компенсации более 15% гашение заземляющей дуги сопровождается процессом «биений» и более быстрым нарастанием напряжения на поврежденной фазе, что обуславливает возможность возникновения режима многократных пробоев изоляции через относительно небольшие интервалы времени и высоких кратностей дуговых перенапряжений [26]. Поэтому с учетом реальных условий эксплуатации в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ сетях также необходим контроль степени опасности дуговых прерывистых ОЗЗ.

В кабельных сетях, работающих с высокоомным заземлением нейтрали, перенапряжения при повторных зажиганиях заземляющей дуги практически не превосходят последних при первоначальном пробое изоляции ($K_n \approx 2,2\text{--}2,4$), т.е. в аспекте ограничения дуговых перенапряжений такой режим нейтрали является более эффективным, чем компенсация емкостных токов [16, 26, 124]. Такие значения дуговых перенапряжений, как уже отме-

чалось, не представляют особой опасности для сети, поэтому в кабельных сетях с высокоомным заземлением нейтрали контроль опасности дуговых прерывистых ОЗЗ не требуется.

3.6.2 Прямой (непосредственный) способ контроля величины перенапряжений на неповрежденных фазах при дуговых ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях. В главе 1 было показано, что в качестве критерия опасности дуговых прерывистых ОЗЗ для контролируемой сети можно принять расчетное значение кратности перенапряжений на неповрежденных фазах $K_{п. расч} \approx 2,5\text{--}2,7$ (раздел 1.2). Так как расчетные оценки максимальных перенапряжений, как правило, примерно на ~10% превышают значения, полученные при измерениях в действующих кабельных сетях [1, 123], при использовании в комплексной многофункциональной защите прямых способов контроля опасности дуговых прерывистых ОЗЗ опасной следует считать кратность перенапряжений на неповрежденных фазах $K_{п. изм} \approx 0,9K_{п. расч} \approx 2,4\text{--}2,5$. Принимая для сети $U_{раб. макс} = 1,05U_{ном}$, получим:

- для сети с $U_{ном} = 6$ кВ $u_{пер. макс} \geq 2,5 \cdot 1,05 \cdot 6,0 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 12,860 \approx 13$ кВ;
- для сети с $U_{ном} = 10$ кВ $u_{пер. макс} \geq 2,5 \cdot 1,05 \cdot 10,0 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 21,43 \approx 21$ кВ.

Недостатком применения прямого способа контроля опасных для сети перенапряжений на неповрежденных фазах сети при дуговых прерывистых ОЗЗ является необходимость подведения к устройству комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ не только напряжения $3U_0$, но и всех фазных напряжений, что приведет к усложнению ее входных цепей.

3.6.3 Косвенный способ распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью на основе контроля интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги. Известно [1, 3, 4 и др.], что при увеличении интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги кратность перенапряжений K_n на неповрежденных фазах уменьшается. С учетом этого задачей является определение предельных значений Δt , при которых дуговое прерывистое ОЗЗ не сопровождается опасными для сети перенапряжениями, т.е. $K_{п. расч} < 2,7$.

Расчеты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ различного назначения (рис. 3.1, 3.2) с изолированной нейтралью с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ показали, что максимальные расчетные кратности перенапряжений $K_{п. расч}$ при дуговых прерывистых ОЗЗ снижаются до указанного выше относительно безопасного для сети уровня при интервалах между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta t \geq 90\text{--}100$ мс (например, рис. 3.16).

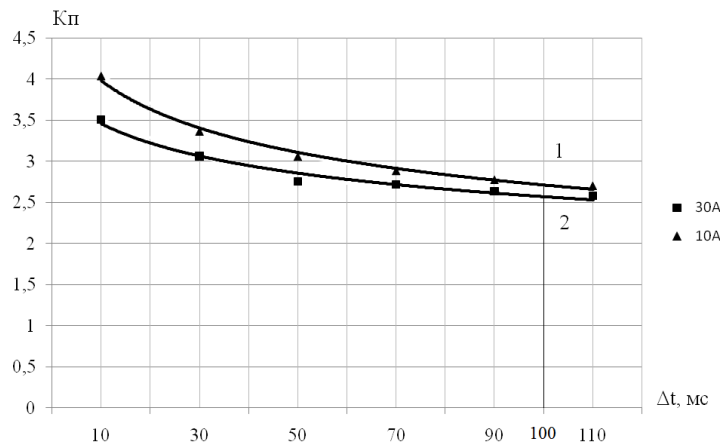


Рисунок 3.16 – Зависимость кратности максимальных перенапряжений K_n при дуговом перемежающемся ОЗЗ от интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги: 1 – для сети 6 кВ с $I_{CS} = 10 \text{ А}$; 2 – для сети 6 кВ с $I_{CS} = 30 \text{ А}$

Таким образом, для кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, косвенным признаком возможности возникновения опасных для сети дуговых перенапряжений являются интервалы времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, меньшие $\sim 100 \text{ мс}$.

3.6.4 Особенности применения косвенного способа распознавания опасных дуговых ОЗЗ на основе контроля интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги в компенсированных кабельных сетях. Процесс восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги в компенсированных сетях, как отмечалось выше, существенно отличается от последнего в сети с изолированной нейтралью (рис. 3.17).

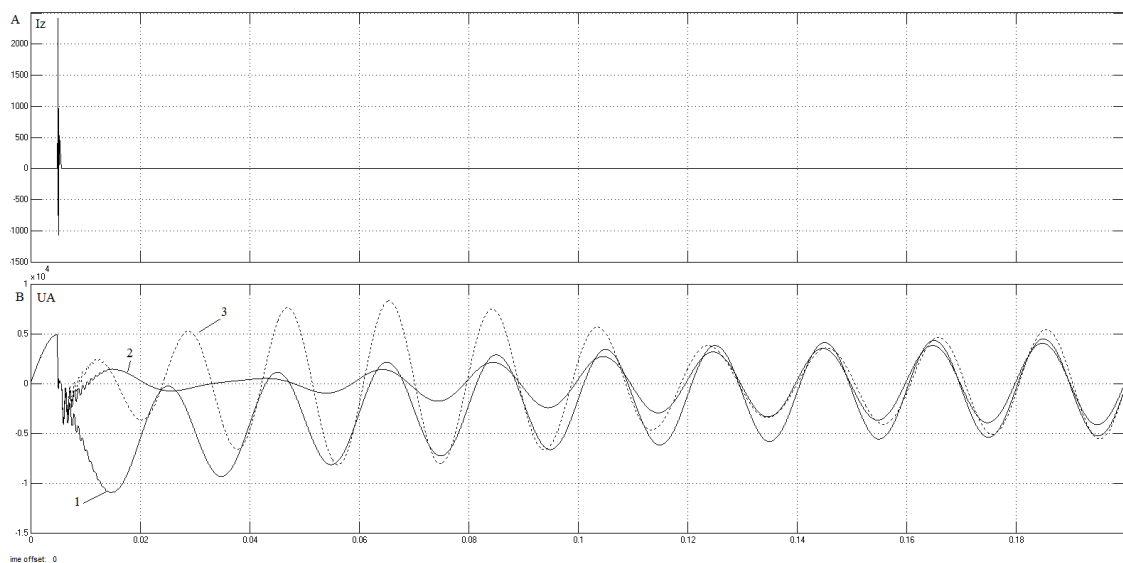


Рисунок 3.17 – Восстановление напряжения на поврежденной фазе u_A после гашения заземляющей дуги в кабельной сети с $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ и $I_{CS} = 30 \text{ А}$: 1 – изолированная нейтраль; 2 – резонансная настройка ДГР; 3 – перекомпенсация 25%

Из рис. 3.17 можно видеть, что при достаточно больших расстройках компенсации (15–20% и более) восстанавливающееся напряжение на поврежденной фазе u_d может достигать первого максимума, равного или превышающего U_m , через интервал времени $\Delta t_1 \approx 25\text{--}35$ мс, что больше, чем в сети с изолированной нейтралью, однако значительно меньше, чем в компенсированной сети при резонансной или близкой к ней настройке ДГР. Особенностью восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе при больших расстройках компенсации является также возникновение после первого максимума восстанавливающегося напряжения 2–3-х максимумов, превышающих первый. Так как на условия повторного зажигания заземляющей дуги влияют множество случайных факторов [26], в принципе повторный пробой изоляции может произойти не на 1-м, а на одном из последующих максимумов, хотя физически пробой более вероятен на 1-м максимуме. Анализ на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей, выполненных по схемам рис. 3.1 и 3.2, показал, что максимальные перенапряжения, как правило, возникают при повторном пробое на 2-м или 3-м максимуме восстанавливающегося напряжения (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Зависимость кратности перенапряжений от интервалов времени между повторными пробоями изоляции и степени расстройки компенсации в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ

	Значения $\Delta t_{\text{макс}}$ и $K_{п.\text{макс}}$ при расстройке компенсации ν , %										
	Перекомпенсация					Резонанс	Недокомпенсация				
	-25	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25
$\Delta t_{\text{макс}}$, мс	~50	~70	~110	~150	~200	>200	~190	~90	~50	~50	~50
$K_{п.\text{макс}}$, о.е	3	2,9	2,7	2,5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	2,7
$\Delta t_{\text{мин}}$	~25	~30	~50	~70	~200	>200	~190	~70	~50	~35	~35
$K_{п.\text{мин}}$	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4

В табл. 3.2: $\Delta t_{\text{макс}}$ – интервал времени между повторными пробоями изоляции, сопровождающимися наибольшими перенапряжениями при прочих равных условиях; $K_{п.\text{макс}}$ – соответствующая $\Delta t_{\text{макс}}$ кратность перенапряжений при повторном пробое изоляции; $\Delta t_{\text{мин}}$ – интервал времени после гашения заземляющей дуги и первым максимумом восстанавливающегося напряжения, равным или превышающим U_m ; $K_{п.\text{мин}}$ – соответствующая $\Delta t_{\text{мин}}$ кратность перенапряжений при повторном пробое изоляции.

Из данных табл. 3.2 можно видеть, что опасные для сети перенапряжения могут возникать при расстройках компенсации, превышающих 15%, при этом при одинаковой степени расстройки перенапряжения в режиме перекомпенсации больше, чем в режиме недокомпенсации. Так как согласно ПТЭ [197] длительно допускается работа компенсированной сети только с перекомпенсацией и – временно – с недокомпенсацией, то при оценке зависимости величины перенапряжений от интервалов времени между пробоями необходимо учитывать первый из указанных режимов. При повторных пробоях изоляции на первом максимуме восстанавливающегося напряжения, что наиболее вероятно, кратность перенапряжений практически не превышает таковую при первоначальном пробое.

На рис. 3.18 приведена зависимость кратности перенапряжений K_n от интервалов времени Δt между повторными пробоями для режима перекомпенсации -25%, построенная по данным табл. 3.2.

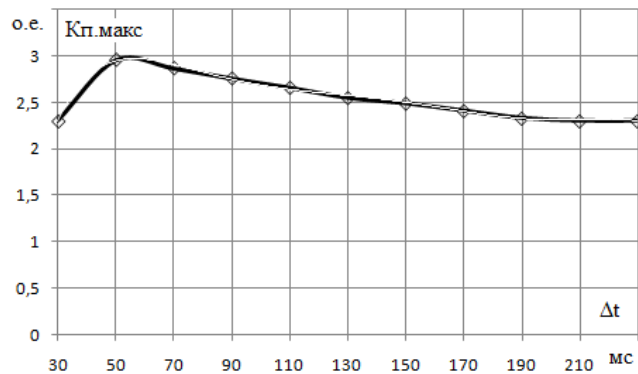


Рисунок 3.18 – Зависимость максимальной кратности перенапряжений $K_{п.макс}$ от величины интервала времени $\Delta t_{макс}$ между повторными пробоями изоляции для режима перекомпенсации -25%

Из рис. 3.18 можно видеть, что при расстройках компенсации $v \geq 15\%$ в рассматриваемых сетях опасные перенапряжения могут возникать при интервалах времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t \approx 50 \dots 90$ мс. Так как величина перенапряжений зависит не только от Δt , но и от степени расстройки компенсации, контроль интервалов времени между повторными пробоями, в отличие от сетей с изолированной нейтралью, не является однозначным признаком существования в сети опасных перенапряжений, а лишь свидетельствует о возможности возникновения таковых. Учитывая это, данный способ косвенного контроля перенапряжений в компенсированной сети нельзя использовать в комплексной многофункциональной защите для принятия решения о действии защиты на отключение. Положительный эффект от данного способа контроля может дать дополнительный (к сигналу о срабатывании) сигнал о возникновении в сети режима, при котором

возможно возникновение многократных пробоев изоляции, сопровождающихся опасными перенапряжениями.

3.6.5 Косвенный способ распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью на основе контроля общего уровня высших гармонических составляющих в переходном напряжении нулевой последовательности. В кабельных сетях 6–10 кВ в соответствии с ГОСТ 13109-97 предельно допустимое значение коэффициента несинусоидальности напряжения не может превышать 8% ($K_{Унс\ макс} \leq 0,08$). Спектр ВГ в напряжении $3U_0$ при устойчивом ОЗЗ определяется спектром ВГ напряжения поврежденной фазы. Если приближенно принять, что предельные значения коэффициентов несинусоидальности фазных и междуфазных напряжений приближенно одинаковы, то при УОЗЗ максимальный уровень ВГ в напряжении $3U_0$ не превышает 8%. При дуговых прерывистых ОЗЗ общий уровень высших гармонических составляющих в токах и напряжении нулевой последовательности резко возрастает, а его значение зависит от интервалов времени между повторными пробоями изоляции.

Исследование зависимости относительного уровня ВГ $U_{ВГ\Sigma^*} = U_{ВГ\Sigma}/U_{ф.ном}$ от интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги проводилось на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ по рис. 3.1 и 3.2 при различных значениях $I_{C\Sigma}$ сети. На рис. 3.19 приведена зависимость относительного уровня ВГ в напряжении нулевой последовательности от Δt $U_{ВГ\Sigma^*} = f(\Delta t)$, полученная по результатам спектрального анализа результатов вычислительных экспериментов на имитационных моделях.

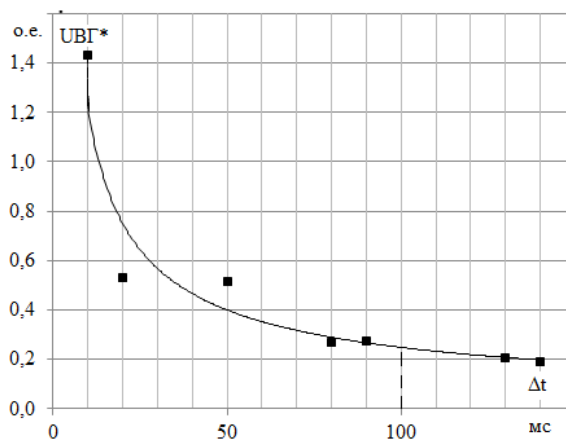


Рисунок 3.19 – Зависимость $U_{ВГ\Sigma^*}$ от интервала времени между повторными пробоями изоляции для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью

Выше было показано, что для кабельных сетей с изолированной нейтралью опасные для сети перенапряжения могут возникать при интервалах между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta t \leq 90\text{--}100$ мс (п. 3.6.3). Из рис. 3.19 можно видеть, что

данному значению $\Delta t \approx 90\text{--}100$ мс соответствует общий относительный уровень ВГ в напряжении $3U_0$ $U_{ВГ\Sigma^*} \approx 0,25$. Таким образом, косвенным признаком возникновения в сети при дуговых прерывистых ОЗЗ опасных перенапряжений является превышение уровня ВГ в напряжении $3U_0$ значения 25% от $U_{ф.ном.}$

3.6.6 Высшие гармонические составляющие в напряжении нулевой последовательности при дуговых ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и оценка возможности их применения для косвенного контроля перенапряжений. При устойчивых ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, как и в сетях с изолированной нейтралью, общий относительный уровень ВГ в напряжении $3U_0$ не может превышать предельно допустимое с по ГОСТ 13109-97 значение коэффициента несинусоидальности напряжения $K_{Унс\ макс} = 0,08$ (8% от номинального напряжения). В компенсированных сетях уровень ВГ при дуговых прерывистых ОЗЗ зависит не только от интервалов времени между повторными пробоями изоляции Δt , но и от степени расстройки компенсации. Поэтому в отличие от сетей с изолированной нейтралью в компенсированных сетях общий относительный уровень ВГ в напряжении $3U_0$ при дуговых прерывистых ОЗЗ не является однозначным признаком существования опасных перенапряжений. Указанный вывод подтверждается результатами анализа частотного спектра напряжения $3u_0(t)$ при дуговых ОЗЗ на модели компенсированной кабельной сети 6 кВ с $I_{CS} = 30$ А по рис. 3.1 при различных значениях расстройки компенсации $\nu = -10\%\dots-25\%$ и имитации повторных пробоев на различных максимумах восстанавливающегося напряжения поврежденной фазы (т.е. при различных значениях Δt). Результаты нескольких вычислительных экспериментов на имитационной модели компенсированной кабельной сети приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты оценки уровня ВГ в напряжении $3U_0$ компенсированной кабельной сети с $U_{ном} = 6$ кВ и $I_{CS} = 30$ А при дуговых ОЗЗ на шинах ЦП

№ п/п	Режим	ν , %	Δt , мс	K_n , о.е.	$U_{ВГ^*}$, %
1	Перекомпенсация	-25	25	2,33	25
2	Перекомпенсация	-25	30-35	2,4	26
3	Перекомпенсация	-25	40	2,91	27
4	Перекомпенсация	-25	50	2,97	25
5	Перекомпенсация	-20	35–40	2,34	14
6	Перекомпенсация	-20	60	2,51	16
7	Перекомпенсация	-15	65–70	2,36	11
8	Перекомпенсация	-10	100	2,35	5

Анализ данных табл. 3.3 показывает, что уровень ВГ в напряжении нулевой последовательности при дуговых ОЗЗ не является однозначной функцией ни длительности интервалов между повторными пробоями Δt , ни величины сопровождающих их перенапряжений K_n . Поэтому контроль уровня ВГ в напряжении нулевой последовательности, в отличие от сетей с изолированной нейтралью, не является однозначным признаком существования в сети опасных дуговых перенапряжений, а лишь свидетельствует о наличии в сети дугового прерывистого ОЗЗ. Учитывая это, данный способ косвенного контроля перенапряжений в компенсированной сети, как и контроль интервалов времени между повторными пробоями изоляции, нельзя использовать в комплексной многофункциональной защите для принятия решения о действии защиты на отключение.

3.6.7 Косвенный способ распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью на основе контроля общего уровня высших гармонических составляющих в переходном токе нулевой последовательности. В главе 2 было показано, что предельный расчетный уровень ВГ в токе устойчивого ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ не может превышать ~65% от значения $I_{C\Sigma}$. Измерения в реальных кабельных сетях показывают, что общий уровень высших гармоник в токе ОЗЗ кабельных сетей, как правило, не превышает 30–40% суммарного емкостного тока [189]. Анализ результатов вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ показал, что при дуговых перемежающихся ОЗЗ общий уровень ВГ существенно превышает указанный реальный предельный уровень и зависит в основном от длительности интервалов Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги (табл. 3.4).

Таблица 3.4 – Среднеквадратичные значения высших гармонических составляющих тока в месте повреждения при дуговом перемежающемся ОЗЗ на шинах ЦП кабельной сети 6 кВ при различных интервалах времени между повторными пробоями изоляции

$I_{C\Sigma} = 10 \text{ A}$										
$\Delta t, \text{ мс}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_{BG}/I_{C\Sigma}, \text{ о.е.}$	18,90	10,47	5,19	4,62	2,52	1,90	1,53	1,31	1,06	1
$I_{C\Sigma} = 30 \text{ A}$										
$\Delta t, \text{ мс}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_{BG}/I_{C\Sigma}, \text{ о.е.}$	11,40	5,96	3,02	2,61	1,47	1,02	0,96	0,79	0,62	0,6

На рис. 3.20 приведены зависимости среднеквадратичных относительных значений высших гармонических составляющих тока дугового ОЗЗ $I_{BG}^* = I_{BG}/I_{C\Sigma} = f(\Delta t)$, построенные по данным табл. 3.4.

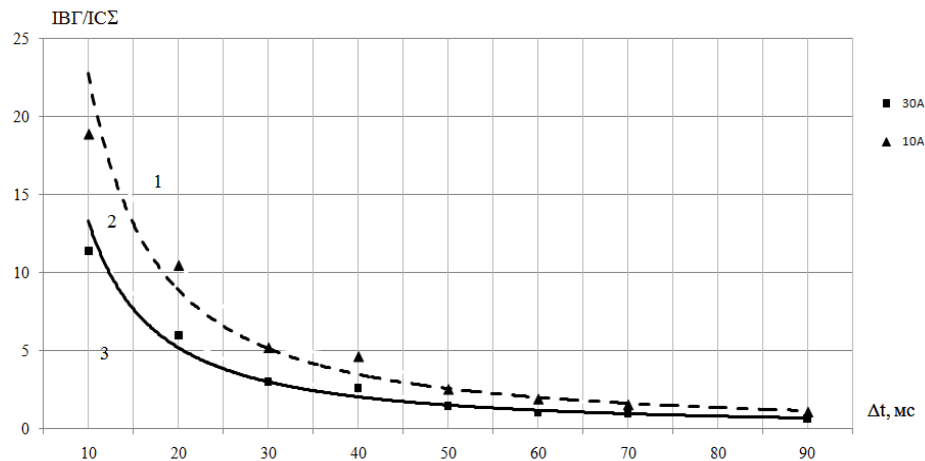


Рисунок 3.20 – Зависимости среднеквадратичного значения высших гармонических составляющих тока в месте ОЗЗ от интервалов времени между повторными пробоями изоляции для кабельных сетей 6 кВ: 1 – $I_{\Sigma} = 10 \text{ А}$; 2 – $I_{\Sigma} = 30 \text{ А}$

Из рис. 3.20 можно видеть, что даже при достаточно больших значениях Δt среднеквадратическое значение ВГ в токе ОЗЗ превышает или, по крайней мере, соизмеримо с суммарным емкостным током сети I_{Σ} . В токе нулевой последовательности неповрежденных присоединений отношение $I_{ВГ}/I_{\Sigma \text{ собс}}$ практически равно отношению $I_{ВГ}/I_{\Sigma}$ в месте ОЗЗ. Таким образом, контролируя общий уровень ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения, можно распознавать характер ОЗЗ – устойчивое или дуговое перемежающееся – и использовать результаты контроля для выявления опасных для сети дуговых ОЗЗ.

3.6.8 Высшие гармонические составляющие в токах нулевой последовательности при дуговых ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ и оценка возможности их применения для косвенного контроля перенапряжений. Исследования на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ показали, что уровень ВГ в токах нулевой последовательности при дуговых ОЗЗ, как и в напряжении $3U_0$, не является однозначной функцией ни длительности интервалов между повторными пробоями, ни величины сопровождающих их перенапряжений. Поэтому контроль уровня ВГ в токах нулевой последовательности, в отличие от сетей с изолированной нейтралью, не является однозначным признаком существования в сети опасных дуговых перенапряжений. Учитывая это, данный способ косвенного контроля перенапряжений в компенсированной сети нельзя использовать в комплексной многофункциональной защите для принятия решения о действии защиты на отключение.

3.7 Выводы по главе 3

3.7.1 Сформулированы задачи исследования высших гармонических составляющих в электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ, связанные с созданием комплексной многофункциональной защиты от данного вида повреждений в кабельных сетях 6–10 кВ.

3.7.2 Разработаны имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ в системе моделирования Matlab для исследования высших гармонических составляющих в электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ, учитывающие их назначение, особенности конфигурации и реальные параметры кабельных линий и других элементов.

3.7.3 С использованием моделей по п. 3.7.2 исследованы соотношения мгновенных значений, диапазоны изменения параметров, особенности частотных спектров переходных токов, влияющие на селективность и устойчивость функционирования защит от ОЗЗ на основе переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

3.7.4 На основе расчетных оценок и исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ показано, что для обеспечения селективности на всем интервале существования тока переходного процесса рабочий диапазон частот направленных устройств защиты, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, должен быть ограничен «сверху» частотой $f_c \leq 2 \dots 3$ кГц.

3.7.5 Для обеспечения вероятности отказов срабатывания при внутренних ОЗЗ, не превышающей ~1%, первичный ток срабатывания устройств защиты на основе переходных процессов в рабочем диапазоне частот не должен превышать 10 А. В целях уменьшения вероятности отказов срабатывания из-за недостаточной чувствительности целесообразно принять первичный минимальный ток срабатывания $I_{с.з., мин} \leq 1\text{--}2$ А, что технически не представляет сложностей для устройств защиты на микропроцессорной базе.

3.7.6 Для распознавания разновидности ОЗЗ при наличии ТННП может быть применен прямой контроль фазных перенапряжений. Данный способ наиболее эффективен, однако приводит к необоснованному усложнению устройства и имеет ограниченную область применения.

3.7.7 На основе исследований на моделях по п. 3.7.2 для кабельных сетей с изолированной нейтралью определены косвенные критерии распознавания опасных дуговых ОЗЗ: контроль интервалов времени между повторными пробоями заземляющей дуги, контроль уровня ВГ в напряжении нулевой последовательности, контроль уровня ВГ в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения. Данные критерии могут быть использованы для совершенствования существующих и разработки новых устройств защиты от замыканий на землю кабельных сетей с изолированной нейтралью.

3.7.8 Исследования на имитационных моделях компенсированных кабельных сетей с различной степенью расстройки компенсации показали, что критерии по п. 3.7.7 не являются однозначными признаками существования в сети опасных дуговых перенапряжений, а лишь свидетельствуют о наличии в сети дугового прерывистого ОЗЗ. Учитывая это, критерии косвенного контроля перенапряжений в компенсированной сети нельзя использовать в защите для принятия решения о действии защиты на отключение.

Результаты исследований данной главы отражены в публикациях [83, 89, 102–103, 108, 110].

Глава 4. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6–10 кВ

4.1 Основные функциональные требования к комплексной многофункциональной защите от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ

Основной целью технического совершенствования защиты от ОЗЗ является повышение эффективности работы распределительных кабельных сетей 6–10 кВ и в конечном итоге надежности электроснабжения потребителей. С учетом данной цели комплексное решение в части индивидуальной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ должно обеспечивать возможность эффективной реализации следующих основных функциональных требований:

1) комплексная защита от ОЗЗ должна обеспечивать селективность и устойчивость функционирования при всех допустимых по ПУЭ и другим нормативным документам режимах заземления нейтрали распределительных кабельных сетей 6–10 кВ;

2) комплексная защита от ОЗЗ должна обеспечивать селективность и устойчивость функционирования при всех возможных в кабельных сетях 6–10 кВ разновидностях ОЗЗ, а также их распознавание для автоматической оценки степени опасности повреждения для сети и поврежденного элемента и выбора наиболее эффективного при данной разновидности замыкания способа действия защиты (сигнал или отключение);

3) комплексная защита от ОЗЗ должна обеспечивать возможность применения на всех типах объектов кабельных сетей 6–10 кВ (ЦП, РП, ТП), на которых требуется применение селективной защиты от данного вида повреждений, в т.ч. при отсутствии трансформаторов напряжения для получения напряжения нулевой последовательности;

4) эффективность функционирования комплексной защиты от ОЗЗ не должна зависеть от факторов, влияющих на селективность и устойчивость работы отдельных составляющих ее функций (например, относительного значения собственного емкостного тока защищаемого присоединения, нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ контролируемой сети и др.);

5) комплексная защита от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ должна предусматривать также возможность дистанционного определения места поврежде-

ния (зоны повреждения с точностью до участка, который можно выделить для проведения высоковольтных испытаний) при всех разновидностях ОЗЗ (ОМЗЗ), включая кратковременные самоустраняющиеся пробой изоляции, что позволит значительно сократить затраты времени на поиск и устранение повреждения и повысить надежность электроснабжения потребителей.

Особенно актуальным представляется решение задачи ОМЗЗ для кабельных сетей городского электроснабжения, а также сложные по конфигурации и режимам работы кабельные сети 6–10 кВ систем электроснабжения предприятий отраслей промышленности с большим электропотреблением. В данной работе задачи ОМЗЗ, как уже отмечалось выше, не рассматриваются, т.к. являются предметом отдельных исследований и разработок.

4.2 Структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ

4.2.1 Структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали. Очевидно, что построить комплексную многофункциональную защиту от ОЗЗ, удовлетворяющую приведенным выше требованиям, можно только на микропроцессорной базе с использованием современных методов цифровой обработки сигналов. Состав функций для реализации комплексной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали, обоснован в п. 1.5.1 главы 1 настоящей работы. Структурно-функциональная схема возможного варианта комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, предназначенного для применения на объектах кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, оснащенных ТННП (например, на ЦП и РП), приведена на рис. 4.1.

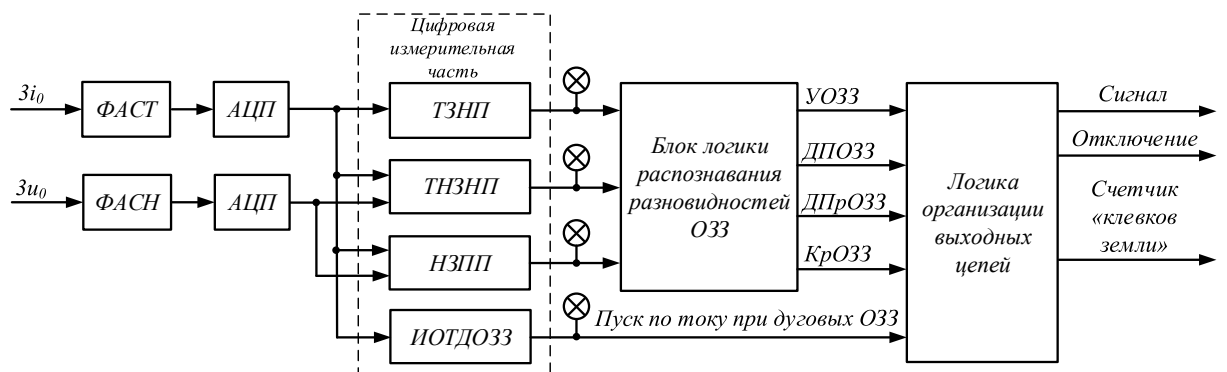


Рисунок 4.1 – Вариант выполнения комплексной многофункциональной защиты от ОЗ кабельных сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали

На рис. 4.1: ФАСТ, ФАСН – формирователи аналогового сигнала тока и напряжения; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ТЗНП – токовая защита нулевой последовательности, основанная на использовании составляющих промышленной частоты тока $3I_0$ установившегося режима ОЗ; ТНЗНП – токовая направленная защита нулевой последовательности, основанная на использовании фазных соотношений составляющих промышленной частоты тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$ установившегося режима ОЗ; НЗПП – направленная защита непрерывного действия на основе переходных процессов; ИОТДОЗЗ – измерительный орган тока дугового ОЗ.

При устойчивых ОЗ поврежденное присоединение определяется функциями ТЗНП или (и) ТНЗНП. Определение поврежденного присоединения при дуговых ОЗ (КрОЗЗ, ДПОЗЗ или ДПрОЗЗ) осуществляется функцией НЗПП. Эта же функция выполняет основную роль при распознавании разновидности дугового ОЗ и обеспечении возможности раздельного действия защиты на сигнал при неопасных и на отключение при опасных для сети и поврежденного элемента ДПОЗЗ (блок логики распознавания разновидностей ОЗ). В логической части защиты при ДПОЗЗ или ДПрОЗЗ осуществляется также блокировка функции ТНЗНП (для исключения возможности ее излишних срабатываний) и блокировка или изменение уставки по первичному току срабатывания функции ТЗНП, что обеспечивает возможность повышения ее чувствительности при устойчивых ОЗ. ИОТДОЗЗ обеспечивает возможность контроля среднеквадратичного значения тока при неопасных для сети (по величине перенапряжений) дуговых прерывистых ОЗ, но которые могут представлять опасность по величине тока для поврежденного элемента (например, ЭД). Выход «КрОЗЗ» используется для действия на сигнал и на счетчик числа кратковременных самоустраниющихся ОЗ («клевок земли»).

На объектах кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью, не оборудованных ТННП (например, ТП кабельных сетей промышленного электроснабжения), может быть использована только функция ТЗНП. Ниже будут рассмотрены способы выполнения данной защиты, обеспечивающие возможность распознавания ДПОЗЗ и повышения чувствительности при устойчивых ОЗЗ.

4.2.2 Структурно-функциональная схема комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ (с резонансным или комбинированным заземлением нейтрали). Структурно-функциональная схема возможного варианта выполнения комплексной защиты от ОЗЗ, предназначенной для применения на объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, приведена на рис. 4.2. В данном варианте комплексной защиты ФАСТ, ФАЧН, АЦП, НЗПП, ИОТДОЗЗ – то же самое, что и на рис. 4.1, ТЗНПВГ – максимальная токовая защита на основе ВГ (токовая защита абсолютного замера ВГ); НЗВГ – направленная защита на основе ВГ.

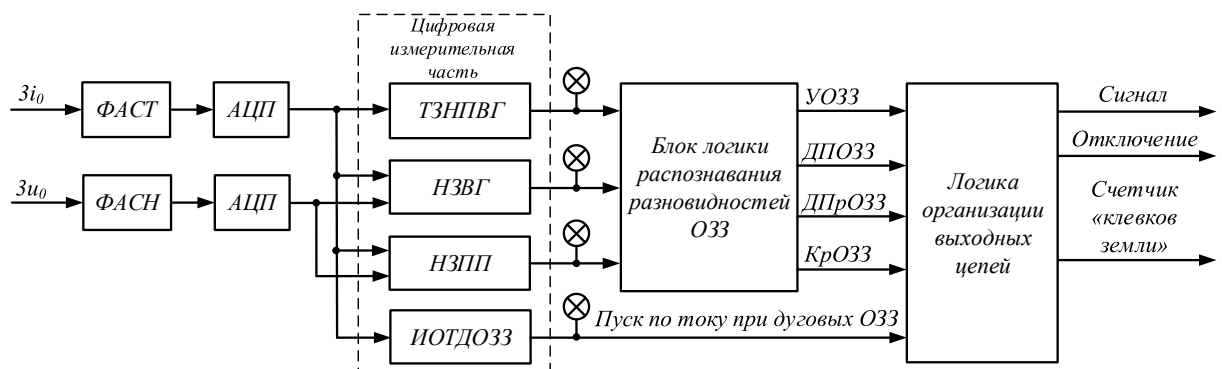


Рисунок 4.2 – Вариант выполнения комплексной многофункциональной защиты для ЦП кабельных сетей 6–10 кВ с резонансно заземленной и комбинированной нейтралью

При устойчивых ОЗЗ поврежденное присоединение определяется функциями ТЗНПВГ или (и) НЗВГ. Определение поврежденного присоединения при дуговых ОЗЗ (КрОЗЗ, ДПОЗЗ или ДПрОЗЗ), как и в варианте по рис. 4.1, осуществляется функцией НЗПП. Эта же функция с использованием блока логики обеспечивает возможность распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ и действия защиты на отключение при опасных для сети и поврежденного элемента многократных повторных пробоях изоляции, которые могут сопровождаться опасными для сети перенапряжениями [26]. В логической части защиты при дуговых ОЗЗ (ДПОЗЗ или ДПрОЗЗ) осуществляется также блокировка функции токовой направленной защиты на основе высших гармоник (НЗВГ) для исклю-

чения возможности ее излишних срабатываний и блокировка или изменение уставки по первичному току срабатывания функции токовой защиты абсолютного замера ВГ (ТЗНПВГ), что обеспечивает возможность повышения ее чувствительности при устойчивых ОЗЗ. ИОТДОЗЗ обеспечивает возможность контроля среднеквадратичного значения тока при дуговых прерывистых ОЗЗ, которые могут представлять опасность по величине тока для поврежденного элемента (например, ЭД). Выход «КрОЗЗ» используется для действия на сигнал и на счетчик «клевков земли».

Раздельное выполнение измерительной части функций направленных защит на основе переходных процессов (НЗПП) и на основе ВГ (НЗВГ) в схеме по рис. 4.2 обусловлено следующими причинами:

- 1) различными требованиями к чувствительности защиты в установившихся $I_{с.з. мин} \leq 0,1$ А (п. 2.4.4 главы 2) и переходных $I_{с.з. мин} \leq 1-2$ А (п. 3.5.2 главы 3) режимах ОЗЗ;
- 2) различием значений «верхней» частоты рабочих диапазонов частот защиты в установившемся $f_{р. макс} = 650$ Гц и в переходном режимах $f_{р. макс} = 2...3$ кГц (глава 3, п. 3.4.3);
- 3) переходными процессами во вторичных цепях тока и напряжения, обусловленных, в частности, наличием RC-фильтров в ФАСТ и ФАСН, отстройка от которых может привести к необходимости загробления направленной защиты на основе ВГ.

На объектах компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, не оборудованных ТННП (например, ТП кабельных сетей промышленного электроснабжения), может быть использована только функция ТЗНПВГ. Ниже будут рассмотрены способы выполнения данной защиты, обеспечивающие возможность распознавания ДПОЗЗ и повышения чувствительности при устойчивых ОЗЗ.

4.2.3 Комплексная многофункциональная защита от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ с любым режимом заземления нейтрали. Из сравнения схем по рис. 4.1 и 4.2 можно видеть, что необходимая для конкретной защищаемой кабельной сети 6–10 кВ функциональная структура может быть обеспечена внутренним конфигурированием логической части комплексной защиты от ОЗЗ.

Ниже рассматриваются принципы выполнения основных функциональных узлов и элементов комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, выполненной в соответствии со структурно-функциональными схемами, приведенными на рис. 4.1 и 4.2.

4.3 Разработка принципов выполнения основных функциональных узлов и элементов комплексной многофункциональной защиты от замыканий на землю

4.3.1 Формирователи аналоговых сигналов тока и напряжения комплексной многофункциональной защиты кабельных сетей 6–10 кВ от замыканий на землю

4.3.1.1 Назначение формирователей аналоговых сигналов тока и напряжения.

Формирователь аналогового сигнала тока (ФАСТ, рис. 4.1, 4.2) обеспечивает преобразование вторичного тока кабельного ТТНП в напряжение на входе АЦП, допустимый диапазон значений входных сигналов АЦП в расчетных режимах работы функций защиты от ОЗЗ, гальваническую развязку вторичных цепей тока и входных цепей АЦП, защиту входных цепей АЦП от возможных во вторичных цепях тока и напряжения импульсных перенапряжений. Аналогичные функции выполняет формирователь аналогового сигнала напряжения (ФАСН, рис. 4.1, 4.2).

4.3.1.2 Формирователь аналогового сигнала тока. Принципиальная схема ФАСТ приведена на рис. 4.3.

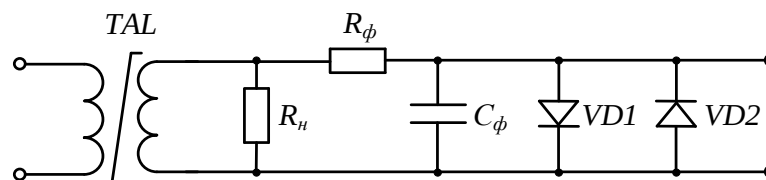


Рисунок 4.3 – Принципиальная схема ФАСТ

ФАСТ по рис. 4.3 включает промежуточный трансформатор TAL, нагруженный на активное сопротивление R_n , RC-фильтр (R_ϕ , C_ϕ), нелинейные преобразователи VD1, VD2 для защиты входных цепей АЦП. RC-фильтр обеспечивает предварительную фильтрацию высокочастотных составляющих ($f_c > 2\text{--}3$ кГц, п. 3.4.2 главы 3) и снижения крутизны фронтов импульсных перенапряжений во вторичных цепях тока и напряжения.

4.3.1.3 Формирователь аналогового сигнала напряжения. Принципиальная схема ФАСН приведена на рис. 4.4. ФАСН (рис. 4.4) включает промежуточный трансформатор TLV, низкочастотный RC-фильтр (R_ϕ , C_ϕ), стабилитроны VD1, VD2 для защиты входных цепей АЦП.

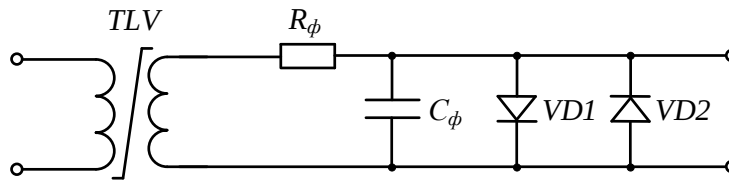


Рисунок 4.4 – Принципиальная схема ФАЧН

4.3.1.4 Основные требования к ФАСТ и ФАЧН. Как было показано выше (п. 3.4.1 главы 3), непрерывный контроль направления мощности нулевой последовательности переходного процесса при ОЗЗ возможен, если в рабочем диапазоне частот НЗПП для сравниваемых величин на всем интервале времени наблюдения обеспечивается выполнение соотношений (3.7) и (3.8). Для выполнения данного условия необходимо обеспечить идентичность частотных характеристик ФАСТ и ФАЧН, а также цифровых фильтров канала тока и напряжения нулевой последовательности. Для заданных технических данных и характеристик вторичных преобразователей тока и напряжения указанное согласование наиболее просто обеспечить выбором параметров RC-фильтра (рис. 4.5).

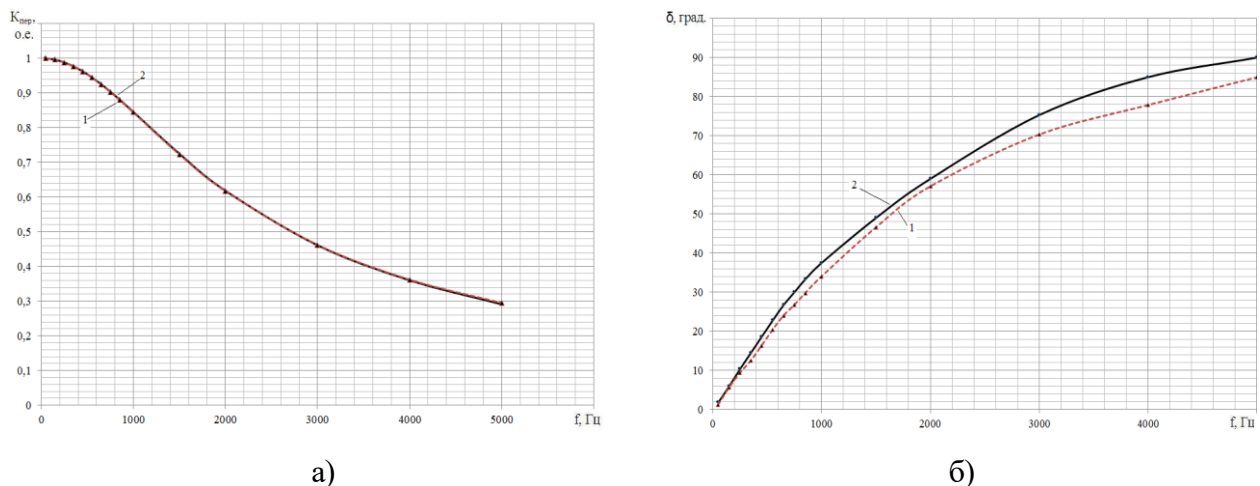


Рисунок 4.5 – Согласование частотных характеристик ФАСТ и ФАЧН выбором параметров RC-фильтра

4.3.1.5 Основные требования к АЦП. Требования к частоте дискретизации АЦП определяются «верхней» частотой $f_в$ рабочего диапазона частот функций защиты от ОЗЗ. Как показано в главах 2 и 3, для направленной защиты от ОЗЗ на основе высших гармоник $f_в \approx 650$ Гц, для направленной защиты на основе переходных процессов $f_в \approx 2\text{--}3$ кГц. Для обеспечения требуемой точности замера высших гармоник и электрических величин переходного процесса при ОЗЗ целесообразно обеспечить не менее 20 выборок на период верхней частоты рабочего диапазона. С учетом этого для разрабатываемых

функций защиты от ОЗЗ на основе ВГ и переходных процессов (рис. 4.1, 4.2) целесообразно применить АЦП с частотой дискретизации не менее $20f_e = 40$ кГц.

Требования к разрядности АЦП определяются рабочими диапазонами значений входных токов функций защиты от ОЗЗ, входящих в состав функций комплексной многофункциональной защиты. Расчеты динамических диапазонов входных токов функций защиты ТЗНП, ТНЗНП, ТЗНПВГ, НЗВГ, НЗПП (рис. 4.1, 4.2) показали, что для обеспечения требуемой точности замера целесообразно применить 14–16-разрядный АЦП.

4.3.2 Принципы выполнения основных функциональных узлов и элементов направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов

4.3.2.1 Структурно-функциональная схема направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов. Структурно-функциональная схема НЗПП приведена на рис. 4.6. НЗПП включает следующие основные узлы и элементы: ЦФВГ – цифровые фильтры высших гармонических составляющих каналов напряжения и тока нулевой последовательности; ПО $3U_0$ – пусковой орган максимального напряжения нулевой последовательности; ПОВГ $3U_0$ – пусковой орган максимального напряжения ВГ в напряжении $3U_0$; ИОНМ – измерительный орган направления мощности нулевой последовательности непрерывного действия (на интервале времени переходного процесса при ОЗЗ).

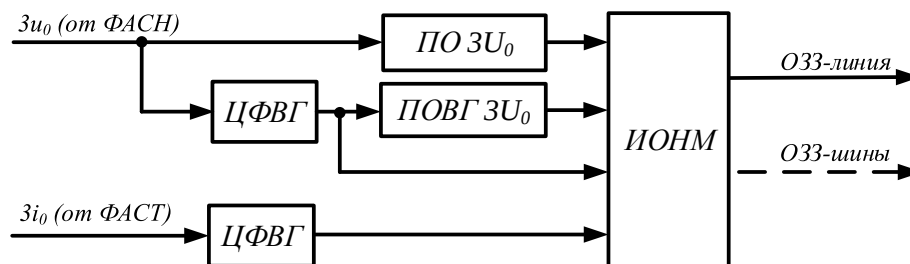


Рисунок 4.6 – Структурно-функциональная схема НЗПП

Принцип действия ИОНМ НЗПП основан на непрерывном контроле фазных соотношений между переходным током и производной напряжения нулевой последовательности в спектре частот до 2–3 кГц в соответствии с соотношениями (3.7) и (3.8). Работу ИОНМ в заданном рабочем диапазоне частот обеспечивают цифровые фильтры ЦФВГ. ИОНМ поз-

воляет формировать выходные сигналы как при внутренних ОЗЗ в защищаемом направлении (ОЗЗ – линия), так и при внешних ОЗЗ «за спиной» (ОЗЗ – шины). ПО $3U_0$ предназначен для отстройки от коммутационных переключений в защищаемой сети и других режимов без ОЗЗ, обуславливающих кратковременное появление бросков переходного тока и напряжения нулевой последовательности. ПОВГ $3U_0$ используется в логике распознавания разновидностей дуговых ОЗЗ.

4.3.2.2 Цифровые фильтры высших гармонических составляющих ЦФВГ. Рабочие диапазоны частот, необходимые для обеспечения селективности и устойчивости функционирования НЗПП, а также ТЗНПВГ и ТНЗВГ (рис. 4.2) на основе ВГ установившегося режима ОЗЗ достаточно близки (см. главы 2 и 3), поэтому для указанных функций защиты целесообразно использовать один и тот же фильтр. ЦФВГ должен обеспечивать подавление составляющей рабочей частоты 50 Гц ($K_{пер} \ll 1$), максимальный коэффициент передачи в основном рабочем диапазоне частот защит функций защиты на основе ВГ установившегося режима ОЗЗ 250–650 Гц ($K_{пер} \approx 1$), достаточный для обеспечения чувствительности НЗПП в переходных режимах ОЗЗ коэффициент передачи в диапазоне частот до 1–2 кГц и подавление составляющих с частотой более 3 кГц. На основе аналитических расчетов и исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ получена требуемая для функций НЗПП, ТЗНПВГ и ТНЗВГ АЧХ цифрового фильтра ЦФВГ (рис. 4.7).

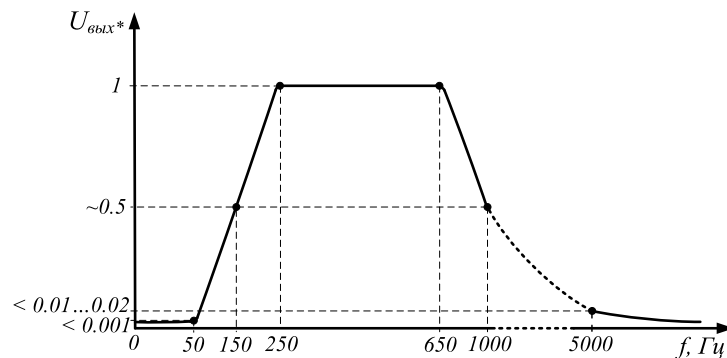


Рисунок 4.7 – АЧХ цифрового фильтра ЦФВГ в каналах тока $3i_0$ и напряжения $3U_0$ НЗПП, ТЗНПВГ и ТНЗВГ

Основные точки АЧХ фильтра приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Основные точки АЧХ ЦФВГ каналов тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$

f , Гц	50	150	250–650	1000	>5000
$K_{пер}^* = U_{вых}(f) / U_{вых}(250 \text{ Гц})$, о.е.	0,001	0,5	~1	0,5	<0,01–0,02

Для получения указанной на рис. 4.7 АЧХ можно применить схему из трех последовательно включенных фильтров:

- 1) полосового фильтра (ПФ) с полосой подавления $f_{c1} = 45$ Гц, $f_{c2} = 55$ Гц, обеспечивающего подавление составляющей рабочей частоты;
- 2) фильтра верхних частот (ФВЧ) с частотой среза $f_{c3} = 120$ Гц, обеспечивающий дополнительное подавление основной гармоники;
- 3) фильтра нижних частот (ФНЧ) с частотой среза $f_{c4} = 650$ Гц, обеспечивающий пропускание практически без затухания от 5 до 13 гармоники и с допустимым по условиям требуемой чувствительности высшие гармонические составляющие в полосе частот до ~ 2 кГц в переходных режимах.

Частотная характеристика комбинированного фильтра высших гармонических составляющих установившегося и переходного режимов ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ приведена на рис. 4.8.

Из сравнения зависимостей рис. 4.7 и 4.8 можно видеть, что АЧХ комбинированного ЦФВГ достаточно точно аппроксимирует требуемую АЧХ по рис. 4.7.

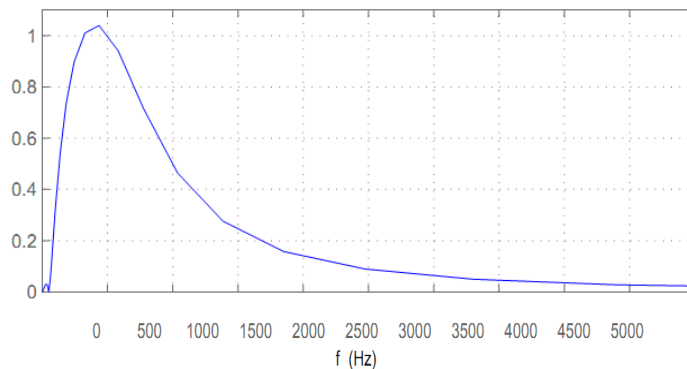


Рисунок 4.8 – АЧХ комбинированного ЦФВГ

4.3.2.3 Пусковой орган максимального напряжения нулевой последовательности (ПО $3U_0$). Основным назначением ПО $3U_0$, как уже отмечалось выше, является обеспечение отстройки НЗПП от режимов без ОЗЗ, сопровождающихся возникновением переходных процессов в контуре нулевой последовательности защищаемой сети. Дополнительным назначением ПО $3U_0$ является обеспечение непрерывности действия измерительного органа направления мощности НЗПП при ДПОЗЗ, для чего в сетях с изолированной нейтралью и в компенсированных сетях возврат пускового органа в исходное состояние должен быть синхронизирован с временем возврата сети в нормальное состояние после гашения заземляющей дуги, характеризующееся допустимым смещением нейтрали в нормальных режимах без ОЗЗ. В кабельных сетях 6–10 кВ, работаю-

щих с изолированной нейтралью, это время должно быть не меньше максимальных интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, при которых возможно возникновение опасных перенапряжений, т.е. ~ 100 мс (п. 3.6.4).

Структурно-функциональная схема пускового органа по напряжению $3U_0$, реализующая рассмотренные выше требования, приведена на рис. 4.9.

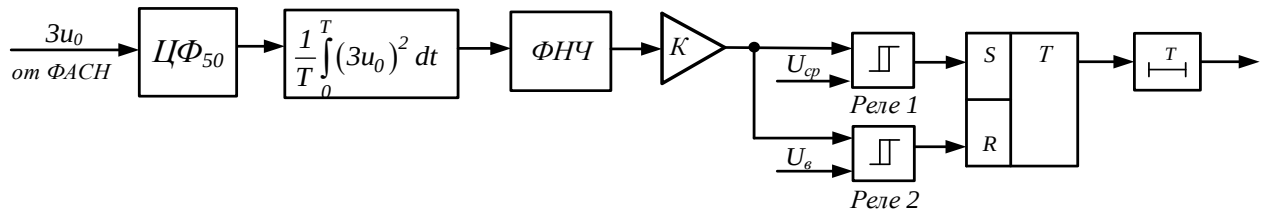


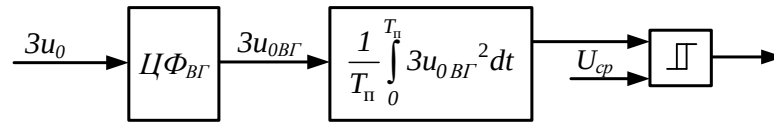
Рисунок 4.9 – Структурно-функциональная схема пускового органа по напряжению нулевой последовательности $3U_0$

На рис. 4.9: ЦФ₅₀ – цифровой фильтр, выделяющий из напряжения $3U_0$ составляющую рабочей частоты 50 Гц; ФНЧ – фильтр низших частот с полосой пропускания $f_c \leq 2\text{--}3$ кГц; К – линейный преобразователь с коэффициентом передачи К; Реле 1 – реле максимального действия, задающее уставку на срабатывание U_{cp} ПО; Реле 2 – реле минимального действия, задающее уставку на возврат реле $U_{в}$; Т – задержка на срабатывание для отстройки от коммутационных помех по времени.

Уставка на срабатывание выбирается из условия отстройки от максимального напряжения $3U_0$ в режимах без ОЗЗ и должна находиться в пределах $(0,15\text{--}0,3)U_{ном}$. Время срабатывания ПО, обеспечивающее отстройку от коммутационных переключений в сети, как показали исследования на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, должно быть не меньше 10–15 мс.

4.3.2.4 Пусковой орган по уровню высших гармоник в напряжении нулевой последовательности (ПОВГ $3U_0$). В рассматриваемом варианте комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ по рис. 4.1 и 4.2 ПОВГ $3U_0$ используется для пуска (разрешения действия) НЗПП и блокировки (запрета) действия функций комплексной защиты, основанных на использовании составляющих 50 Гц или ВГ установившегося режима ОЗЗ (ТЗНП, ТНЗНП, ТЗНПВГ, НЗВГ, рис. 4.1 и 4.2), обеспечивая распознавание устойчивых и дуговых ОЗЗ.

Структурно-функциональная схема ПОВГ $3U_0$ приведена на рис. 4.10.

Рисунок 4.10 – Структурно-функциональная схема ПОВГ $3U_0$

На рис. 4.10: Реле 1 – реле максимального действия с уставкой U_{cp} . Уставка Реле 1 выбирается из условия отстройки от максимального уровня ВГ в напряжении $3U_0$ в установившемся режиме ОЗЗ (п. 3.6.5). В переходных режимах при ДПОЗЗ и ДПрОЗЗ общий уровень ВГ в напряжении нулевой последовательности значительно (в несколько раз – см. главу 3) увеличивается, что и является признаком дугового ОЗЗ.

4.3.2.5 Способы выполнения измерительного органа непрерывного действия для контроля направления мощности нулевой последовательности в переходных режимах замыканий на землю. Непрерывный контроль знака среднего (на интервале наблюдения) значения мощности нулевой последовательности в переходном режиме ОЗЗ при использовании в качестве поляризующей величины производной du_0/dt может быть реализован на основе алгоритмов, описываемых следующими соотношениями [70]:

$$J_1 = \int_0^{t_n} \text{sign}(i_0(t)) \cdot \text{sign}\left(\frac{du_0(t)}{dt}\right) dt; \quad (4.1)$$

$$J_2 = \int_0^{t_n} i_0(t) \cdot \frac{du_0(t)}{dt} dt; \quad (4.2)$$

$$J_3 = \max_{0 < \tau < t_n} \int_0^{t_n} i_0(t + \tau) \cdot \frac{du_0(t)}{dt} dt, \quad (4.3)$$

где t_n – время наблюдения переходного процесса ОЗЗ (время срабатывания направленного измерительного органа защиты).

Из уравнений (3.7) и (3.8) следует, что значение интегральной величины $J_1 - J_3$ в (4.1) – (4.3) для поврежденного присоединения всегда отрицательно, а для всех неповрежденных присоединений положительно.

Способ, основанный на вычислении интегральной величины J_1 по (4.1), используется, в частности, в направленном устройстве защиты от ОЗЗ типа «Спектр», разработанном в ИГЭУ [8, 31], и фактически реализует известный способ сравнения времени совпадения с временем несовпадения знаков сравниваемых величин [198]. Лабораторные испытания устройств защиты типа «Спектр» на физической модели трехфазной кабельной сети в ИГЭУ, а также испытания и опыт эксплуатации в действующих кабельных сетях 6–10 кВ опытных образцов данной защиты подтверждают эффективность

данного способа выполнения направленной защиты на основе переходных процессов [8, 31, 59, 60]. Исследования данного способа определения направления мощности нулевой последовательности в переходных режимах ОЗЗ, выполненные в рамках данной работы на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ, также подтверждают эффективность данного способа.

Значение интегральной величины J_2 по (4.2) учитывает различие не только знаков, но и значений переходных токов $3i_0$ в поврежденном и неповрежденном присоединениях на заданном интервале времени наблюдения t_n переходного процесса при ОЗЗ. Значение интегральной величины J_3 по (4.3) соответствует временной взаимной корреляционной функции совокупности мгновенных значений тока нулевой последовательности и скорости нарастания (производной) напряжения нулевой последовательности при выбранном параметре t_n .

Способы 2 и 3, как показано в [70], в принципе могут обеспечить более высокую устойчивость функционирования в условиях возможных искажений фазных соотношений сравниваемых величин, чем способ 1. Чувствительность каждого из указанных выше трех способов выполнения ИОНМ НЗПП к влиянию фазных (угловых) погрешностей, обусловленных элементами схемы формирования сравниваемых величин, исследована в [70]. Для оценки чувствительности к влиянию фазовых погрешностей на математических моделях «Электрическая сеть – устройство защиты от ОЗЗ по способу 1 (2, 3)» в [70] с использованием системы моделирования Matlab были выполнены расчеты отношения «сигнал / помеха» по выражению

$$K_{1C/П}(t_c) = \frac{J_{1C}}{J_{1H}} = \frac{\int_0^{t_n} \left[i_0^{(+)}(t+t_c) \cdot \frac{du_0^{(+)}(t)}{dt} + i_0^{(-)}(t+t_c) \cdot \frac{du_0^{(-)}(t)}{dt} \right] dt}{-\int_0^{t_n} \left[i_0^{(+)}(t+t_c) \cdot \frac{du_0^{(-)}(t)}{dt} + i_0^{(-)}(t+t_c) \cdot \frac{du_0^{(+)}(t)}{dt} \right] dt}, \quad (4.4)$$

где J_{1C} – интеграл, соответствующий моментам совпадения знаков полувольт тока $i_0(t)$ и производной du_0/dt , J_{1H} – интеграл, соответствующий моментам несовпадения знаков полувольт $i_0(t)$ и производной du_0/dt ; t_c – временной сдвиг сигнала тока $i_0(t)$ по отношению к сигналу du_0/dt , учитывающий влияние угловых погрешностей ТТП, ТНП и других элементов схемы формирования сравниваемых величин.

На рис. 4.11 приведены полученные в [70] зависимости отношения «сигнал / помеха» $K_{C/П}$ от значения t_c . Из данных, приведенных на рис. 4.11, можно видеть, что в отличие от способов 1 и 2 способ, основанный на вычислении взаимной корреля-

ционной функции, в наибольшей степени обеспечивает нечувствительность направленной защиты к влиянию фазовых сдвигов между сравниваемыми величинами. Однако вычисление взаимной корреляционной функции приводит к усложнению схемы защиты. Способ 2 обеспечивает более высокую степень отстройки от угловых погрешностей, чем способ 1.

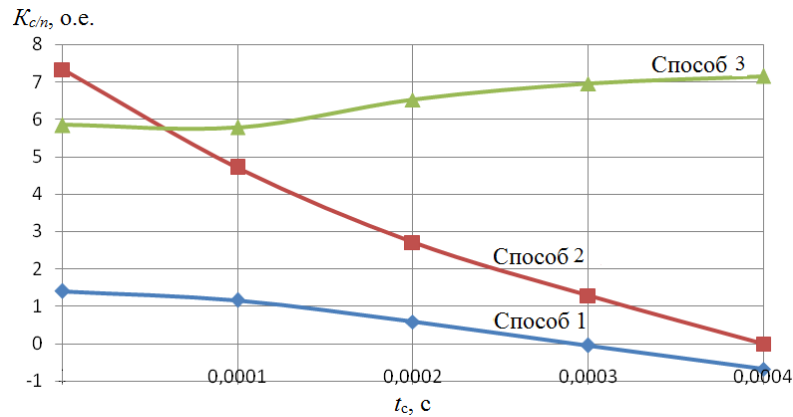


Рисунок 4.11 – Зависимости отношения «сигнал / помеха» $K_{с/п}$ от значения временного сдвига между сравниваемыми величинами t_c для способов 1, 2, 3 [70]

Однако реализация способов 2 и 3 возможна только при отсутствии ограничений сигналов переходного тока $3i_0(t)$ во входных цепях тока (ФАСТ, АЦП) по амплитуде, что связано с необходимостью значительного расширения динамического диапазона допустимых значений входных сигналов тока и, соответственно, разрядности АЦП. В то же время, как можно видеть из зависимостей рис. 4.11, нарушения устойчивости функционирования ИОНМ по способу 1 ($K_{с/п} \leq 1$) могут возникать при значениях $t_c \geq \sim 3$ мс, что при минимальной частоте зарядной составляющей токов переходного процесса в кабельных сетях 6–10 кВ $f_s \geq 200\text{--}300$ Гц (п. 3.3.4 главы 3) соответствует угловым сдвигам между сравниваемыми величинами порядка $20\text{--}30^\circ$. Расчеты на моделях показали, что при реально возможных для микропроцессорных УРЗ вторичных нагрузках кабельных ТТНП, частотных характеристиках применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ для подключения устройств защиты от ОЗЗ ТТНП и ТННП, принятых параметрах ФАСТ, ФАСН и ЦФВГ угловые погрешности при минимальной частоте тока переходного процесса не превышают $5\text{--}10^\circ$ и уменьшаются с увеличением частоты переходного тока. С учетом изложенного для реализации ИОНМ комплексной защиты от ОЗЗ принят 1-й из рассмотренных выше способов.

4.3.2.6 Структурно-функциональная схема ИОНМ непрерывного действия НЗПП. Структурно-функциональная схема ИОНМ НЗПП, реализующего способ 1, приведена на рис. 4.12.

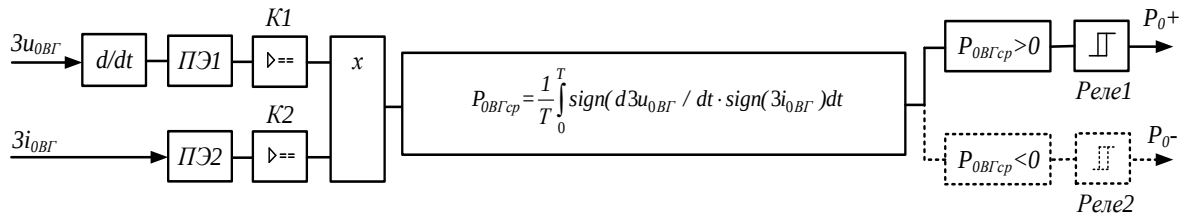


Рисунок 4.12 – Структурно-функциональная схема ИОНМ НЗПП

На рис. 4.12: ПЭ1 и ПЭ2 – пороговые элементы, обеспечивающие дополнительную (вместе с фильтрами ВГ) отстройку НЗПП от переходных процессов во вторичных цепях напряжения и тока нулевой последовательности при дуговых перемежающихся ОЗЗ; К1 и К2 – компараторы, осуществляющий преобразование входного сигнала в прямоугольные импульсы с нормированной единичной амплитудой и длительностью, равной длительности полуволн входной электрической величины; Реле 1 – реле максимального действия, уставкой срабатывания которого задается диапазон углов срабатывания в прямом направлении (при внутренних ОЗЗ); Реле 2 – реле максимального действия, уставкой срабатывания которого задается диапазон углов срабатывания в обратном направлении (при внешних ОЗЗ), т.е. зона углов блокировки срабатывания защиты в прямом направлении.

Интервал времени усреднения T мощности нулевой P_{0BGcp} принят равным минимально возможным интервалам времени Δt между повторными пробоями изоляции при дуговых перемежающихся ОЗЗ ($\Delta t = 10$ мс при ДПОЗЗ по теории W. Petersen [1–3, 38]). При увеличении интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги среднее значение мощности P_{0BGcp} , вычисленное на интервале усреднения, уменьшается, однако знак его не изменяется. Уставка срабатывания Реле 1 обеспечивает фиксацию знака мощности даже при однократном пробое изоляции.

4.3.2.7 Функционально-логическая схема и принцип действия измерительной логики ИОНМ НЗПП. Для определения поврежденного присоединения при любой разновидности ОЗЗ, а также последующего распознавания разновидностей ОЗЗ, определения числа «клевков земли» на защищаемом присоединении должна осуществляться фиксация первого и каждого последующего пробоя изоляции в защища-

емом направлении. Выполнение указанной функции осуществляется с использованием быстродействующей логики, которая является неотъемлемой частью измерительного органа и поэтому может быть названа измерительной.

Функционально-логическая схема узла измерительной логики, обеспечивающего запоминание (фиксацию) каждого пробоя изоляции в защищаемом направлении («ОЗЗ – линия») приведена на рис. 4.13. Аналогичным образом может быть выполнена логика, обеспечивающая фиксацию каждого пробоя изоляции в обратном направлении («ОЗЗ – шины»).

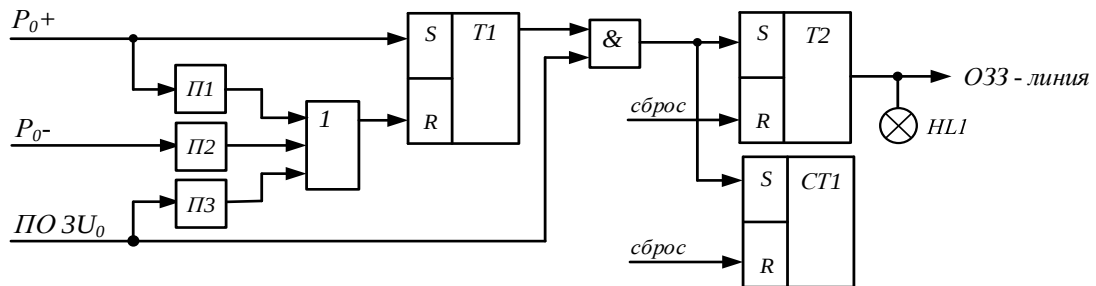


Рисунок 4.13 – Функционально-логическая схема узла, обеспечивающего фиксацию каждого повторного пробоя изоляции и формирование общего сигнала «ОЗЗ – линия»

На рис. 4.13: П1, П2 – блоки, формирующие кратковременный импульс (с длительностью, определяемой частотой выборок АЦП) по фронту нарастающего сигнала от 0 до 1, появляющегося на выходе P_{0+} или P_{0-} измерительного органа НЗПП, обеспечивающий стирание любой ранее записанной в триггеры оперативной памяти Т1 (Т3) информации перед записью в них новой информации; П3 – блок, формирующий кратковременный импульс (с длительностью, определяемой частотой выборок АЦП) по спаду о сигнала от 0 до 1 на выходе ПО $ЗU_0$, обеспечивающий стирание любой ранее записанной в триггер оперативной памяти Т1 информации; Т2 – триггер долговременной памяти (до «ручного» сброса (квитирования) сигнала); СТ1 – счетчик числа «клевков земли» (срабатываний ПО $ЗU_0$) при ОЗЗ на защищаемом присоединении.

Принцип действия измерительной логики заключается в следующем. При внутренних пробоях изоляции появляется сигнал на выходе P_{0+} измерительного органа НЗПП на время существования переходного тока ОЗЗ, при внешних пробоях изоляции – сигнал на выходе P_{0-} (рис. 4.4). Появление сигнала на выходе P_{0+} фиксируется триггером оперативной (кратковременной) памяти Т1 (рис. 4.5, а), причем записи новой информации в элемент оперативной памяти предшествует стирание любой ранее запи-

санной (например, при коммутационных переключениях в сети) информации. Для этого по переднему фронту сигнала P_{0+} преобразователем П1 формируется кратковременный единичный стирающий импульс (например, с длительностью, равной периоду частоты выборок АЦП), а запись информации в триггер оперативной памяти осуществляется с задержкой, превышающей длительность стирающего импульса. Передача информации из триггера оперативной памяти Т1 в триггер долговременной памяти Т2 осуществляется только при срабатывании пускового органа по напряжению нулевой последовательности по переднему фронту сигнала ПО $3U_0$. Поскольку любой разновидности ОЗЗ предшествует пробой изоляции фазы сети на землю, запись информации в триггер долговременной памяти Т2 также произойдет при любой разновидности замыкания на землю. После записи информации в элемент долговременной памяти на выходе Т2 появится сигнал «ОЗЗ – линия» и сработает индикатор НЛ1. Квити́рование (сброс) сигнала «ОЗЗ – линия» осуществляется вручную. Счетчик СТ1 фиксирует число «клевков земли» при дуговых прерывистых ОЗЗ.

4.3.3 Принципы выполнения направленной защиты и токовой защиты нулевой последовательности на основе высших гармоник

4.3.3.1 Структурно-функциональная схема токовой направленной защиты на основе ВГ. Структурно-функциональная схема НЗВГ приведена на рис. 4.14.

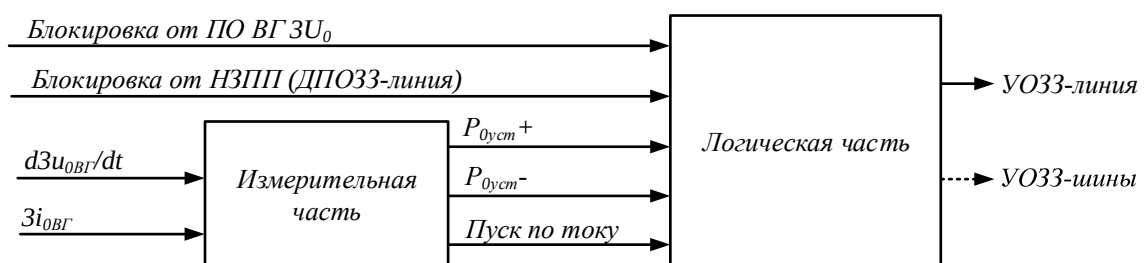


Рисунок 4.14 – Структурно-функциональная схема НЗВГ

Для исключения излишних срабатываний при внешних дуговых ОЗЗ в схеме защиты предусмотрена блокировка ее действия при срабатывании пускового органа по уров-

ню ВГ в напряжении $3U_0$, входящего в состав НЗПП, или (и) от сигнала «ДПОЗЗ – линия», формируемого на выходе блока логики распознавания разновидностей ОЗЗ.

На рис. 4.15 приведена структурно-функциональная схема измерительного органа направления мощности нулевой последовательности ВГ установившегося режима ОЗЗ, на рис. 4.16 – схема логической части НЗВГ.

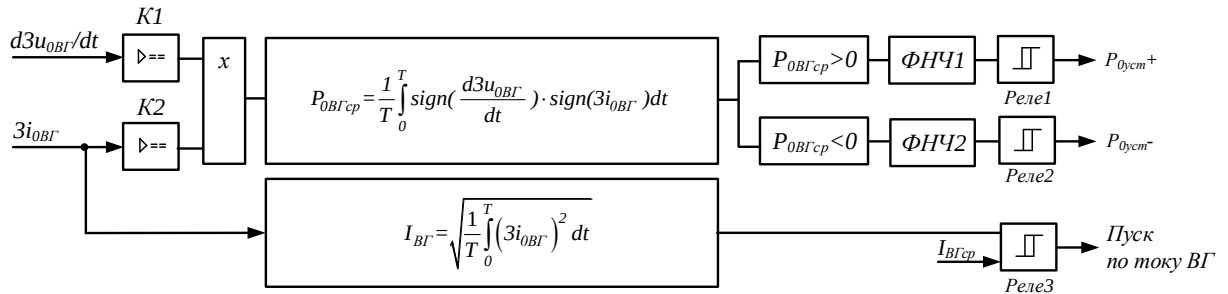


Рисунок 4.15 – Структурно-функциональная схема измерительной части НЗВГ

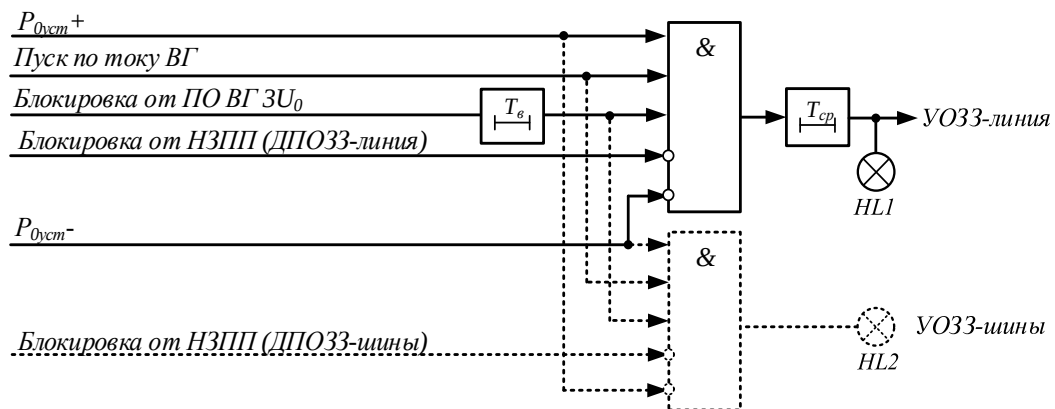


Рисунок 4.16 – Схема логической части НЗВГ

4.3.3.2 Принцип действия НЗВГ. Принцип действия НЗВГ основан на контроле фазных соотношений ВГ тока и производной напряжения нулевой последовательности в защищаемом присоединении. В главе 3 показано, что в диапазоне частот примерно до 650 Гц фазы гармоник первичного тока $3i_0$ поврежденного присоединения и соответствующих гармоник производной первичного напряжения $3u_0$ всегда противоположны, что соответствует положительному направлению реактивной (емкостной) мощности, а для неповрежденного присоединения – совпадают, что соответствует отрицательному направлению реактивной (емкостной) мощности. Измерительный орган направления мощности ВГ в установившемся режиме ОЗЗ выполнен в основном аналогично ИОНМ НЗПП (рис. 4.12) и реализует способ сравнения времени совпадения с временем несовпадения сравниваемых величин. Отличие от НЗПП заключается в меньшем быстродей-

ствии ИОНМ НЗВГ и его более высокой чувствительности по первичному току. Для исключения срабатываний защиты от однократных бросков переходного тока в схему измерительного органа введены «сглаживатели» (ФНЧ1 и ФНЧ2), обеспечивающие нарастание сигнала на его выходе с заданной постоянной времени, определяющей при заданной уставке срабатывания Реле 1 (Реле 2) минимальное время срабатывания защиты. Для повышения отстроенности защиты от переходных процессов при дуговых перемежающихся и прерывистых замыканиях на землю минимальное время срабатывания защиты (как в прямом, так и в обратном направлении) принимается равным 30–50 мс. Кроме органа направления мощности ВГ установившегося режима ОЗЗ, в состав измерительной части НЗВГ входит также измерительный орган тока, задающий ток срабатывания защиты по уровню ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения.

Индикатор HL1 предназначен для сигнализации о наличии в данный момент времени устойчивого ОЗЗ на защищаемой линии. При отрицательном знаке мощности (внешнее ОЗЗ, ОЗЗ «за спиной») появляется непрерывный сигнал на выходе $P_{0уст}$ измерительной части защиты и выходной сигнал «УОЗЗ – шины» на выходе логической части. При внешних устойчивых ОЗЗ предусмотрено только действие на индикатор HL2, предназначенный для сигнализации о наличии в данный момент времени устойчивого внешнего ОЗЗ в контролируемой сети.

4.3.3.3 Принцип выполнения максимальной токовой защиты нулевой последовательности на основе ВГ. Максимальная токовая защита нулевой последовательности на основе ВГ (токовая защита абсолютного замера ВГ) в составе комплексной защиты выполняется на принципе, аналогичном принципу действия устройств защиты типа УСЗ-2/2 и его аналогов, рассмотренному в 1-й главе (п. 1.4.5). В целях повышения устойчивости несрабатываний при внешних дуговых ОЗЗ действие ТЗНПВГ блокируется выходным сигналом пускового органа по уровню ВГ в напряжении $3U_0$ или сигналом «ДПОЗЗ–линия» блока распознавания разновидностей ОЗЗ.

Так как возможности применения функции ТЗНПВГ на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ в значительной степени ограничены нестабильностью уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей, основной областью ее применения являются прежде всего объекты, на которых не предусмотрена установка ТННП. В разделе 4.5 рассматриваются способы повышения эффективности функционирования ТЗНПВГ на указанных объектах.

4.3.4 Принципы выполнения функций токовой и токовой направленной защит нулевой последовательности на основе составляющих рабочей частоты

4.3.4.1 Принципы выполнения ТЗНП. Максимальная токовая защита нулевой последовательности, основанная на использовании составляющих рабочей частоты тока $3I_0$, в составе комплексной защиты предусмотрена прежде всего для использования на объектах кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, на которых не предусмотрена установка ТННП. Применение ТЗНП необходимо для обеспечения непрерывности действия при устойчивых ОЗЗ. Принцип действия ТЗНП и условия ее применимости рассмотрены в главе 1 (п. 1.4.3). В целях повышения устойчивости несрабатываний при внешних дуговых ОЗЗ действие ТЗНП блокируется выходным сигналом пускового органа по уровню ВГ в напряжении $3U_0$ или сигналом «ДПОЗЗ–линия» блока распознавания разновидностей ОЗЗ.

В разделе 4.5 рассматриваются способы повышения эффективности функционирования ТЗНП в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью.

4.3.4.2 Принципы выполнения ТНЗНП. ТНЗНП является основной функцией, обеспечивающей непрерывность действия комплексной многофункциональной защиты при устойчивых ОЗЗ на объектах кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, оборудованных ТННП (прежде всего, ЦП). ТНЗНП в составе функций комплексной многофункциональной защиты может быть выполнена на основе известных принципов, используемых в микроэлектронных устройствах защиты типа ЗЗП-1, ЗЗН или их микропроцессорных аналогов (п. 1.4.4). В целях повышения устойчивости несрабатываний при внешних дуговых ОЗЗ действие ТНЗНП блокируется выходным сигналом пускового органа по уровню ВГ в напряжении $3U_0$ или сигналом «ДПОЗЗ–линия» блока распознавания разновидностей ОЗЗ.

4.3.5 Принципы выполнения блока распознавания разновидностей однофазных замыканий на землю комплексной многофункциональной защиты

4.3.5.1 Способы выполнения блока распознавания разновидностей ОЗЗ. Как показано в главе 3, опасные дуговые перемежающиеся ОЗЗ могут возникать только в

сетях с изолированной нейтралью, следовательно, блок распознавания данной разновидности ОЗЗ необходим прежде всего в комплексных защитах, предназначенных для применения в сетях, работающих с указанным режимом нейтрали. Однако в компенсированных кабельных сетях при больших расстройках компенсации также возможно возникновение многократных повторных пробоев изоляции, сопровождающихся опасными перенапряжениями [26].

Способы выполнения блока распознавания разновидности ОЗЗ зависят от наличия или отсутствия ТННП. При наличии на защищаемом объекте ТННП, обеспечивающих возможность измерения фазных напряжений, может быть применен прямой контроль перенапряжений (раздел 3.6.2), а при их отсутствии – косвенные способы распознавания опасных дуговых ОЗЗ.

4.3.5.2 Алгоритм распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанный на контроле интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги. Структурно-функциональная схема блока распознавания ДПОЗЗ дана на рис. 4.17.

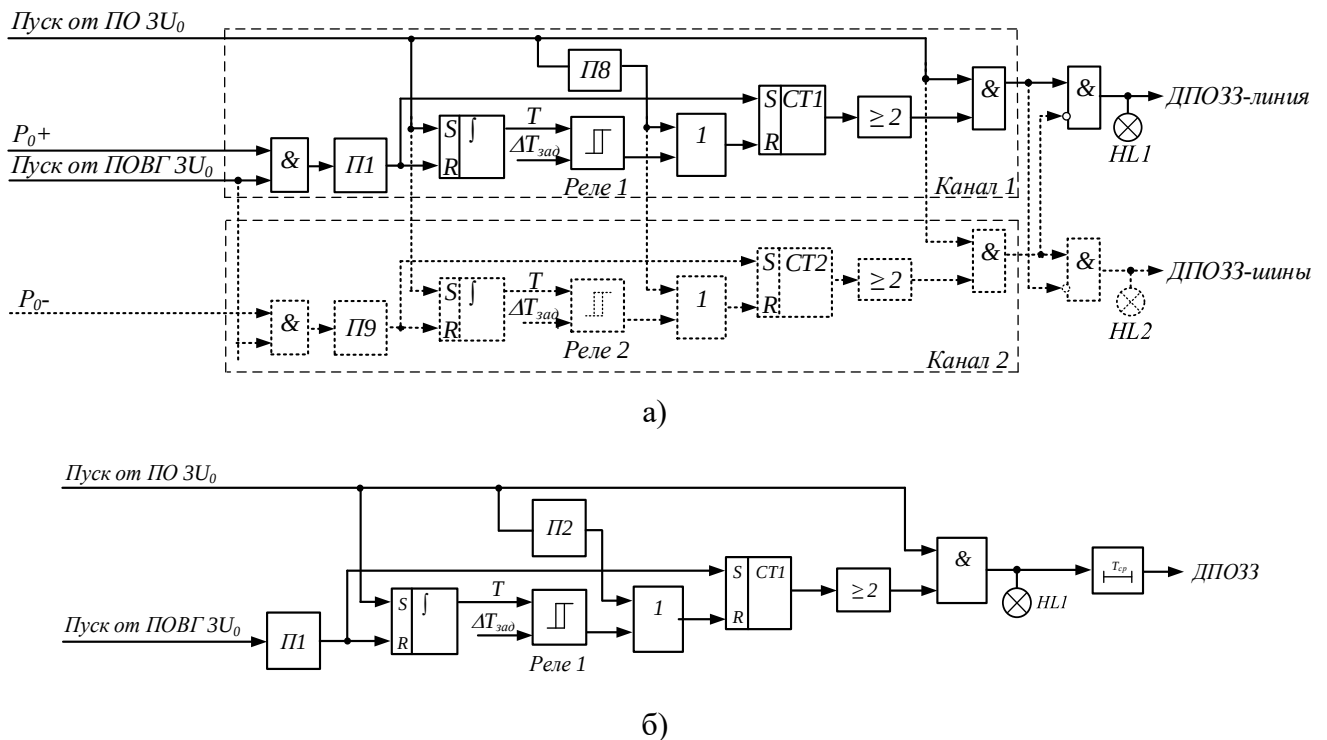


Рисунок 4.17 – Структурно-функциональная схема блока распознавания ДПОЗЗ на основе контроля интервалов времени между повторными пробоями изоляции

Для распознавания дугового перемежающегося ОЗЗ в блоке по рис. 4.17 используется следующий алгоритм. При внутреннем пробое изоляции запуск алгоритма проис-

ходит при наличии одновременно двух сигналов: сигнала от измерительного органа P_0 и сигнала пуска от ПОВГ $3U_0$. По переднему фронту сигнала на выходе схемы перемножения преобразователем П1 формируется кратковременный импульс сброса интегратора (сигнал на выходе интегратора $T = 0$). Одновременно сигналом на выходе преобразователя П1 увеличивается на 1 содержимое счетчика числа импульсов СТ1. При срабатывании пускового органа по напряжению нулевой последовательности и появлении сигнала «Пуск от ПО $3U_0$ » на записывающем входе интегратора появляется сигнал «1», а на его выходе – сигнал, пропорциональный времени от момента сброса интегратора. Если к моменту появления следующего пробоя изоляции выходной сигнал интегратора T меньше уставки максимального реле $\Delta T_{зад}$, Реле 1 не срабатывает, интегратор сбрасывается в исходное состояние, а содержимое счетчика СТ1 увеличивается на 1. Увеличение содержимого счетчика СТ1 до 2 и более может иметь место только, если интервал времени между повторными пробоями меньше заданного значения $\Delta T_{зад}$, т.е. ОЗЗ имеет дуговой перемежающийся характер. Если содержимое счетчика СТ1 больше 2, на выходе элемента сравнения появляется непрерывный сигнал о наличии на защищаемом присоединении дугового перемежающегося ОЗЗ «ДПОЗЗ – линия». Сброс счетчика в исходное состояние и исчезновение на входе РНМПП сигнала «ДПОЗЗ – линия» произойдет только при срабатывании Реле 1, т.е. при интервале времени между пробоями $T \geq \Delta T_{зад}$. Как было показано выше, в кабельных сетях с изолированной нейтралью кратности перенапряжений имеют опасные для сети значения при интервалах между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta T_{зад} \leq 90\text{--}100$ мс (п. 3.6.3), в компенсированных сетях – при $\Delta T_{зад} \leq 30\text{--}50$ мс (п. 3.6.4).

4.3.5.3 Алгоритм распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанный на контроле уровня ВГ в напряжении $3U_0$. В п. 3.6.5 главы 3 показано, что в кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью, интервалам времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta t \leq 90\text{--}100$ мс соответствует общий относительный уровень ВГ в напряжении $3U_0$ $U_{ВГ\Sigma^*} \geq 0,25$ (рис. 3.19). Для реализации данного способа контроля опасности для сети дуговых ОЗЗ используется пусковой орган, аналогичный рассмотренному выше ПОВГ $3U_0$, с уставкой срабатывания $U_{ср.ВГ} \approx 0,25U_{ном}$. Структурно-функциональная схема блока распознавания ДПОЗЗ с использованием данного способа приведена на рис. 4.18.

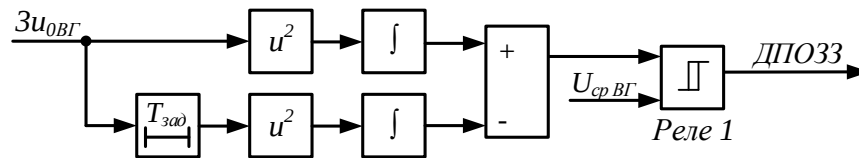


Рисунок 4.18 – Структурно-функциональная схема блока распознавания ДПОЗЗ на основе контроля общего уровня ВГ в напряжении $3U_0$

Схема блока распознавания по рис. 4.18 основана на вычислении среднеквадратичного значения ВГ в напряжении $3U_0$ на интервале времени $\Delta T_{зад}$, равному максимальной величине интервалов времени между повторными пробоями изоляции сети. На заданном интервале времени среднеквадратичное значение напряжения $3U_0$ при ДПОЗЗ превышает уставку $U_{cp \cdot ВГ}$, что приводит к срабатыванию максимального реле напряжения Реле 1 (рис. 4.18), сигнал на выходе которого свидетельствует о возникновении ДПОЗЗ в сети.

Рассмотренный алгоритм не может быть использован в компенсированных кабельных сетях (см. п. 3.6.6 главы 3), а также на объектах кабельных сетей с изолированной нейтралью, не оснащенных ТННП.

4.3.5.4 Алгоритм распознавания опасных дуговых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, основанный на контроле относительного уровня ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения. Как было показано выше (см. п. 3.6.7 главы 3), в кабельных сетях, работающих с изолированной нейтралью, при интервалах времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta t \leq 90\text{--}100$ мс в поврежденном присоединении отношение общего уровня ВГ к емкостной составляющей промышленной частоты в токе $3I_0$ больше 1 (рис. 3.20). Структурно-функциональная схема блока распознавания ДПОЗЗ на основе контроля уровня ВГ в токе $3I_0$ приведена на рис. 4.19.

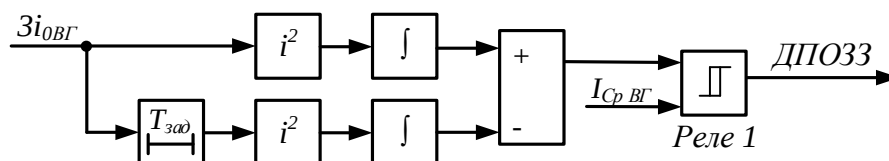


Рисунок 4.19 – Структурно-функциональная схема блока распознавания ДПОЗЗ на основе контроля общего уровня ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения

Принцип действия блока по рис. 4.19 аналогичен принципу работы схемы по рис. 4.18.

Преимущество данного способа заключается в том, что он не требует наличия цепей напряжения, однако может применяться только в сетях с изолированной нейтралью и не обладает достаточной точностью, как способ определения разновидности ОЗЗ по рис. 4.17.

4.4 Исследование на имитационных моделях эффективности функционирования комплексной защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ

4.4.1 Объем и методика исследований. При анализе эффективности функционирования и соответствия функциональным требованиям по п. 4.1 комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ исследовалась эффективность функционирования элементов защиты и их взаимодействия, а именно разработанных защит НЗПП и НЗВГ и блока логики распознавания разновидностей ОЗЗ. Исследования проводились на комплексных имитационных моделях «Кабельная сеть 6–10 кВ – комплексная защита от ОЗЗ» (рис. 4.20), разработанных в среде моделирования Matlab.

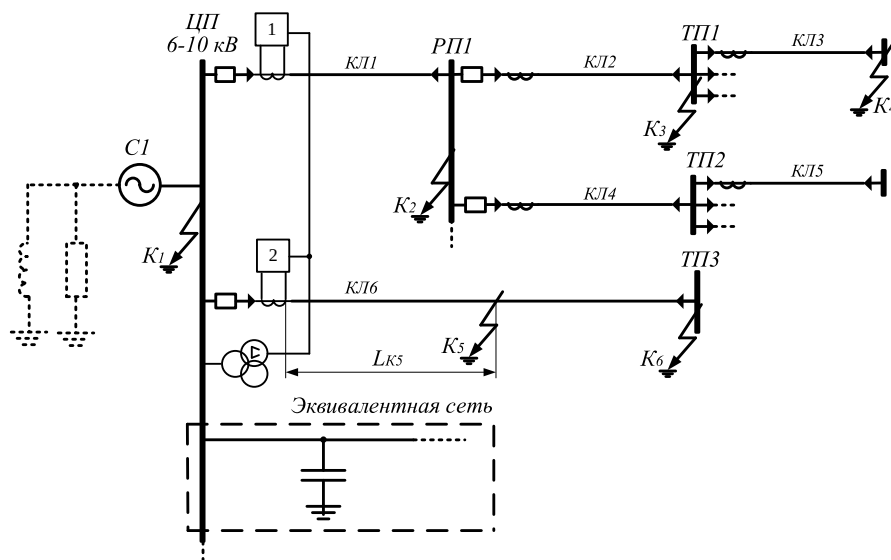


Рисунок 4.20 – Схема расчетной модели кабельной сети 6–10 кВ

Модель по рис. 4.20 представляет собой эквивалентированную схему по рис. 3.1, состоящую из системы, питающей шины ЦП 6–10 кВ, к которым подключены эквивалентная сеть 6–10 кВ и два присоединения – с разветвленной структурой и без ответвлений.

При исследованиях на комплексной модели (рис. 4.20) варьировался суммарный емкостный ток сети, режим заземления нейтрали сети (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через ДГР и комбинированное заземление нейтрали через ДГР и резистор), а также вид, место и удаленности места ОЗЗ (L_K). Работа функций комплексной защиты исследовалась при следующих разновидностях ОЗЗ: УОЗЗ, КрОЗЗ, ДПрОЗЗ, ДПОЗЗ (по теориям W. Petersen и J.F. Peters, J. Slepian с различными интервалами времени между повторными пробоями изоляции кабельной линии), а также наиболее тяжелые для действия алгоритма защиты сложные ОЗЗ (например, рис. 4.21). ОЗЗ по

рис. 4.21 представляет собой процесс развития пробоя изоляции – сначала редкие «клевки земли», затем возникновение ДПОЗЗ, повторные зажигания заземляющей дуги которого со временем учащаются ($\Delta t = 80\text{--}10\text{ мс}$); со временем ДПОЗЗ переходит в УОЗЗ.

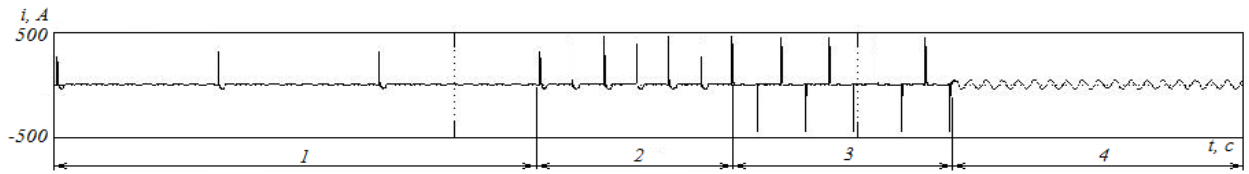


Рисунок 4.21 – Осциллограмма тока сложного ОЗЗ, где участок 1 – ДПрОЗЗ с $\Delta t = 200\text{ мс}$;

2 – ДПОЗЗ по теории J.F. Peters, J. Slepian с $\Delta t = 40\text{ мс}$;

3 – ДПОЗЗ по теории W. Petersen с $\Delta t = 30\text{ мс}$, 4 – УОЗЗ

4.4.2 Исследования функций комплексной защиты для сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью. В качестве примера исследования эффективности работы функций комплексной защиты на рис. 4.22–4.25 приведены временные осциллограммы, иллюстрирующие величины, подаваемые на вход основных функциональных узлов и элементов, и сигналы на выходе комплексной защиты от ОЗЗ при внутреннем и при внешнем сложном ОЗЗ (рис. 4.21) в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью.

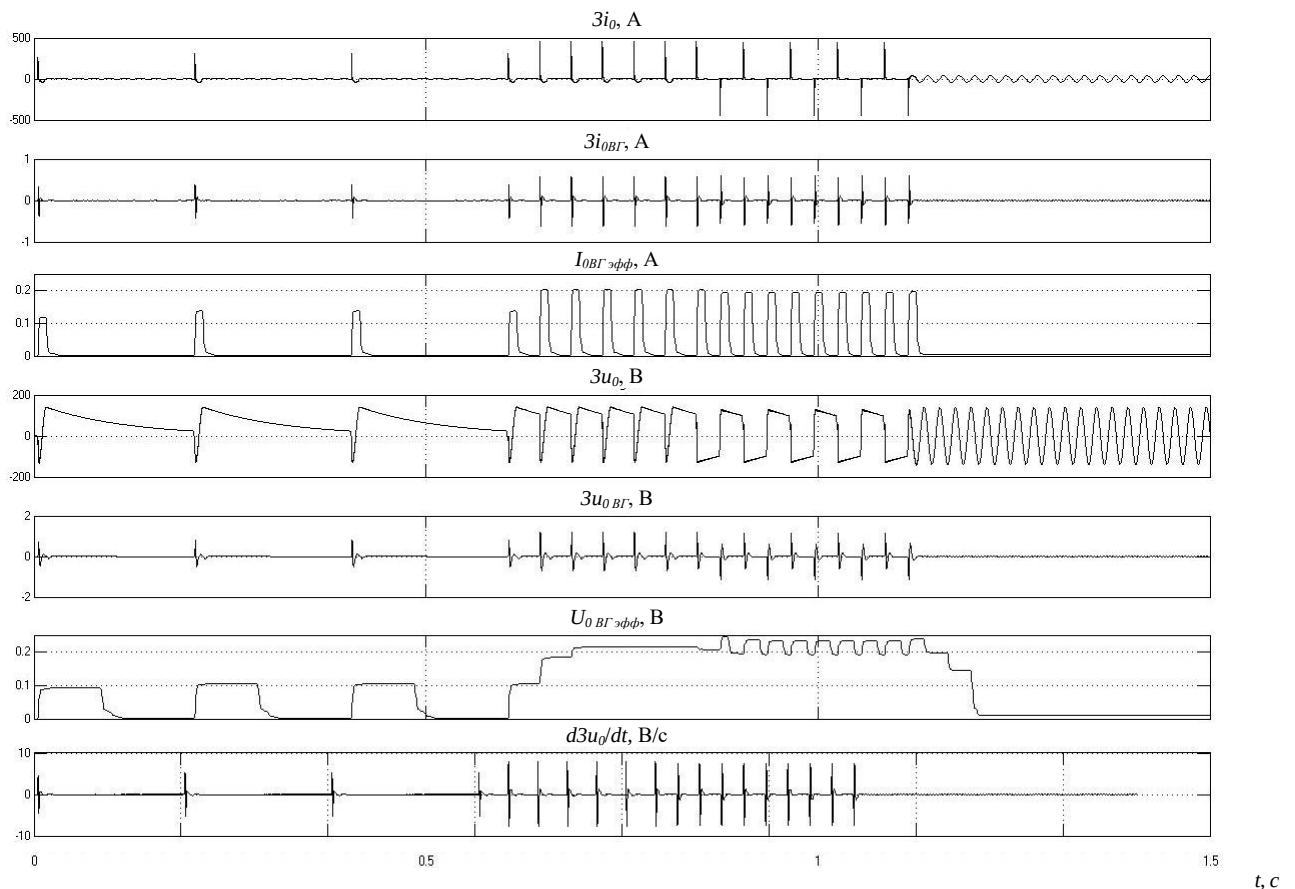
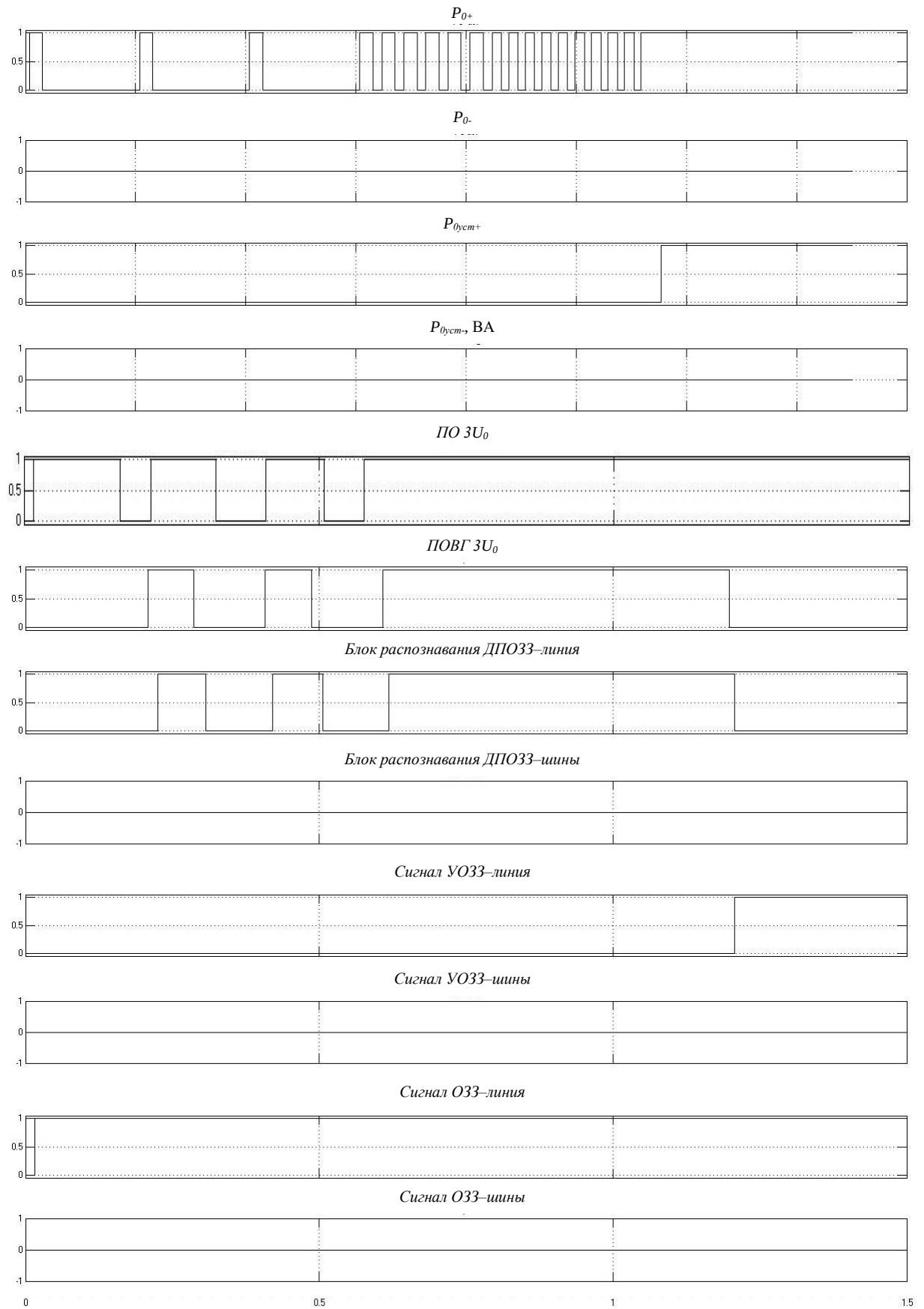
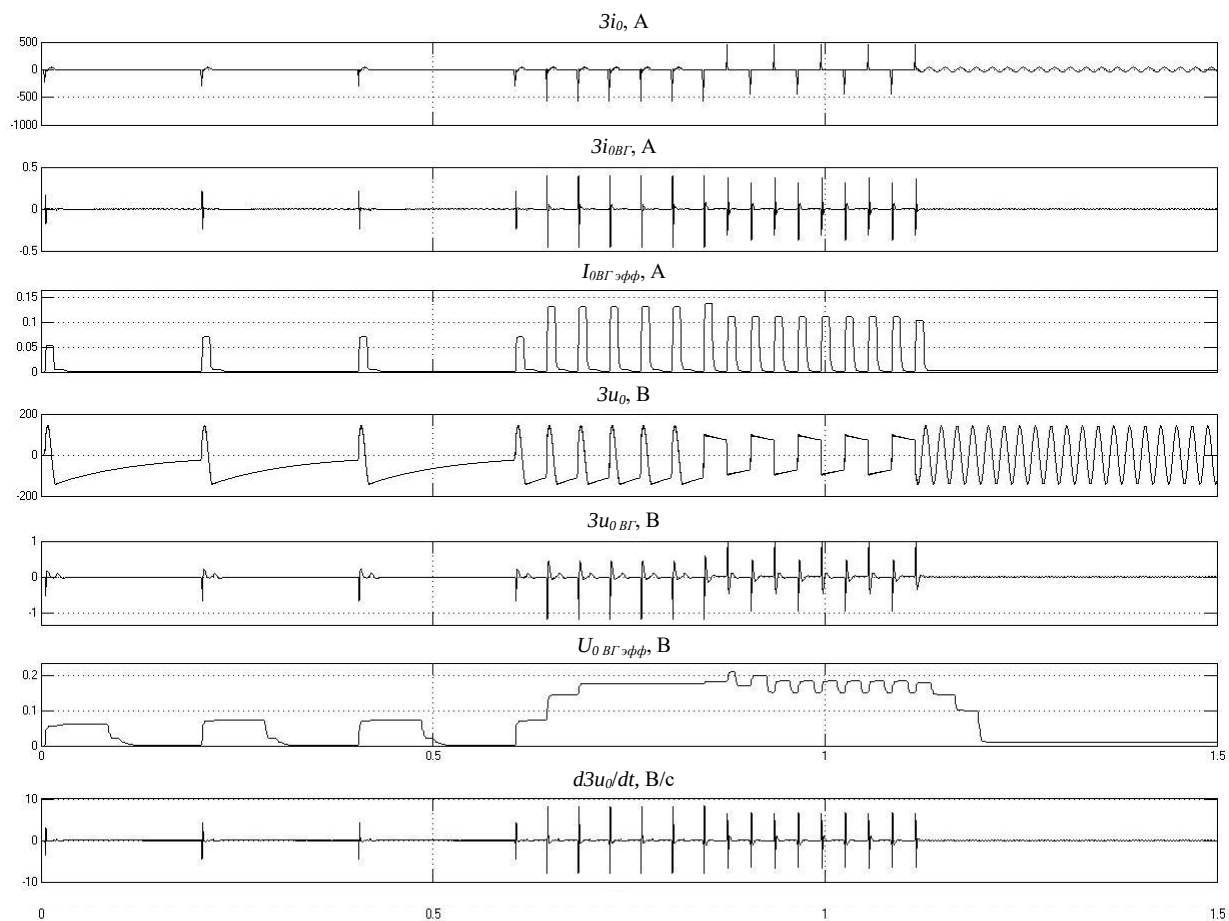


Рисунок 4.22 – Осциллограммы информационных величин комплексной multifunctional защиты при внутреннем сложном ОЗЗ в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью



t, c

Рисунок 4.23 – Осциллограммы выходных величин на выходе комплексной многофункциональной защиты при внутреннем сложном ОЗЗ в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью



t, c

Рисунок 4.24 – Осциллограммы информационных величин комплексной
многофункциональной защиты при внешнем сложном ОЗЗ
в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью

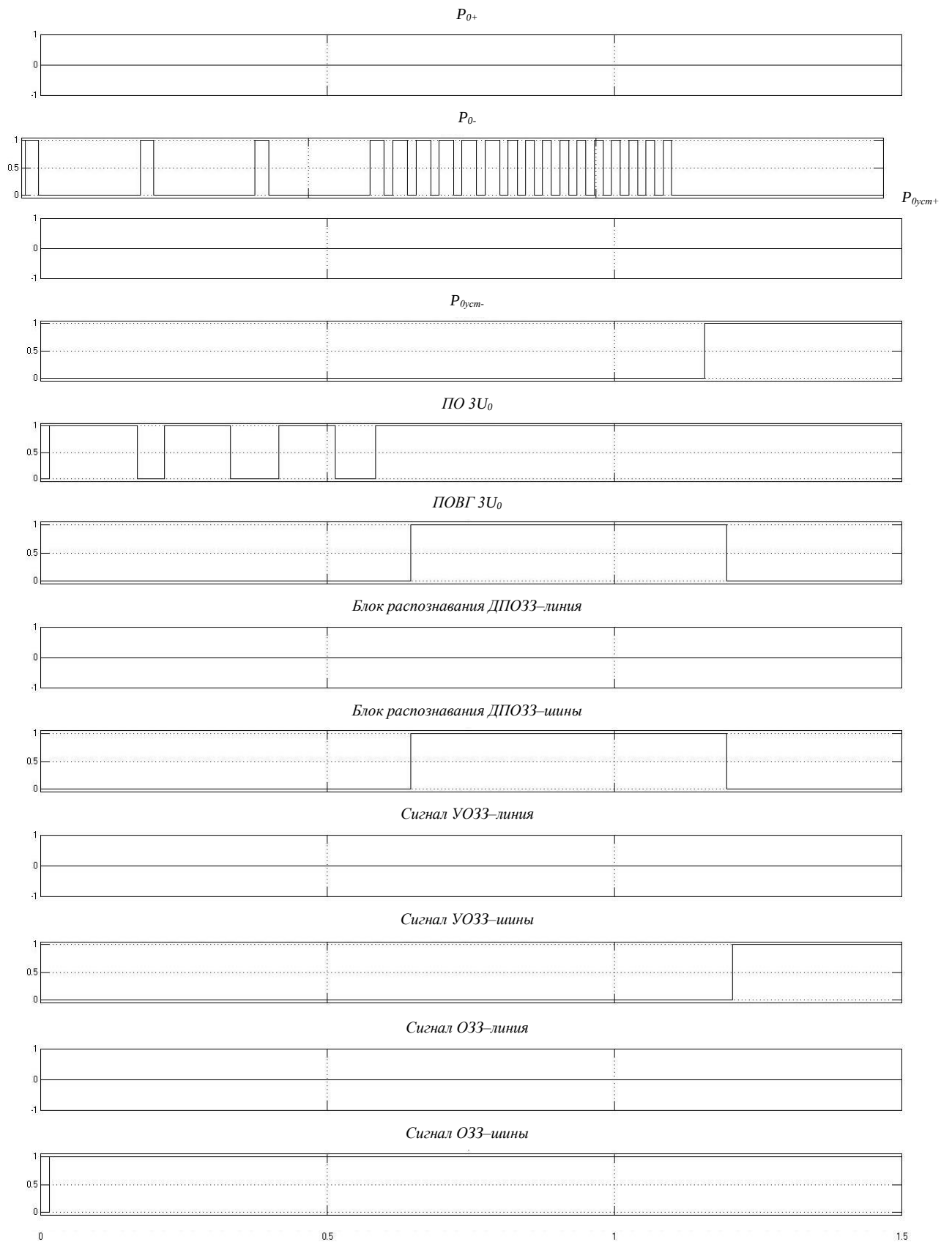
 t, c

Рисунок 4.25 – Осциллограммы выходных величин комплексной
многофункциональной защиты при внешнем сложном ОЗЗ
в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью

Осциллограммы на рис. 4.22–4.25 подтверждают эффективность разработанных принципов выполнения и алгоритмов функционирования комплексной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

Как было показано в разделе 3.6.1, в кабельных сетях 6–10 кВ с высокоомным заземлением нейтрали дуговые ОЗЗ не сопровождаются опасными для сети перенапряжениями, и функция распознавания видов ОЗЗ не требуется. В таких сетях защита от ОЗЗ должна срабатывать только при внутренних УОЗЗ и осуществлять контроль внутренних «клевков земли» и тока в поврежденном присоединении. Поэтому исследования работы комплексной защиты в сетях с высокоомным заземлением нейтрали в данной работе не приведены.

4.4.3 Комплексная многофункциональная защита для сети с резонансным заземлением нейтрали через ДГР и с комбинированным заземлением нейтрали. Исследование эффективности функционирования комплексной защиты для сети с резонансным заземлением нейтрали через ДГР и с комбинированным заземлением нейтрали проводилось согласно методике по п. 4.4.1. На рис. 4.26–4.29 приведены временные осциллограммы, иллюстрирующие входные величины, подаваемые на вход основных функциональных узлов и элементов, и сигналы на выходе защиты при внутреннем и при внешнем сложном ОЗЗ по рис. 4.21.

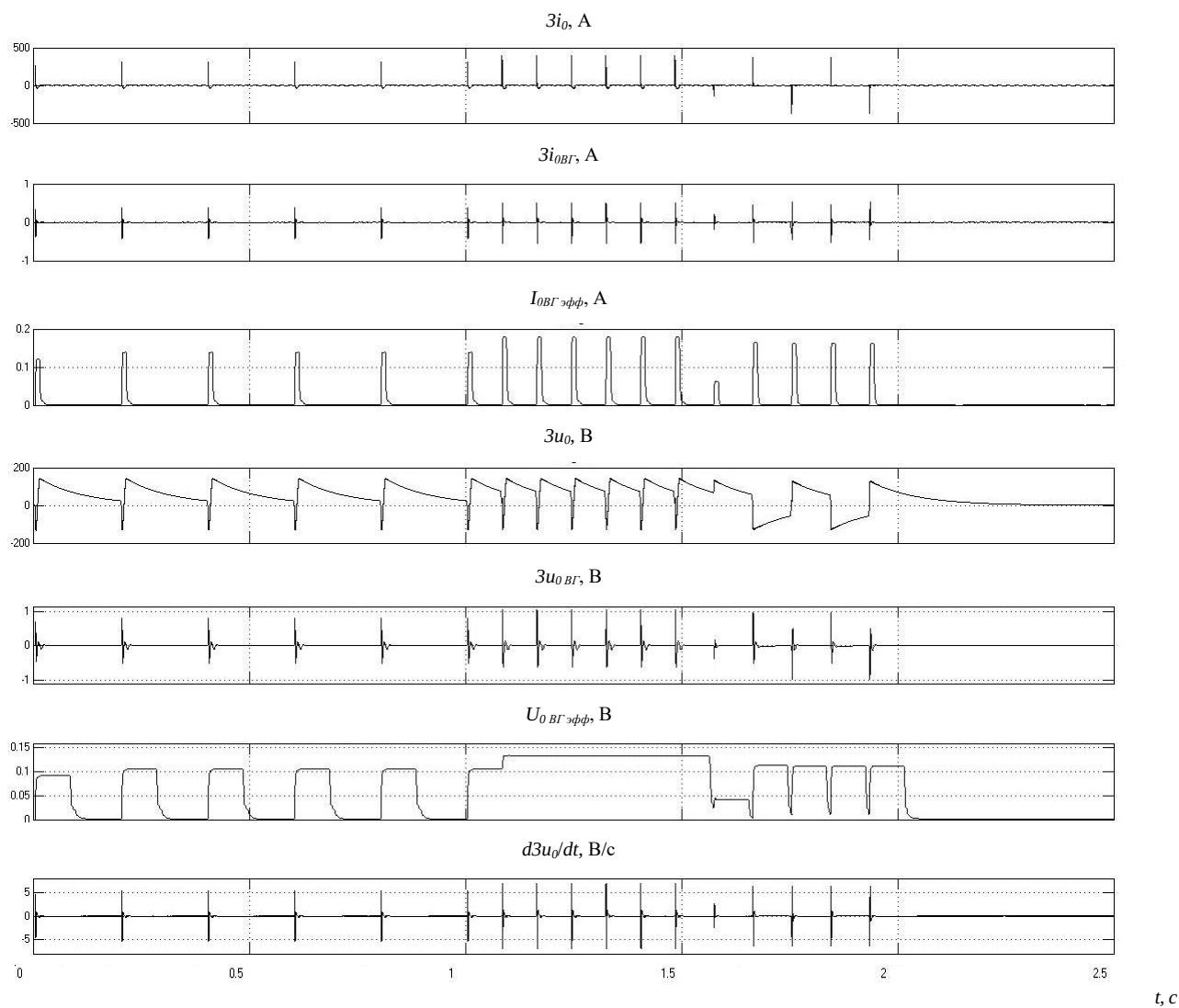
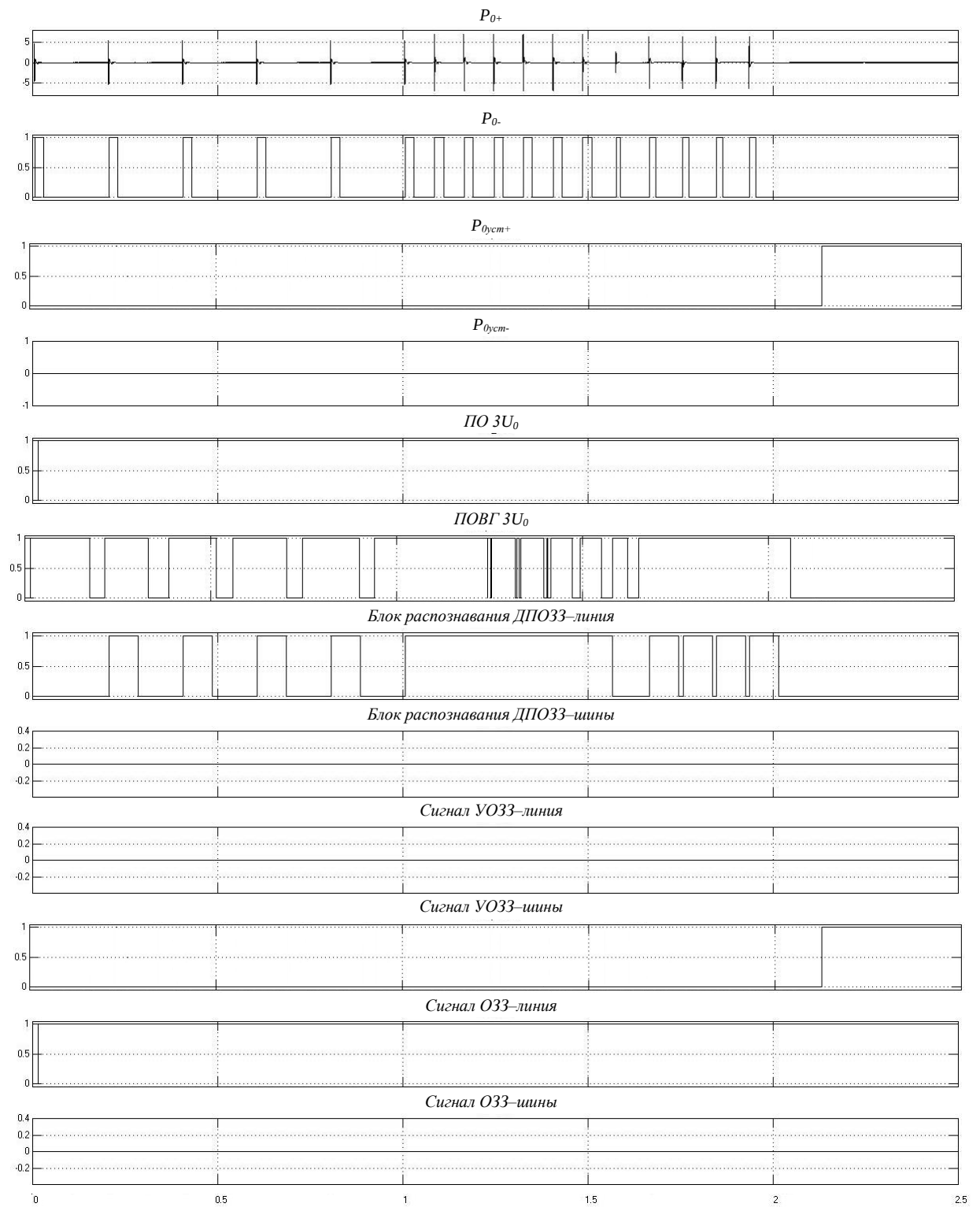


Рисунок 4.26 – Осциллограммы информационных величин комплексной
многофункциональной защиты при внутреннем сложном ОЗЗ
в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ



t, c

Рисунок 4.27 – Осциллограммы выходных величин на выходе комплексной
многофункциональной защиты при внутреннем сложном ОЗЗ
в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ

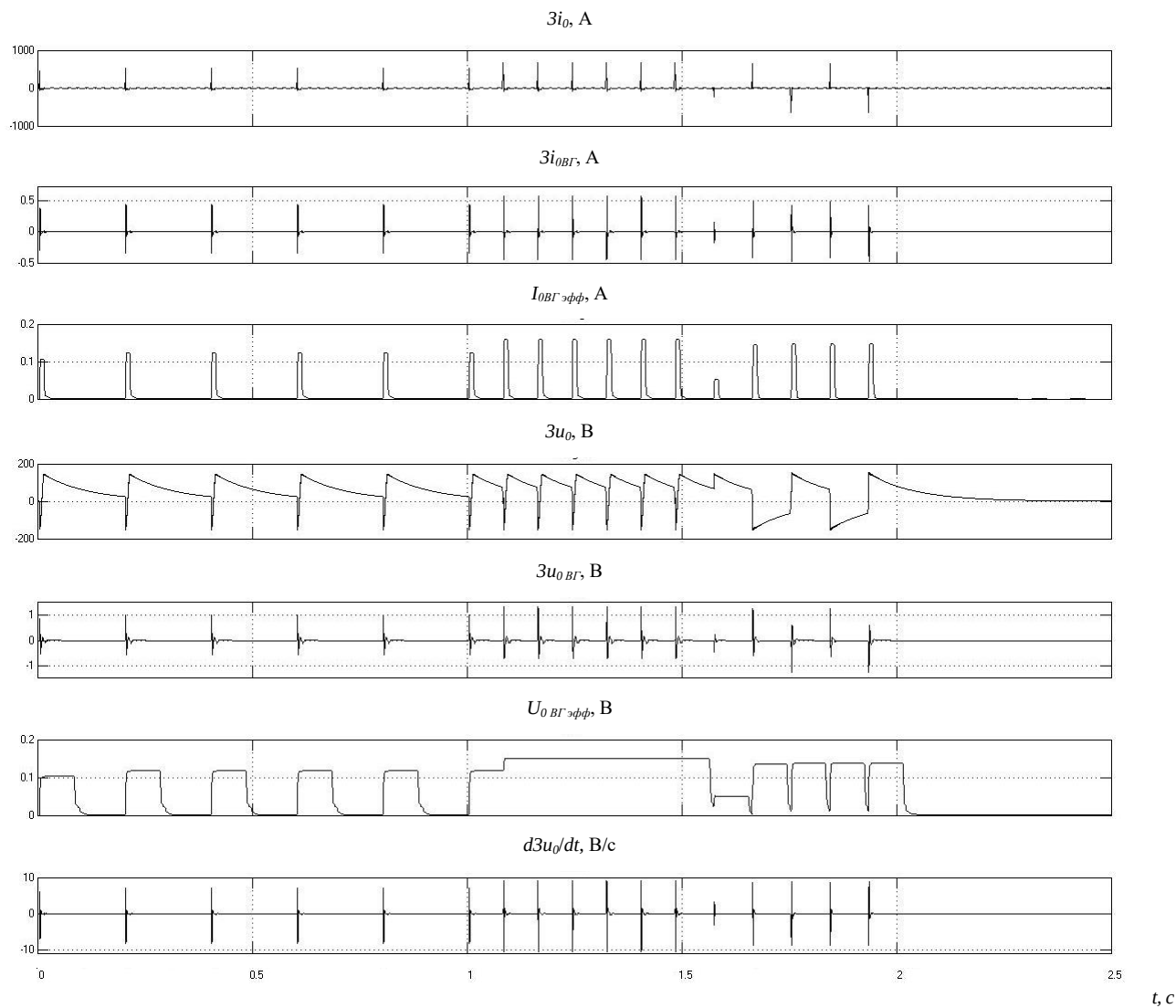
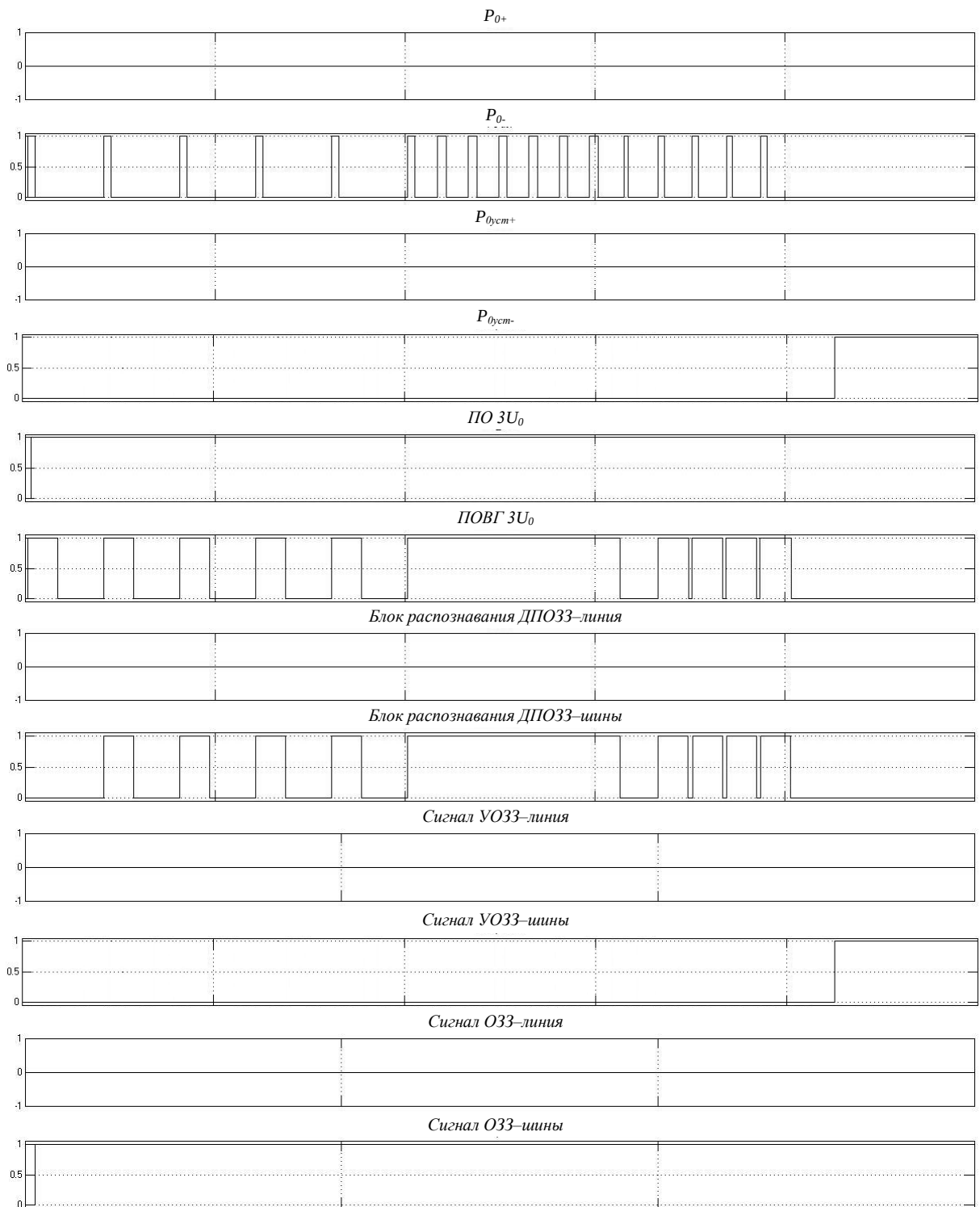


Рисунок 4.28 – Осциллограммы информационных величин комплексной
многофункциональной защиты при внешнем сложном ОЗЗ
в компенсированной кабельной сети 6–10 кВ



t, C

Рисунок 4.29 – Осциллограммы выходных величин комплексной
многофункциональной защиты при внешнем сложном ОЗЗ
в кабельной сети 6–10 кВ с изолированной нейтралью

Из рис. 4.22–4.29 можно видеть, что эффективность функционирования разработанной комплексной защиты обеспечивается при всех разновидностях ОЗЗ (ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ, УОЗЗ, КрОЗЗ) как в компенсированных, так и в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

4.5 Способы повышения технического совершенства токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих 50 Гц и высших гармоник

4.5.1 Способы повышения технического совершенства токовых защит нулевой последовательности, основанных на использовании составляющих рабочей частоты 50 Гц

4.5.1.1 Двухступенчатая ТЗНП с блокировкой чувствительной ступени при дуговых перемежающихся и прерывистых замыканиях на землю по отношению общего уровня высших гармоник в токе нулевой последовательности к составляющей 50 Гц. Структурно-функциональная схема двухступенчатой ТЗНП приведена на рис. 4.30.

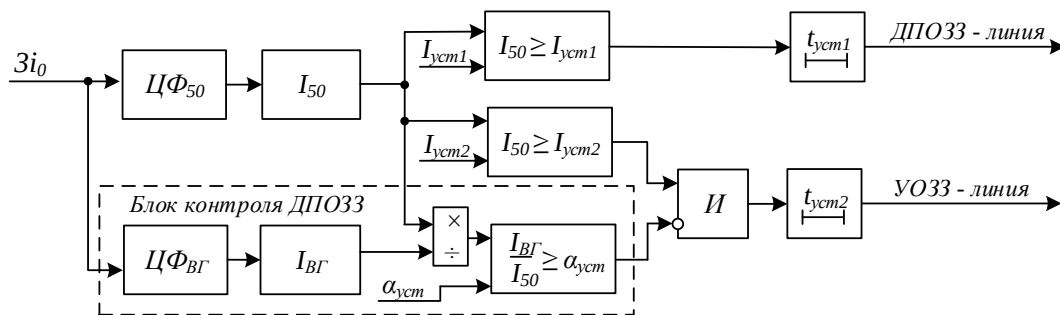


Рисунок 4.30 – Структурно-функциональная схема двухступенчатой ТЗНП с блокировкой чувствительной ступени при ДПОЗЗ по отношению $I_{ВГ}/I_{50}$ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения

На схеме по рис. 4.30: ЦФ₅₀ – цифровой фильтр, выделяющий из тока $3I_0$ составляющую 50 Гц; I_{50} – блок, вычисляющий среднеквадратичное (эффективное) значение тока; $I_{50} \geq I_{уст}$ – измерительный орган тока (ИОТ); $t_{уст}$ – орган выдержки времени; $I_{50} \geq I_{уст1}$, $I_{50} \geq I_{уст2}$, $I_{ВГ}/I_{50} \geq \alpha_{уст}$ – измерительные органы тока, И – логический элемент «И».

Разработанная ТЗНП содержит две ступени – «грубую» с уставкой $I_{уст.1}$ и «чувствительную» с уставкой $I_{уст.2}$. Первая «грубая» ступень предназначена для действия при наиболее опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ. Вторая чувствительная ступень предназначена для действия только при устойчивых ОЗЗ и блокируется при ДПОЗЗ. Блокировка чувствительной ступени осуществляется «Блоком контроля ДПОЗЗ» по соотношению общего уровня ВГ $I_{ВГ}$ к уровню составляющей рабочей частоты I_{50} в токе $3I_0$ защищаемого присоединения.

4.5.1.2 Двухступенчатая ТЗНП с блокировкой чувствительной ступени при дуговых перемежающихся ОЗЗ с минимальными интервалами между повторными зажиганиями заземляющей дуги. Структурно-функциональная схема ТЗНП приведена на рис. 4.31.

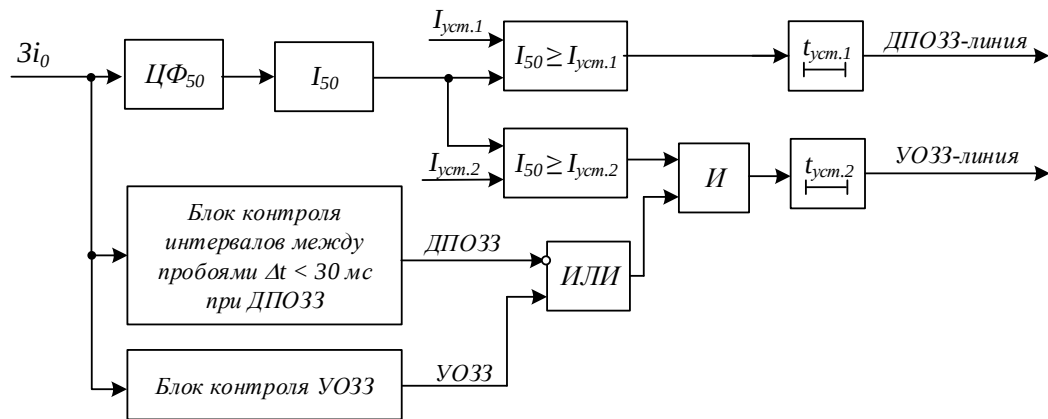


Рисунок 4.31 – Структурно-функциональная схема двухступенчатой ТЗНП с блокировкой чувствительной ступени при интервалах между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta t < 30$ мс

На схеме рис. 4.31: ЦФ₅₀, I₅₀, t_{уст.}, I₅₀ ≥ I_{уст.1}, I₅₀ ≥ I_{уст.2}, И – то же, что на рис. 4.30; ИЛИ – логический элемент «ИЛИ».

Как и рассмотренный в п. 4.5.1.1 вариант, ТЗНП содержит две ступени – «грубую» с уставкой I_{уст.1} и «чувствительную» с уставкой I_{уст.2}. Первая «грубая» ступень предназначена для действия при наиболее для сети и поврежденного элемента дуговых перемежающихся ОЗЗ, протекающих в соответствии с моделями W. Petersen (интервалы времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги $\Delta t = 10$ мс) или теории J.F. Peters, J. Slepian ($\Delta t = 20$ мс), но при достаточной чувствительности может срабатывать и при ДПОЗЗ со значения интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции, большими 20 мс.

В отличие от варианта двухступенчатой ТЗНП, рассмотренного в п. 4.5.1.1, вторая чувствительная ступень предназначена для действия не только при устойчивых ОЗЗ, но и при ДПОЗЗ, характеризующихся интервалами времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги, большими 10 ... 20 мс.

С учетом этого действие 2-й чувствительной ступени разрешается при наличии разрешающего сигнала от блока, контролирующего устойчивый характер ОЗЗ, и при отсутствии блокирующего сигнала от блока, контролирующего интервалы времени между

повторными зажиганиями заземляющей дуги (при $\Delta t > 20$ мс). Снятие блокировки чувствительной ступени при $\Delta t > 20$ мс обеспечивает не только повышение чувствительности второй ступени при устойчивых ОЗЗ, но и возможность ее срабатываний при ДПОЗЗ с большей эффективностью (чувствительностью), чем первая грубая ступень.

Для контроля устойчивого характера ОЗЗ в разработанном варианте ТЗНП использовался контроль соотношения между среднеквадратичным и средневыпрямленным значением тока $3i_o$ защищаемого присоединения

$$\frac{3I_{0\text{эфф}}}{3I_{0\text{ср}}} > K_\phi = 1,11. \quad (4.5)$$

В установившемся режиме ОЗЗ отношение $3I_{0\text{эфф}} / 3I_{0\text{ср}} = K_\phi = 1,11$, при ДПОЗЗ $3I_{0\text{эфф}} / 3I_{0\text{ср}} > 1,11$. Возможно применение и других способов распознавания устойчивого и дугового прерывистого характера ОЗЗ, например, по соотношению I_{BG}/I_{50} .

4.5.1.3 Трехступенчатая адаптивная ТЗНП с автоматическим изменением уставки «адаптивной» ступени по току срабатывания в зависимости от величины интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги. Структурно-функциональная схема трехступенчатой ТЗНП приведена на рис. 4.32.

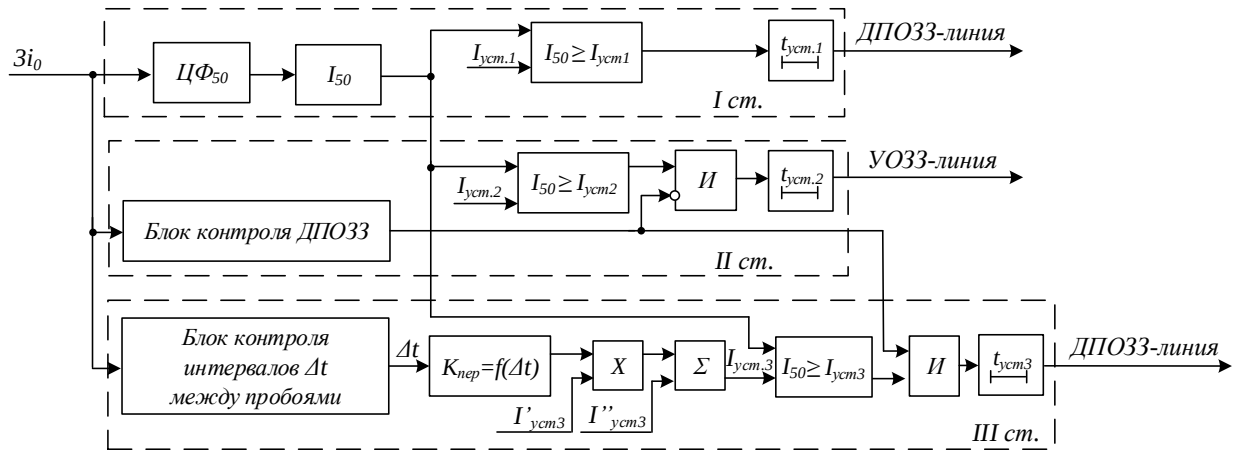


Рисунок 4.32 – Структурно-функциональная схема трехступенчатой адаптивной ТЗНП с автоматическим изменением уставки «адаптивной» ступени по току срабатывания в зависимости от интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги

ТЗНП содержит три ступени – «грубую» с уставкой $I_{уст.1}$, «чувствительную» с уставкой $I_{уст.2}$ и «адаптивную» ступень с уставкой $I_{уст.3}$.

Первая («грубая») ступень с уставкой $I_{уст.1}$ предназначена для максимально быстрого срабатывания при наиболее опасных для сети и поврежденного элемента ДПОЗЗ, прежде всего, при ДПОЗЗ по теории W. Petersen, что необходимо при выполнении за-

щиты с действием на отключение. «Грубая» ступень, как правило, может обеспечить достаточную чувствительность только внутренних ДПОЗЗ с малыми интервалами времени Δt между повторными пробоями изоляции.

Вторая («чувствительная») ступень с уставкой $I_{уст.2}$ предназначена для действия при устойчивых ОЗЗ и имеет в этих режимах максимальную чувствительность.

Действие «адаптивной» ступени разрешается только при ДПОЗЗ. Основными функциональными элементами адаптивной ступени являются блок контроля интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги и блок вычисления коэффициента броска переходного тока в зависимости от текущих значения Δt в соответствии с выражением:

$$K_{пер} = K_{отс} \cdot f(\Delta t), \quad (4.6)$$

где $f(\Delta t)$ – функция, аппроксимирующая зависимость $K_{пер}$ от величины интервалов между повторными пробоями изоляции при дуговых прерывистых ОЗЗ (рис. 3.20, глава 3); $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности аппроксимации.

Зависимость $K_{пер}$ от величины Δt по рис. 3.20 с приемлемой точностью может быть аппроксимирована уравнением

$$K_{пер} = f(\Delta t) \approx 55,193 \Delta t^{-0,8377} \quad (4.7)$$

или задана таблично.

4.5.2 Совершенствование максимальной токовой защиты на основе высших гармоник

Максимальная двухступенчатая токовая защита на основе высших гармоник.
Целью выполнения максимальной токовой защиты абсолютного замера ВГ двухступенчатой является обеспечение возможности ее работы не только в установившемся режиме ОЗЗ, но и при дуговых прерывистых ОЗЗ, представляющих опасность для всей электрически связанной сети. Структурно-функциональная схема двухступенчатой ТЗНПВГ приведена на рис. 4.33.

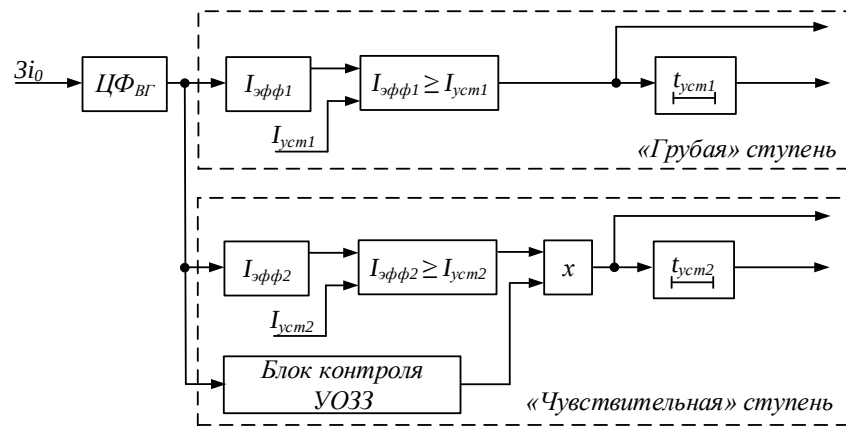


Рисунок 4.33 – Структурно-функциональная схема максимальной двухступенчатой токовой защиты абсолютного замера ВГ

На рис. 4.33: ЦФ_{ВГ} – цифровой фильтр ВГ (с полосой пропускания 150–1000 Гц); $I_{эфф1}$ – блок, вычисляющий среднеквадратичное значение тока ВГ на интервале усреднения, равном максимальному учитываемому интервалу времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t_{\max}$ при дуговых прерывистых и перемежающихся ОЗЗ; $I_{эфф2}$ – блок, вычисляющий среднеквадратичное значение тока ВГ на интервале усреднения, равном периоду T_{50} (или половине периода $T_{50}/2$) рабочей частоты в установившемся режиме ОЗЗ; $I_{эфф1} \geq I_{уст1}$ – измерительный орган тока «грубой» ступени с уставкой на срабатывание $I_{уст1}$; $I_{эфф2} \geq I_{уст2}$ – измерительный орган тока «чувствительной» ступени с уставкой на срабатывание $I_{уст2}$; $t_{уст1}$ – орган выдержки времени «грубой» ступени; $t_{уст2}$ – орган выдержки времени «чувствительной» ступени.

Для предотвращения излишних срабатываний при ДПОЗЗ действие чувствительной ступени разрешается только при срабатывании специального блока, распознающего устойчивый характер замыкания на землю («Блок контроля УОЗЗ»). Для выполнения такого блока может быть использован контроль интервалов времени Δt между импульсами входного тока: при дуговых прерывистых, включая перемежающиеся, ОЗЗ Δt , как правило, имеет значений от 10 и более миллисекунд, при устойчивых ОЗЗ $\Delta t \approx 0$.

Первая ступень защиты («грубая») предназначена для действия при дуговых перемежающихся и прерывистых ОЗЗ с интервалами между повторными зажиганиями заземляющей дуги Δt до ~100 мс (при $\Delta t > 100$ мс дуговые прерывистые ОЗЗ не представляют опасности для сети). Вторая («чувствительная») ступень предназначена для действия при устойчивых замыканиях на землю.

4.6 Методики выбора уставок усовершенствованных токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих промышленной частоты и защит на основе высших гармоник

4.6.1 Методики выбора уставок усовершенствованных токовых защит нулевой последовательности, основанных на использовании составляющих 50 Гц

4.6.1.1 Методика выбора уставок ТЗНП. Первичный ток срабатывания ТЗНП $I_{0\text{с.з}}$ в кабельных сетях 6–10 кВ независимо от режима заземления их нейтрали выбирается из условия отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения при внешних ОЗЗ:

$$I_{0\text{с.з}} \geq K_{\text{отс}} K_{\text{пер}} I_{C\text{собс}}, \quad (4.8)$$

где $K_{\text{отс}} = 1,2\text{--}1,3$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности ИОТ, ошибки расчета $I_{C\text{собс}}$ и запас; $I_{C\text{собс}}$ – собственный емкостный ток ОЗЗ защищаемого присоединения; $K_{\text{пер}}$ – коэффициент, учитывающий влияние переходных токов на значение воздействующей величины ИОТ ТЗНП при ДПОЗЗ (называемый часто коэффициентом броска емкостного тока).

В [199] показано, что при определенных условиях ток небаланса кабельных ТТНП может оказывать влияние на устойчивость несрабатываний ТЗНП при внешних ОЗЗ. При учете тока небаланса кабельного ТТНП первичный ток срабатывания ТЗНП необходимо выбирать из двух следующих расчетных условий:

1) отстройки от внешнего ДПОЗЗ с учетом небаланса ФТНП, обусловленного током нагрузочного режима:

$$I_{0\text{с.з.}} \geq K'_{\text{отс}} K_{\text{пер}} I_{C\text{собс}} + K''_{\text{отс}} I_{\text{нб нагр}}, \quad (4.9)$$

где $K'_{\text{отс}} = 1,2\text{--}1,3$; $K''_{\text{отс}} = 1,5\text{--}2$ (учитывая приближенный характер определения $I_{\text{нб}}$ для кабельных ТТНП); $I_{\text{нб нагр}}$ – ток небаланса ТТНП в нагрузочном режиме.

2) отстройки от внешнего устойчивого ОЗЗ с учетом небаланса ФТНП, в максимальных расчетных режимах (пуска или самозапуска электродвигателя, КЗ за трансформатором 6–10/0,4 кВ на защищаемом присоединении)

$$I_{0\text{с.з.}} \geq K'_{\text{отс}} I_{C\text{собс}} + K''_{\text{отс}} I_{\text{нб макс}}, \quad (4.10)$$

где $K'_{отс} = 1,2-1,3$; $K''_{отс} = 1,5-2$ [12]; $I_{нб\ макс}$ – ток небаланса ТТНП в максимальном расчетном режиме.

При выборе $I_{0\ с.з}$ защиты по второму условию считается маловероятным наложение режима, обуславливающего максимальный ток небаланса, на режим дугового перемежающегося ОЗЗ ($K_{пер} = 1$).

Вычисленное значение по (4.8) – (4.10) $I_{0\ с.з}$ должно удовлетворять условию:

$$I_{0\ с.з} \geq I_{0\ с.з.\ мин}, \quad (4.11)$$

где $I_{0\ с.з.\ мин}$ – минимальный ток срабатывания ТЗНП, определяемый техническими характеристиками реле тока, ТТНП и схемой соединения их вторичных обмоток с реле [например, 31].

4.6.1.2 Методика выбора уставок двухступенчатой ТЗНП с блокировкой чувствительной ступени при дуговых перемежающихся и прерывистых замыканиях на землю по отношению общего уровня высших гармоник в токе нулевой последовательности к составляющей 50 Гц. Основным расчетным условием для выбора уставки «грубой» ступени $I_{уст.1}$ является условие отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения внешних ОЗЗ по выражениям (4.8) и (4.9). Для кабельных сетей с изолированной нейтралью $K_{пер}$ в (4.8) принимается равным 3,0–3,5, для кабельных сетей с высокоомным заземлением нейтрали $K_{пер} \approx 1,2-1,3$.

Уставка по току срабатывания $I_{уст.2}$ «чувствительной» ступени, блокируемой при ДПОЗЗ, выбирается только из условия отстройки от внешних устойчивых ОЗЗ с учетом тока небаланса ТТНП по выражению (4.9).

Уставка порогового элемента ПЭ блока контроля ДПОЗЗ $\alpha_{уст}$ выбирается из условия отстройки от максимально возможного в кабельных сетях 6–10 кВ относительного уровня ВГ $I_{ВГ}/I_{50}$ в токе $3I_0$ при устойчивых ОЗЗ:

$$\alpha_{уст} \geq K_{отс} \left(\frac{I_{ВГ}}{I_{50}} \right)_{\max.уст} = K_{отс} \left(\frac{I_{ВГ}}{I_C} \right)_{\max.уст} = K_{отс} \alpha_{\max.уст}, \quad (4.12)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности оценки максимально возможного относительного уровня ВГ в токе $3I_0$ устойчивого ОЗЗ (может быть принят равным 1,2); $\alpha_{\max.уст}$ – максимальный относительный уровень ВГ в емкостном токе I_C защищаемого присоединения при внешних и внутренних устойчивых ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

В главе 2 показано, что при устойчивых ОЗЗ максимальный относительный уровень ВГ в токе устойчивого ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ $\alpha_{\max.уст}$ не превышает значений ~0,4–0,65. Как показывают исследования, выполненные в главе 3, при ДПОЗЗ да-

же при достаточно больших интервалах Δt (до 100 и более мс) между повторными зажиганиями заземляющей дуги относительный уровень ВГ в токе $3I_0$ как неповрежденного, так и поврежденного присоединения I_{BI}/I_{50} всегда больше 1.

4.6.1.3 Методика выбора уставок двухступенчатой ТЗНП с блокировкой чувствительной ступени при дуговых перемежающихся ОЗЗ с минимальными интервалами между повторными зажиганиями заземляющей дуги. Первая «грубая» ступень выполняется с уставкой по току срабатывания $I_{уст.1}$, выбираемой из условия отстройки от собственного емкостного тока защищаемого присоединения при внешних ДПОЗЗ и устойчивых ОЗЗ по выражениям (4.8) и (4.9).

Уставка по току срабатывания «чувствительной» ступени $I_{уст.2}$, блокируемой при ДПОЗЗ с $\Delta t < 20$ мс, выбирается только из условия отстройки от внешних устойчивых ОЗЗ с учетом тока небаланса ТНП по выражению (4.9).

4.6.1.4 Методика выбора уставок трехступенчатой адаптивной ТЗНП. «Грубая» ступень имеет уставку $I_{уст.1}$, выбираемую по (4.8) и (4.9). Уставка по току срабатывания «чувствительной» ступени $I_{уст.2}$ выбирается по выражению (4.9).

Уставка «адаптивной» ступени должна формироваться и автоматически изменяется в процессе ДПОЗЗ в соответствии с выражением (4.8):

$$I_{уст.3} \geq K'_{отс} \cdot K_{пер}(\Delta t) \cdot I_{С\ собс} + K''_{отс} I_{нб\ нагр}. \quad (4.13)$$

Из рис. 3.20 можно видеть, что при больших интервалах времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги значение $K_{пер}$, обеспечивающее отстройку защиты от внешних повреждений, может быть меньше 1. Поэтому адаптивная ступень может иметь ток срабатывания меньше, чем чувствительная ступень, что и обеспечивает повышение чувствительности защиты при ДПОЗЗ, характеризующихся достаточно большими интервалами Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги.

4.6.2 Методики выбора уставок токовых защит на основе высших гармоник

4.6.2.1 Методика выбора уставок ТЗНПВГ. Уставка по току срабатывания ТЗНПВГ выбирается из условия обеспечения несрабатываний при внешних устойчивых

ОЗЗ и максимальном уровне гармоник в токе ОЗЗ контролируемой сети (и соответственно, в токе нулевой последовательности $3I_{0i}$ защищаемого i -того присоединения):

$$I_{с.з.i} \geq K_{отс} \alpha_{макс} I_{Ci}, \quad (4.14)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки; I_{Ci} – собственный емкостный ток i -го присоединения; $\alpha_{макс}$ – максимально возможный относительный уровень ВГ рабочего диапазона устройства защиты в токе ОЗЗ (в о.е.) в контролируемой сети (соответственно, в токе I_{Ci}), анализ которого приведен в главе 2.

Вычисленное по (4.14) значение $I_{с.з.i}$ должно удовлетворять условию:

$$I_{с.з.i} \geq I_{с.з.мин}, \quad (4.15)$$

где $I_{с.з.мин}$ – минимальный ток срабатывания ТЗНПВГ, определяемый техническими характеристиками устройства защиты.

Коэффициент отстройки $K_{отс}$ в (4.14), учитывающий влияние погрешностей функционирования (погрешностей расчета уровня ВГ, ТТНП, ИОТ защиты и др.) на устойчивость несрабатываний при внешних ОЗЗ, для токовых защит на основе ВГ рекомендуется принимать равным 1,5–2 [137].

4.6.2.2 Методика выбора уставок двухступенчатой ТЗНПВГ. Уставка срабатывания «грубой» ступени защиты выбирается из условия отстройки от максимального общего уровня высших гармонических составляющих в токе $3I_0$ защищаемого i -го присоединения при внешних ДПОЗЗ по выражению:

$$I_{1уст} = K_{отс} I_{ВГ макс} = K_{отс} K_{бр. ВГ} I_{Ci}, \quad (4.16)$$

где $K_{отс} = 1,2$ – коэффициент отстройки; $I_{ВГ макс}$ – максимальный уровень ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения при внешних ДПОЗЗ; $K_{бр. ВГ}$ – коэффициент, учитывающий соотношение между уровнем ВГ в токе $3I_0$ в переходных режимах ДПОЗЗ и I_{Ci} ; I_{Ci} – собственный емкостный ток i -го присоединения.

Минимальное собственное время срабатывания «грубой» ступени (без учета задержки на срабатывание $t_{уст1}$) определяется временем усреднения при вычислении среднеквадратичного значения высших гармонических составляющих и при максимальных значениях Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги может составлять ~200 мс.

Поскольку действие «чувствительной» ступени разрешается только при срабатывании блока, распознающего устойчивый характер ОЗЗ, уставка срабатывания «чувствительной» ступени $I_{уст2}$ выбирается аналогично уставке рассмотренной выше одноступенчатой ТЗНПВГ по выражениям (4.14) и (4.15).

4.7 Разработка технических требований и технического задания на ОНР комплексной защиты

В рамках работ по теме «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ», выполненных по договору с ООО НПП «ЭКРА», разработано техническое задание на ОНР, включающее следующие разделы:

1. Состав и назначение функций комплексной защиты от однофазных замыканий на землю, реализуемых в микропроцессорном терминале релейной защиты и автоматики для кабельных сетей 6–10 кВ; технические требования к основным функциональным элементам и узлам. В данном разделе рассматриваются вновь разработанные функции НЗПП, НЗВГ, а также усовершенствованные (модифицированные) функции ТЗНП и ТЗНПВГ.

2. Формирователи аналоговых сигналов тока и напряжения: основные технические параметры ФАСТ и ФАСН и их частотные характеристики. Расчеты параметров ФАСТ и ФАСН выполнены по условиям обеспечения термической устойчивости в установившихся и в переходных режимах, а также по максимально и минимально допустимым значениям напряжения на входе АЦП. Диапазоны изменения параметров датчиков тока и напряжения нулевой последовательности обоснованы на основе аналитических расчетов и исследований на имитационных моделях кабельных сетей с различными величинами суммарного емкостного тока и различными режимами заземления нейтрали.

3. Основные требования, предъявляемые к АЦП и технические данные исполнений АЦП, удовлетворяющих названным требованиям.

4. Структурно-функциональная схема комплексной защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

5. Требования к характеристикам цифрового фильтра высших гармонических составляющих и способы их реализации.

6. Структурно-функциональная схема, технические требования, параметры настройки (шаг настройки, диапазон значений, значение по умолчанию) и уставки пускового органа по максимальному напряжению $3U_0$. В разделе приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу ПО $3U_0$ при различных разновидностях ОЗЗ в различных режимах.

7. Структурно-функциональная схема, технические требования, параметры настройки и уставки пускового органа по максимальному уровню высших гармоник в

напряжении $3U_0$. В разделе приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу ПОВГ $3U_0$ при различных разновидностях ОЗЗ в различных режимах.

8. Структурно-функциональная схема НЗПП: описание принципа действия и алгоритма функционирования измерительного органа и логической части защиты, уставки и параметры настройки функциональных блоков и элементов (диапазон уставок, шаг уставки, значения по умолчанию). В данном разделе приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу НЗПП в различных режимах при различных разновидностях ОЗЗ.

9. Структурно-функциональная схема НЗВГ: описание принципа действия и алгоритма функционирования измерительного органа и логической части защиты, уставки и параметры настройки функциональных блоков и элементов. В данном разделе приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу НЗВГ в различных режимах при различных разновидностях ОЗЗ.

Техническое задание на ОКР содержит общие функциональные требования, общие и специальные технические требования к комплексной защите от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ [200–206].

Разработанное техническое задание на ОКР использовалось при разработке и успешном выполнении макетного и опытного образцов комплексной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ, о чем свидетельствует Акт внедрения результатов исследований (Приложение А).

4.8 Выводы по главе 4

4.8.1 Сформулированы основные функциональные требования к комплексной многофункциональной защите от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ.

4.8.2 С учетом требований по п. 4.8.1 разработаны структурно-функциональные схемы комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

4.8.3 Для реализации структурно-функциональных схем комплексной многофункциональной защиты по п. 4.8.2 разработаны блоки, реализующие функции направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов, направленной защиты

на основе ВГ и распознавания разновидностей ОЗЗ. Кроме указанных функций в комплексной многофункциональной защите предусмотрено также применение блоков, реализующих функции ТЗНП, ТНЗНП и ТЗНПВГ, широко применяемых в микропроцессорных терминалах РЗА линий 6–35 кВ.

4.8.4 Определены требования к частотным характеристикам формирователей аналоговых сигналов тока и напряжения, цифровых фильтров и АЦП. Показано, что необходимым условием обеспечения непрерывности действия НЗПП на интервале времени существования переходного процесса является согласование частотных характеристик каналов тока и напряжения.

4.8.5 Разработаны принципы выполнения и алгоритм функционирования основных узлов и элементов НЗПП: измерительного органа направления мощности нулевой последовательности, пускового органа максимального напряжения $3U_0$, пускового органа по напряжению ВГ $3U_0$, логической части.

4.8.6 Разработаны принципы выполнения и алгоритм функционирования измерительного органа направления мощности и логической части НЗВГ.

4.8.7 Разработаны принципы выполнения блока распознавания разновидностей ОЗЗ – ДПОЗЗ, ДПрОЗЗ, УОЗЗ и КрОЗЗ. Для сетей с изолированной нейтралью разработаны алгоритмы, реализующие способы косвенного распознавания наиболее опасных ДПОЗЗ, основанные на контроле интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, уровня ВГ в напряжении $3U_0$, уровня ВГ в токе $3I_0$ защищаемого присоединения. Для компенсированных сетей приемлемое решение дает только первый из указанных способов.

4.8.8 Исследования, проведенные на имитационных моделях «Кабельная сеть 6–10 кВ – комплексное устройство защиты», выполненных в среде Matlab, подтвердили эффективность разработанных принципов выполнения и алгоритмов функционирования комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ.

4.8.9 Предложены способы повышения технического совершенства ТЗНП и ТЗНПВГ, основанные на использовании двух ступеней защиты, «грубой» и «чувствительной», обеспечивающих возможность фиксации ДПОЗЗ и повышение чувствительности при УОЗЗ.

4.8.10 Предложен способ выполнения «адаптивной» ТЗНП с автоматическим изменением уставки по току срабатывания в зависимости от величины интервалов времени

между повторными зажиганиями заземляющей дуги, действующей при всех разновидностях ОЗЗ.

4.8.11 Модифицированы методики выбора уставок по току срабатывания существующих исполнений ТЗНП и ТЗНПВГ и разработаны методики выбора уставок для усовершенствованных защит по пп. 4.8.9–4.8.10.

4.8.12 Для выполнения комплексной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ в рамках работы с ООО НПП «ЭКРА» разработано техническое задание на ОКР, на основе которого изготовлены и протестированы макетный и опытный образцы защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ (Приложение А).

Основные результаты исследований данной главы отражены в публикациях и отчетах о НИР [94–97, 99–101, 103, 105, 200–206].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа известных принципов выполнения и исполнений устройств защиты от ОЗЗ и эффективности их работы в кабельных сетях 6–10 кВ предложен комплексный многофункциональный подход к повышению их технического совершенства, предполагающий способность распознавания всех разновидностей ОЗЗ в сетях с любыми режимами заземления нейтрали для автоматической оценки степени опасности повреждения и выбора способа действия защиты (сигнал или отключение), основанный на использовании нескольких различных функций защиты от данного вида повреждений, взаимодействующих между собой для повышения эффективности функционирования каждой из них и защиты в целом.

2. Разработаны основные требования к комплексной многофункциональной защите от ОЗЗ индивидуального исполнения, обеспечивающую распознавание всех разновидностей ОЗЗ, и обоснован состав образующих ее функций для кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

3. С использованием имитационных моделей и аналитических решений на основе упрощенных схем замещения решены задачи оценки минимального и максимального уровней высших гармоник в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения, а также оценки степени неустойчивости уровня ВГ в зависимости от различных влияющих факторов для определения требований к чувствительности, уточнения условий и области применения максимальных токовых защит на основе ВГ.

4. На основе исследований на имитационных моделях переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ определены характеристики частотных спектров переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях, обоснован рабочий диапазон частот и требования к чувствительности направленной защиты, основанной на способе непрерывного контроля фазных соотношений электрических величин переходного процесса.

5. Предложены способы косвенного контроля перенапряжений в кабельных сетях с изолированной нейтралью, основанные на измерении интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, уровня высших гармоник в напряжении и

токе нулевой последовательности, позволяющие распознавать опасные и неопасные для сети дуговые замыкания на землю.

6. Разработаны структурно-функциональные схемы комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, принципы выполнения и алгоритмы функционирования ее основных функциональных узлов: направленной защиты непрерывного действия на основе переходных процессов, направленной защиты на основе высших гармоник, блока, обеспечивающего распознавание опасных и неопасных разновидностей ОЗЗ.

7. Предложены способы повышения технического совершенства токовых защит нулевой последовательности, входящих в состав комплексной многофункциональной защиты: двухступенчатая защита с «грубой» и «чувствительной» ступенями, последняя из которых блокируется при дуговых замыканиях на землю, а также адаптивной токовой защиты с автоматическим изменением уставки по току срабатывания в зависимости от величины интервалов времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги, действующей при всех разновидностях ОЗЗ.

8. Разработаны методики выбора уставок по току срабатывания существующих исполнений токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих промышленной частоты и высших гармоник и усовершенствованных защит по п. 7.

9. Для выполнения комплексной защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ в рамках работы с ООО НПП «ЭКРА» разработано техническое задание на ОКР, на основе которого изготовлен и протестирован опытный образец комплексной многофункциональной защиты от ОЗЗ, установленный в эксплуатацию в кабельных сетях г. Чебоксары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Обердорфер, Г. Замыкания на землю и борьба с ними / Г. Обердорфер. – М.: Энергоиздат, 1932. – 202 с.
3. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
4. Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова Думка, 1985. – 264 с.
5. Беляков, Н.Н. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях / Н.Н. Беляков // Электрические станции. – 1953. – № 6. – С. 40-43.
6. Шалыт, Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях / Г.М. Шалыт // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – С. 77-97.
7. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
8. 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. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / Шуин Владимир Александрович. – М.: ВНИИЭ, 1994. – 523 с.
9. Кадомская, К.П. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К.П. Кадомская, А.Г. Овсянников, В.А. Сахно // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48-51.
10. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.
11. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
12. Борухман, В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию / В.А. Борухман // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 20-22.
13. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

14. Самойлович, И.С. Режимы нейтрали электрических сетей карьеров / И.С. Самойлович. – М.: Недра, 1976. – 126 с.
15. Назаров, В.В. Оптимизация режима нейтрали распределительных сетей с малыми токами замыкания на землю / В.В. Назаров // Энергетик. – 1978. – № 7. – С. 28–30.
16. Сирота, И.М. Заземление нейтрали через активное сопротивление в некомпенсированных сетях 6–35 кВ / И.М. Сирота, В.В. Назаров, В.В. Масляник // Техническая электродинамика. – 1980. – № 5. – С. 84–91.
17. Вайнштейн, Р.А. Режимы нейтрали в электрических системах: уч. пособие / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головкин, Н.В. Коломиец. – Томск: ТПИ, 1981. – 79 с.
18. 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.
19. 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.
20. Циркуляр Ц-01-97. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС. Методические указания по повышению надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков (частичное заземление нейтрали) – М: Атомэнергопроект, 1997. – 16 с.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Лисицын, Н.В. К обоснованию выбора режима заземления нейтрали / Н.В. Лисицын // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 22–25.
25. Долгополов, А.Г. О режимах заземления нейтрали и защите от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / А.Г. Долгополов // Энергетик. – 2000. – № 2. – С. 20–24.

26. Халилов, Ф.Х. 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, 2002. – 268 с.
27. Сирота, И.М. Защита от замыканий на землю в электрических сетях / И.М. Сирота. – Киев: АН УССР, 1955. – 208 с.
28. Кискачи, В.М. Защита от однофазных замыканий на землю ЗЗП-1 (описание, наладка, эксплуатация) / В.М. Кискачи. – М.: Энергия, 1972. – 73 с.
29. Алексеев, В.С. Реле защиты / В.С. Алексеев, Г.П. Варганов, Б.И. Панфилов, Р.З. Розенблюм. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
30. Гельфанд, Я.С. Релейная защита электрических сетей. 2-е изд. / Я.С. Гельфанд. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
31. Шуин, В.А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
32. Кискачи, В.В. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6–10 кВ с различным режимом заземления нейтрали типа ЗЗН / В.В. Кискачи. – М.: ИПКГосслужбы, 2001. – 63 с.
33. Шабад, М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6–35 кВ: конспект лекций / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2002. – 51 с.
34. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. Petersen, W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss / W. Petersen. – ETZ, 1917. – Н. 47, 48.

39. Peters, J.F. Voltage Induced by Areign Grounds / J.F. Peters, J. Slepian // Tr. AIEE. – 1928. Apr. – P. 478.
40. 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.
41. 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. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
42. 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: Ивановск. гос. энерг. ун-т, 2012. – 176 с.
43. 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.
44. Дударев, Л.Е. Комплексная защита от замыканий на землю / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электрические станции. – 1981. – № 7. – С. 59–61.
45. 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.
46. Neugebauer, H. Определение места кратковременного замыкания на землю при помощи электронного реле / H. Neugebauer // Энергетическое обозрение. – 1938. – № 11. – С. 10–20.
47. Попов, И.Н. О принципах выполнения защиты от замыканий на землю, основанной на использовании переходных процессов / И.Н. Попов // Электричество.- 1962. – № 2. – С. 14–19.
48. 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. / H. Pundt. – TU Dresden, 1963.
49. Сирота, И.М. О принципах выполнения защиты от замыканий на землю в компенсированных сетях / И.М. Сирота // Автоматизация и релейная защита электрических систем. – Киев: Наукова Думка. – 1966. – С. 100–119.

50. Gegner, L. Elektronisches Erdschlussrelays TRER zur selektiver Erdschlusserfassung / L. Gegner // Elektro-Apparate Mitteilungen. – 1967. – № 1. – С. 14–17.
51. Борухман, В.А. Центральное устройство селективной сигнализации замыканий на землю типа «Земля» / В.А. Борухман, В.И. Иоэльсон // Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. Вып 35. – М.: Энергия. – 1968. – С. 316–324.
52. 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.
53. 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.
54. Лебедев, О.В. О защите от замыканий на землю компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ с использованием принципа сравнения амплитуд переходных токов / О.В. Лебедев, В.А. Шуин // Электричество. – 1973. – № 12. – С. 12–17.
55. 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.
56. Соколова, Г.В. Защита от замыканий на землю ИЗС / Г.В. Соколова // Электрические станции. – 1984. – № 1. – С. 59–62.
57. Попов, И.Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И.Н. Попов, В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
58. Шуин, В.А. Централизованное направленное устройство сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов / В.А. Шуин, А.В. Гусенков, А.И. Дроздов // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 53–57.
59. Шуин, В.А. Устройства сигнализации и защиты от однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях / В.А. Шуин, А.В. Гусенков, А.Ю. Мурзин и др. // Энергетическое строительство. – 1993 – № 10. – С. 35–39.
60. Шуин, В.А. Устройство типа «Спектр» для селективной защиты от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков, А.Ю. Мурзин // Тр. ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново. – 1997. – С. 200–203.
61. Лачугин, В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю / В.Ф. Лачугин // Энергетик. – 1997. – № 9. – С. 21.

62. Шуин, В.А. Режимы заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, основанные на использовании переходных процессов, в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, А.В. Гусенков // Вестник ИГЭУ. Вып. 1 – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2001. – С. 45–51.

63. Микропроцессорное устройство импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ «ТОР 110-ИЗН» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ic-bresler.ru/produkty/6-35_kv/ustroystvo_impulsnoy_zaschity_ot_zamykaniy_na_zemlyu_vozdushnyh_i_kabelnyh_liniy_6-35kv_tor_110_izn-01/.

64. Дьяконов, В.П. Matlab 6: Учебный курс / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.

65. Дьяконов, В.П. Simulink 4. Специальный справочник / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.

66. Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

67. PSCAD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hvdc.ca/pscad/>.

68. ATPDesigner: Design and Simulation of Electrical Power Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://atpdesigner.de/>.

69. RTDS Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rtds.com/>.

70. 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, Ивановск. гос. энерг. ун-т, 2012. – 212 с.

71. Сирота, И.М. Свободные емкостные токи замыкания на землю в сетях малыми токами замыкания на землю / И.М. Сирота, В.В. Масляник // Электричество. – 1977. – № 3. – С. 38–43.

72. 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.

73. Вайнштейн, Р.А. Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / Р.А. Вайнштейн. – Томск, Томский гос. политехн. ун-т, 2012. – 346 с.

74. Вайнштейн, Р.А. Физическое моделирование электрических процессов, вызываемых перемежающимися дугowymi замыканиями / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головки // Известия вузов. Энергетика. – 1978. – № 10. – С. 116–120.

75. Винокурова, Т.Ю. Применение программного комплекса ATPDesigner для расчетов аварийных режимов ЭЭС в целях релейной защиты / Т.Ю. Винокурова, Т.М. Бакина, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов ФГБОУВПО. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. Т. 3. – 2011. – С. 93–101.

76. Винокурова, Т.Ю. Модели трансформаторов для анализа спектра высших гармоник при замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова // Энергетика глазами молодежи: научные труды III Международной научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Т. 2. – Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – С. 355–359.

77. Винокурова, Т.Ю. Модели трансформаторов для анализа спектра высших гармоник при замыканиях на землю в сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова // Наука и инновации в технических университетах: материалы Шестого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та. – 2012. – С. 20–22.

78. Винокурова, Т.Ю. Модель компенсированной сети 6–10 кВ для исследования режимов функционирования защит от замыканий на землю на основе высших гармоник. / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Т. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2012. – С. 92–99.

79. Винокурова, Т.Ю. Требования к чувствительности защит от однофазных замыканий на землю на основе высших гармоник / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Доклады Межд. науч.-техн. конф. СИГРЕ «Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем» [Электронный ресурс]. – Екатеринбург. – 2013.

80. Винокурова, Т.Ю. Схема замещения для расчета минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVII Бенардосовские чтения»). Т. 1. – Иваново: ПресСТО. – 2013. – С. 137–140.

81. Винокурова, Т.Ю. Сравнительный анализ принципов выполнения защит от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных сетей 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Материалы VIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2013». Т. 3 часть 1. – Иваново: Ивановск. гос. энерг. ун-т. – 2013 – С. 184–194.

82. Шуин, В.А. Расчеты высших гармоник в токе замыкания на землю на математических моделях компенсированных сетей 6-10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. Тр. IV междунар. науч.-техн. конф. Т. 2. – Новочеркасск: Лик. – 2013. – С. 211–215.

83. Винокурова, Т.Ю. О требованиях к чувствительности защит от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ на основе переходных процессов / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. Т.3. Ч. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2014. – С. 176–181.

84. Винокурова, Т.Ю. Оценка неустойчивости уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: IX международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: материалы конференции. В 7 т. Т.3. Ч. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2014. – С. 181–189.

85. Винокурова, Т.Ю. Об условиях применимости устройств защиты от замыканий на землю на основе переходных процессов сетей 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы 9-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Чуваш. ун-т. – 2014. – С. 301–302.

86. Винокурова, Т.Ю. Условия и области применения токовых защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ на основе абсолютного замера высших гармоник / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Сборник докладов XXII конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем». – М.: РЗА Экспо. – С. 100–102.

87. Винокурова, Т.Ю. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ. Вып. 6. –

Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2013. – С. 35–41.

88. Винокурова, Т.Ю. Применение имитационного моделирования для оценки уровня неустойчивости 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. Вып. 6. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2014. – С. 31–38.

89. Винокурова, Т.Ю. Расчетные условия для оценки чувствительности защит от замыканий на землю на основе переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Вестник российского национального комитета СИГРЭ. Энергия-2014, 9-я международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 15–17 апреля 2014 г.: материалы конференции. Т. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет. – 2014. – № 4. – С. 264–269.

90. Винокурова, Т.Ю. Анализ колебаний общего уровня высших гармоник в токе замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин, Е.С. Шагурина // Вестник российского национального комитета СИГРЭ. Энергия-2014, 9-я международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 15–17 апреля 2014 г.: материалы конференции. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет. Т.1. – 2014. – № 4. – С. 269–278.

91. Винокурова, Т.Ю. Исследование пределов изменения количества высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ промышленного электроснабжения / Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина // Национальный конгресс по энергетике. Всероссийская конференция, 8–12 сентября 2014 г.: материалы конференции. Т.4. – Казань: РИО КГЭУ. – 2014. – С. 8–12.

92. Винокурова, Т.Ю. Высшие гармоники в сетях 6–10 кВ и их использование в защитах от однофазных замыканий на землю / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // Коммерциализация научно-технических идей в энергетике, Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых, МЦ "Решма" 4–6 декабря 2013 г.: сборник статей. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет. – 2014. – С. 91–94.

93. Добрягина, О.А. Высшие гармоники и их применение в защитах от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ / О.А. Добрягина, Е.С. Шагурина, Т.Ю. Винокурова // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V Международной молодежной

научно-технической конференции, 10–14 ноября 2014 г.: материалы конференции. Т. 1. – Томск: ТПУ. – 2014. – С. 547–551.

94. Добрягина, О.А. О выборе воздействующей величины токовой защиты от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью / О.А. Добрягина, Е.С. Шагурина, Т.Ю. Винокурова // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V Международной молодежной научно-технической конференции, 10-14 ноября 2014 г.: Материалы конференции. Т. 1. – Томск: ТПУ. – 2014. – С. 551–555.

95. Vinokurova, T.Yu. Application of higher harmonics in protection against single-phase earth faults in resonant grounded cable networks of medium voltage / T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015 – S03.2.

96. Vinokurova, T.Yu. Selection of actualizing quantity for single-phase earth fault current protections of medium-voltage cable system / T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund. – 2015. – P01.5.

97. Vinokurova, T.Yu. Selective complex single-phase earth fault protection for distribution medium-voltage networks / T.Yu. Vinokurova, O.A. Dobryagina, E.S. Shagurina, V.A. Shuin // Tagungsband zum Power and Energy Student Summit. – Dortmund. – 2015. – P01.6.

98. Винокурова, Т.Ю. Условия применимости защиты от замыканий на землю сетей 6–35 кВ, основанной на сравнении высших гармоник фазных токов / Т.Ю. Винокурова // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»). Т. III. – Иваново: Прес-СТО. – 2015. – С. 434–437.

99. Винокурова, Т.Ю. Выбор воздействующей величины токовых защит от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения / Т.Ю. Винокурова, М.С. Аль-Хомиди, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 21–29.

100. 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/>

101. Винокурова, Т.Ю. Методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыканий на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин // Вестник ИГЭУ. Вып. 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 20–28.

102. Шадрикова, Т.Ю. Оценка уровня высших гармонических составляющих в переходных и установившихся токах однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Шадрикова, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды VI Международной молодежной научно-технической конференции, 9–13 ноября 2015 г.: Материалы конференции. Т. 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 207–212.

103. Винокурова, Т.Ю. Оценка уровня высших гармонических составляющих в переходных и установившихся токах однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск № 7. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов «Энергия–2015» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2015. – С. 55–58.

104. Винокурова, Т.Ю. Оценка минимального уровня высших гармоник в токе замыкания на землю в электрических сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина, В.А. Шуин // Сборник тезисов докладов II Международной научно-практической конференции и выставки «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО 2013). – Чебоксары: РИЦ СРЗАУ. – 2013. – С. 105–106.

105. 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.

106. Винокурова, Т.Ю. О влиянии аппроксимации кривой намагничивания на точность оценки спектра высших гармоник, генерируемых трансформаторами / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Девятнадцатая Междунар. научн.-техн. конфер. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2013. – С. 314.

107. Винокурова, Т.Ю. Влияние нестабильности высших гармоник в токе замыкания на землю сетей 6-10 кВ на условия применимости токовых защит / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцатая Междунар. научн.-техн. конфер. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2014. – С. 349.

108. Винокурова, Т.Ю. О выборе рабочего диапазона частот устройств защиты от замыканий на землю на основе переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Материалы докладов IX Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения»; под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. В 4 т. Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т. – 2014. – С. 373.

109. Винокурова, Т.Ю. О влиянии состава нагрузки центра питания на нестабильность уровня высших гармоник в токе замыкания на землю в кабельных сетях среднего напряжения / Т.Ю. Винокурова, В.А. Шуин // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать первая Междунар. научн.-техн. конфер. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4 т. Т. 4. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2015. – С. 229.

110. Винокурова, Т.Ю. Высшие гармонические составляющие в переходных токах замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, 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. 110–112.

111. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок: Учебник для учащихся техникумов / Б.Ю. Липкин – М.: Высш. школа, 1981. – 376 с.

112. Сербиновский, Г.В. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. Промышленные электрические сети / Г.В. Сербиновский. – М. Энергия, 1980. – 576 с.

113. Козлов В.А. Городские распределительные электрические сети / В.А. Козлов – Л: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1982. – 224 с.

114. Кужеков, С.Л. Городские электрические сети: Учебное пособие / С.Л. Кужеков, С.В. Гончаров – Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2001. – 256 с.
115. 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.
116. О проектировании сетей собственных нужд энергоблоков / Решение главного технического управления Минэнерго СССР № 8/8-8 от 17.06.86.
117. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС / Эксплуатационный циркуляр № Ц-01-97(7) – М.: Росэнергоатом – 1997.
118. О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС / Эксплуатационный циркуляр Минэнерго СССР № Ц-01-83 от 23.09.88.
119. Сирота, И.М. Свободные токи замыкания на землю в сетях малыми токами замыкания на землю / И.М. Сирота, В.В. Масляник // Электричество. – 1977. – № 3. – С. 38–43.
120. 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. – 1983. – № 12. – С. 4–9.
121. Шуин, В.А. Параметры токов переходного процесса при замыканиях на землю, влияющие на функционирование токовых защит нулевой последовательности электрических сетей 6–10 кВ / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева // Вестник ИГЭУ. Вып. 6. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2006. – С. 138–144.
122. Шуин, В.А. Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева, Е.С. Чугрова // Новости ЭлектроТехники. Информационно-справочное издание. – 2010. – №2(62). – С. 36–40.
123. Сиротинский, Л.И. Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах / Л.И. Сиротинский. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 368 с.
124. Шуин, В.А. Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. Зависимость от режима заземления нейтрали / В.А. Шуин // Новости ЭлектроТехники [Электронный ресурс]. – 2009. – № 4 (58). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/09.php>

125. Шуин, В.А. Об эффективности ограничения перенапряжения при дуговых замыканиях на землю различных режимов заземления нейтрали электрических сетей 6–35 кВ / В.А. Шуин, С.В. Солодов // Вестник ИГЭУ. Вып. 2. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2006. – С. 71–75.

126. Авторское свидетельство СССР 1078526. МПК H02H3/16. Способ направленной импульсной защиты от однофазного замыкания на землю в сетях с компенсированной и изолированной нейтралью / В.А. Шуин, О.В. Лебедев, А.М. Чухин; заявитель и патентообладатель Ивановский Орден "Знак Почета" энергетический институт им. В.И. Ленина. – № 3377832; заявл. 06.01.1982; опубл. 07.03.84, Бюл. № 9. – 3 с.

127. Патент 2402131 Российская Федерация. МПК H02H3/16. Способ диагностики и направленной защиты от однофазных замыканий на землю в электрических сетях / А.Л. Куликов, В.А. Шуин, А.А. Петрухин; заявители и патентообладатели А.Л. Куликов, В.А. Шуин, А.А. Петрухин. – № 2009129679/07; заявл. 03.08.2009; опубл. 20.10.2010. – 6 с.

128. Шуин, В.А. Централизованная система селективной сигнализации замыканий на землю и диагностики изоляции распределительных сетей среднего напряжения / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева, Е.С. Шагурина, А.Л. Куликов, А.А. Петрухин // Сборник докладов Международной научно-технической конференции СИГРЭ «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург. – 2011. – PS1. — Режим доступа: http://www.cigre.ru/research_commitets/ik_rus/b5_rus/materials/e-library/CIGRE-2011.rar.

129. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2003. – 350 с.

130. Корогодский, В.А. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.А. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.

131. Шуин, В.А. Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева, Е.С. Чугрова // Вестник ИГЭУ. Вып. 4. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – 2009. – С. 84–91.

132. Шуин, В.А. Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования / В.А. Шуин, О.А. Сарбеева, Е.С. Чугрова // Новости ЭлектроТехники. Информационно-справочное издание. – 2010. – № 2 (62). – С. 36–40.

133. Александров, А.М. Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ: методические указания с примерами / А.М. Александров. – СПб.: ПЭИПК, 2004. – 56 с.
134. Соловьев, А.Л. Методические указания по выбору характеристик и уставок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов серии SEPRAM производства фирмы Шнайдер Электрик / А.Л. Соловьев. – СПб.: ПЭИПК, 2005. – 48 с.
135. Гельфанд, Я.С. Релейная защита электрических сетей / Я.С. Гельфанд – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
136. Бухтояров, В.Ф. Новые устройства защиты от замыканий на землю в электрических сетях угольных разрезов / В.Ф. Бухтояров – М.: ЦНИИУголь, 1976. – 30 с.
137. Кискачи, В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник / В.М. Кискачи // Электричество. – 1967. – № 9. – С. 24–29.
138. Кискачи, В.М. Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. / В.М. Кискачи // Труды ВНИИЭ. Вып. 26. – М.: Энергия, 1966. – С. 89–105.
139. Жежеленко, И.В. Чувствительность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник в сетях промышленных предприятий / И.В. Жежеленко, О.Б. Толпыго // Электричество. – 1969. – № 10. – С. 32–39.
140. Авторское свидетельство СССР 221121. МПК H02H3/16. Способ защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / В.М. Кискачи; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно исследовательский институт электроэнергетики. – № 1036895; заявл. 10.11.1965; опубл. 11.10.1968, Бюл. № 21. – 2 с.
141. Алексеев, В.Г. Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины / В.Г. Алексеев // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 51–56.
142. Авторское свидетельство СССР 299908. МПК H02H3/16. Способ направленной защиты от однофазных замыканий на землю / В.М. Кискачи; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно исследовательский институт электроэнергетики. – № 1330149/24-7; заявл. 15.05.1969; опубл. 26.03.1971, Бюл. № 12. – 2 с.
143. Патент 2088010 Российская Федерация. МПК H02H3/16, H01H83/20. Реле защиты / В.И. Кашкалов; заявитель и патентообладатель В.И. Кашкалов. – № 94030995/07; заявл. 19.08.1994; опубл. 20.08.1997. – 4 с.

144. Патент 2422964 Российская Федерация. МПК H02H3/16, H02H31/08. Устройство токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пермский государственный технический университет". – № 2010110075/07; заявл. 17.03.2010; опубл. 27.06.2011. – 7 с.

145. Патент 2009591 Российская Федерация. МПК H02H3/38, H02H3/16. Способ определения направления мощности в защищаемой сети. / В.В. Кискачи; Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики. – № 5060831/07; заявл. 16.06.1992; опубл. 15.03.1994, Бюл. № 5. – 3 с.

146. Патент 2031507 Российская Федерация. МПК H02H3/26, H02H3/16. Устройство для защиты от замыканий на землю в электрической сети переменного тока / В.В. Кискачи; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт электроэнергетики. – № 93029515/07; заявл. 24.05.1993; опубл. 20.03.1995, Бюл. № 5. – 5 с.

147. Патент 2342754 Российская Федерация. МПК H02H3/16. Способ осуществления селективности защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / А.В. Андреев; заявитель и патентообладатель А.В. Андреев. – № 2007106944/09; заявл. 26.02.2007; опубл. 27.12.2008. – 3 с.

148. Патент 2075808 Российская Федерация. МПК H02H3/16, H02H3/17, H02H5/10. Устройство для защиты от однофазных замыканий на землю / Г.Г. Лейман, С.В. Рядилов, Е.И. Загоскин; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Новолипецкий металлургический комбинат". – № 93056502/07; заявл. 21.12.1993; опубл. 20.03.1997, Бюл. 33. – 3 с.

149. Авторское свидетельство 1171896 СССР. МПК H02H3/16. Устройство для защиты от однофазного замыкания на землю в сети переменного тока / О.А. Петров; заявитель и патентообладатель Челябинский политехнический институт им. Ленинского Комсомола. – № 3565576; заявл. 15.03.1983; опубл. 07.08.1985, Бюл. 29. – 6 с.

150. Патент 2244992 Российская Федерация. МПК H02H3/16, G01R31/08. Устройство для определения однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / Д.В. Батулько; заявитель и патентообладатель "Компания "МИР". – № 2003113488/28, заявл. 07.05.2003; опубл. 20.01.2005, Бюл. 23. – 9 с.

151. Патент 2122268 Российская Федерация. МПК H02H3/16. Устройство для направленной защиты электрической сети от замыканий на землю / С.И. Малафеев, В.С. Мамай, В.И. Микрюков, Н.А. Серебренников; заявитель Владимирский государственный универ-

ситет, патентообладатели С.И. Малафеев, В.С. Мамай, В.И. Микрюков, Н.А. Серебренников. – № 97113067/09, заявл. 30.07.1997; опубл. 20.11.1998, Бюл. 28. – 6 с.

152. Патент 2174276 Российская Федерация. МПК H02H3/16. Устройство для защиты линии с изолированной нейтралью / Б.Е. Дынькин, Д.Н. Коростелев; заявитель и патентообладатель Дальневосточный государственный университет путей сообщения. – № 2000101638/09, заявл. 20.01.2000; опубл. 27.09.2001, Бюл. 20. – 8 с.

153. Патент на полезную модель 103039 Российская Федерация. МПК H02H3/16. Устройство защиты трехфазной сети от однофазных замыканий на землю / М.Л. Сапунков, Л.М. Сапунков, А.А. Худяков; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пермский государственный технический университет". – № 2010139666/07, заявл. 27.09.2010; опубл. 20.03.2001. – 9 с.

154. Авторское свидетельство 299908 СССР. МПК H02H3/16. Способ направленной защиты от однофазных замыканий на землю / В.М. Кискачи; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно исследовательский институт электроэнергетики. – № 1330149; заявл. 15.05.1969; опубл. 26.03.1971, Бюл. 25. – 2 с.

155. Авторское свидетельство 476632 СССР. МПК H02H3/16. Способ определения поврежденного присоединения при однофазных замыканиях на землю в компенсированной сети / Е.И. Загоскин, В.Д. Соколик; заявитель и патентообладатель Центральная лаборатория и экспериментальные мастерские Тулэнерго. – № 1673146; заявл. 21.06.1971; опубл. 05.07.1975, Бюл. 25. – 2 с.

156. Авторское свидетельство 545033 СССР. МПК H02H3/16. Устройство для селективной защиты питающих фидеров от замыканий на землю / В.Ф. Бухтояров; заявитель и патентообладатель В.Ф. Бухтояров. – № 2083502/07; заявл. 17.12.1974; опубл. 30.01.1977, Бюл. 4. – 3 с.

157. Авторское свидетельство 1267525 СССР. МПК H02H3/16. Устройство для централизованной направленной защиты от замыкания на землю в сети с изолированной или компенсированной нейтралью / С.О.Алексинский; заявитель и патентообладатель Ивановский Ордена "Знак Почета" энергетический институт им. В.И. Ленина. – № 3827720/24-07; заявл. 20.12.1984; опубл. 30.10.1986, Бюл. 40. – 3 с.

158. Патент 2217769 Российская Федерация. МПК G01P31/02, G01R31/08. Селективное устройство для определения однофазных замыканий на землю в кабельных линиях / В.И. Кошелев, В.Г. Андреев, А.В. Воскресенский, Д.А. Дубов; заявитель и патен-

тообладатель Рязанская государственная радиотехническая академия. – № 2002108087/09; заявл. 29.03.2002; опубл. 27.11.2003, Бюл. 32. – 6 с.

159. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1974. – 160 с.

160. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

161. Жежеленко, И.В. Обзор инженерных способов расчета несинусоидальных режимов / И.В. Жежеленко, С.Л. Войнов, В.П. Долгополов, В.И. Войнов. – М.: ВНИПИЭлеспром, 1974.

162. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

163. Долгополов, В.П. Исследование качества электрической энергии в системах электроснабжения предприятий целлюлозно-бумажной промышленности: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / Долгополов Виктор Петрович. – Иваново: ИЭИ, 1977. – 228 с.

164. Петров, Г.Н. Трансформаторы. Т. 1. Основы теории / Г.Н. Петров. – М.: ОНТИНКТП, 1934. – 445 с.

165. Либкинд, М.С. Высшие гармоники, генерируемые трансформаторами / М.С. Либкинд. – М.: Энергоатомиздат, 1962. – 102 с.

166. Вагин, Г.Я. Исследование качества электрической энергии на машиностроительных предприятиях и мероприятия по его улучшению / Г.Я. Вагин, О.И. Котельников // Качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий. – М.: МДНТП. – 1977. – С. 74–80.

167. Вагин, Г.Я. Исследование высших гармоник, генерируемых машинами контактной электросварки с управляемыми игнитронными коммутаторами / Г.Я. Вагин, В.Б. Иванов, В.Г. Скобелев // Промышленная энергетика. – 1975. – № 6 – С. 24–26.

168. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Академия, 2011. – 224 с.

169. Барыбин, Ю.Г. Справочник по проектированию электроснабжения / Ю.Г. Барыбин, Л.Е. Федоров, М.Г. Зименков, А.Г. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

170. Герасимов, В.Г. Электротехнический справочник. Т. III / В.Г. Герасимов, П.Г. Грудинский, Л.А. Жуков и др. – М.: Энергоиздат, 1982. – 616 с.

171. Бажанов, С.А. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / С.А. Бажанов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 656 с.
172. Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров – М.: Энергия, 1972. – 416 с.
173. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б.Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 366 с.
174. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 414 с.
175. Ястребов, П.П. Электрооборудование и электротехнология / П.П. Ястребов, И.П. Смирнов. – М.: Высш. шк., 1987. – 199 с.
176. Шпиганович, А.Н. Электроснабжение: учебное пособие / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович. – Липецк: ЛГТУ, 1998. – 80 с.
177. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; под ред. С.С. Рокотяна, И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
178. Вавин, В.Н. Релейная защита блоков турбогенератор–трансформатор / В.Н. Вавин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 256 с.
179. Кискачи, В.М. Использование гармоник э.д.с. генераторов энергоблоков при выполнении защит от замыканий на землю / В.М. Кискачи // Электричество. – 1974. – № 2. – С. 24-29.
180. Миронов, И.А. Особенности применения дугогасящих реакторов / И.А. Миронов, В.А. Кричко // Новости ЭлектроТехники [Электронный ресурс]. – 2009. – № 4 (58). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2007/43/07.php>
181. Базылев, Б.И. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю / Б.И. Базылев, А.М. Брянцев, А.Г. Долгополов и др. – СПб.: ПЭИПК, 1999. – 184 с.
182. Брянцев, А.М. Управляемые подмагничиванием дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6–35 кВ / А.М. Брянцев, Б.И. Базылев, А.Г. Долгополов и др. // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 59–68.
183. Обабков, В.К. Синтез адаптивных систем управления резонансными объектами / В.К. Обабков. – Киев: Наукова Думка, 1993. – 254 с.

184. Лихачев, Ф.А. Выбор, установка и эксплуатация дугогасящих аппаратов / Ф.А. Лихачев. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 144 с.
185. Смирнов, С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С.С. Смирнов. – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.
186. Дружинин, В.В. Магнитные свойства электротехнической стали / В.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
187. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34.0-20.527-98 / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: НЦ «ЭНАС», 2004. – 152 с.
188. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ: РД 34.20.179 (ТИ 34-70-070-87) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – http://standartgost.ru/g/ТИ_34-70-070-87
189. Вайнштейн, В.Л. Исследование высших гармоник тока замыкания на землю / В.Л. Вайнштейн // Промышленная энергетика. – № 1. – 1986. – С. 39–40.
190. Алексеев, В.Г. Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины / В.Г. Алексеев // Электрические станции. – 2006. – № 2. – С. 51–56.
191. 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.
192. Каганов, З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах / З.Г. Каганов. – М.: Энергия, 1970. – 208 с.
193. Шалыт, Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях / Г.М. Шалыт // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – С. 77–97.
194. Филатова, Г.А. Частотные характеристики и модели трансформаторов напряжения в аспекте задач определения места повреждения в кабельных сетях 6-10 кВ / Г.А. Филатова, В.А. Шуин // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»). Т. III. – Иваново: ПресСТО. – 2015. – С. 438–441.

195. Филатова, Г.А. Влияние частотных характеристик 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 // 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. 108–110.

196. Шуин, В.А. Защита от замыканий на землю на принципе сравнения амплитуд переходных токов в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шуин Владимир Александрович. – М.: МЭИ, 1974. – 300 с.

197. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. № 229. – М.: ЭНАС, 2010. – 264 с.

198. Фабрикант, В.Л. Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики / В.Л. Фабрикант. – М.: Высшая школа, 1968. – 267 с.

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

200. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 1. Обзор существующих принципов выполнения защиты от замыканий на землю в распределительных электрических сетях 6–10 кВ. Обоснование требований, предъявляемым к защите от замыканий на землю. Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново: Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2014. – 118 с.

201. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 2. Исследование выполнения входной части микропроцессорных терминалов защиты 6-10 кВ и ее усовершенствование для обеспечения селективной работы токовой защиты нулевой последовательности и токовой направленной защиты нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и резистивно заземленной нейтралью. Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова, Г.А. Филатова, Е.А. Воробьева. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2014. – 109 с.

202. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 3. Исследование выполнения входной

части микропроцессорных терминалов защиты 6–10 кВ и ее усовершенствование для обеспечения селективной работы токовой защиты нулевой последовательности и токовой направленной защиты нулевой последовательности при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и резистивно заземленной нейтралью. Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2014. – 95 с.

203. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 4. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю с контролем фазовых соотношений высших гармонических составляющих при замыканиях на землю. Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2014. – 80 с.

204. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 5. Разработка технических мер по усовершенствованию алгоритма функционирования защиты абсолютного и относительного замера высших гармонических составляющих при однофазных замыканиях на землю. Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2015. – 64 с.

205. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 6. Разработка методики расчета уставок и параметров настройки защит. Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2015. – 43 с.

206. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 7. Итоговый научно-технический отчет. Техническое задание на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР). Отчет по науч.-иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. уни-т, 2015. – 91 с.

Приложение 1

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального
директора — технический
директор ООО НПП «ЭКРА»

В.А. Наумов

2015 г.

АК

об использовании результатов диссертационной работы Шадриковой Татьяны Юрьевны «Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабелей сетей 6–10 кВ»

ООО НПП «ЭКРА» осуществляет разработку и изготовление микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики для энергообъектов среднего напряжения (6–35 кВ). В рамках работ по НИОКР «Исследование и разработка защиты от замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ» по договору между ООО НПП «ЭКРА» и ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» в 2013–2015 гг. проводились исследования, связанные с разработкой защиты от замыкания на землю.

Результаты, полученные по указанной исследовательской работе обобщены в диссертационной работе Шадриковой Т.Ю., в которой предложены принципы выполнения комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, обеспечивающей определение поврежденного фидера при замыкании на землю в разветвленной электрической сети с распознаванием вида замыкания (устойчивое металлическое или перемежающееся дуговое замыкание либо однократный самоустраняющийся пробой изоляции). Установлены области применения токовой и токовой направленной защиты нулевой последовательности, реагирующей на основную гармонику промышленной частоты по предельному значению собственного емкостного тока замыкания на землю защищаемого присоединения. Для сетей с изолированной нейтралью и высокоомным резистивным заземлением нейтрали предложены рекомендации по улучшению функционирования токовой и токовой направленной защиты нулевой последовательности при устойчивых и перемежающихся дуговых замыканиях. Для сетей с компенсацией емкостного тока получены практически полезные результаты по оценке чувствительности максимальной токовой защиты на основе замера высших гармонических составляющих в токе нулевой последовательности и предложены алгоритмы распознавания разновидностей замыкания на землю повышающие устойчивость функционирования данной защиты при перемежающихся дуговых замыканиях. Разработана уточненная методика выбора уставок максимальной токовой защиты на основе замера высших гармонических составляющих в токе нулевой последовательности и сформулированы области её возможного применения на объектах с различным составом и характером работы нагрузки.

ООО НПП «ЭКРА» использует результаты научных исследований диссертационной работы Шадриковой Т.Ю. в устройствах защиты от однофазных замыканий на землю и методических указаниях по выбору уставок. Одно из устройств установлено в кабельных сетях Михайловского горно-обогатительного комбината.

Заведующий отделом

защит низкого напряжения, к.т.н.

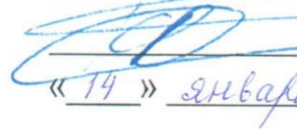
С.Н. Пашковский

Приложение 2

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «ЛИСИС»

 Д.В. Кишиневский
«14» января 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шадриковой Т.Ю.

«Разработка комплексной многофункциональной защиты
от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ»

Настоящим актом подтверждается, что при разработке ООО «ЛИСИС» проекта цифровой подстанции «Эльгауголь» использованы результаты диссертационных исследований Шадриковой Т.Ю., аспиранта кафедры «Автоматическое управление электроэнергетических систем» ИГЭУ, а именно принципы выполнения и алгоритмы функционирования направленной защиты от однофазных замыканий на землю на основе переходных процессов и токовой защиты на основе составляющих промышленной частоты, обладающей повышенной динамической устойчивостью функционирования.

Начальник отдела

математического обеспечения, к.т.н.



 Д.Г. Еремеев

Приложение 3

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. генерального директора

ОАО «Ивэлектроналадка» –

начальник управления

комплексного проектирования

 В.А. Долотов« 11 » января 2016 г.**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы Шадриковой Т.Ю.

«Разработка комплексной multifunctional защиты
от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ»

Настоящим актом подтверждается внедрение в проектную деятельность ОАО «Ивэлектроналадка» результатов диссертационной работы Шадриковой Т.Ю., а именно рекомендаций по уточнению методики расчета уставок максимальных токовых защит нулевой последовательности от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, и методики выбора уставок максимальной токовой защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Главный инженер управления
комплексного проектирования М.А. Пашура

Приложение 4

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер института

«Энергопроект» – Филиала

ООО «ЭнергоСтройПроект-М.Н.»

в г. Иваново

М.Ю. Козлов

2016 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Шадриковой Т.Ю.

«Разработка комплексной multifunctional защиты

от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ»

Настоящим актом подтверждается внедрение в проектную деятельность института «Энергопроект» – Филиала ООО «ЭнергоСтройПроект-М.Н.» в г. Иваново результатов диссертационной работы Шадриковой Т.Ю., а именно рекомендаций по уточнению методики расчета уставок максимальных токовых защит нулевой последовательности от замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор, и методики выбора уставок максимальной токовой защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

Начальник отдела релейной защиты

и противоаварийной автоматики

Е.А. Еронина