ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ В.И.ЛЕНИНА»

На правах рукописи

ВОРОБЬЕВА ЕКАТЕРИНА АНДРЕЕВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 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 – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ…… 26

1.1 Основные особенности и характеристики кабельных сетей 6–10 кВ, определяющие параметры электрических величин переходного процесса……..... 26

1.2 Методы и модели для анализа переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ……... 32

1.2.1 Особенности использования аналитических моделей для исследования переходных процессов при ОЗЗ……..... 32

1.2.2 Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных процессов при однофазных замыканиях на землю и методика их эквивалентирования……... 40

1.3 Анализ влияния частотных характеристик трехжильных кабелей 6–10 кВ на точность расчетов переходных процессов при замыканиях фазы на землю…… 49

1.3.1 Методика определения частотных характеристик трехжильных кабелей напряжением 6 – 10 кВ…… 49

1.3.2 Оценочные расчеты зависимостей индуктивностей трехжильного кабеля от частоты…….. 59

1.4 Анализ факторов, влияющих на соотношения токов и напряжений нулевой последовательности в переходных режимах при дуговых замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ …….. 64

1.5 Выводы по главе 1……..... 70

Глава 2 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ИСПОЛНЕНИЙ АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ….. 72

2.1 Критерии оценки способов выполнения и устройств защиты от замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения……. 72

2.2 Аналитический обзор известных способов выполнения адаптивных токовых защит от замыканий на землю…… 75

2.3 Аналитический обзор известных способов выполнения и исполнений адмитансных защит от замыканий на землю…… 83

2.4 Общая оценка эффективности применения известных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ…….. 98

2.5 Выводы по главе 2……..……. 101

Глава 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ…… 102

3.1 Адаптивная токовая защита, основанная на использовании составляющих основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности…… 102

3.2 Мультичастотная адаптивная токовая защита для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью…… 109

3.3 Мультичастотная адаптивная токовая защита для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ …….. 117

3.4 Фиксация кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции с использованием мультичастотных адаптивных токовых защит……..... 124

3.5 Универсальная мультичастотная адаптивная токовая защита от однофазных замыканий на землю для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ…….. 130

3.6 Выводы по главе 3…… 142

Глава 4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ……. 144

4.1 Мультичастотная ненаправленная адмитансная защита для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью…… 144

4.2 Мультичастотная ненаправленная адмитансная защита для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ……. 152

4.3 Мультичастотная направленная адмитансная защита для некомпенсированных и компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ…… 158

4.4 Разработка и исследование функционально-структурной схемы макетного образца универсальной адмитансной защиты от замыканий на землю для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ…….. 164

4.5 Сравнительная оценка универсальных решений на основе мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит…… 175

4.6 Разработка технического задания на экспериментальный образец мультичастотной токовой и адмитансной защит от замыканий на землю и перспективы их внедрения в кабельных сетях 6–10 кВ…….. 180

4.7 Выводы по главе 4…….. 184

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 186

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……..... 189

ВВЕДЕНИЕ

В.1 **Актуальность темы.** До 50% вырабатываемой в России электроэнергии распределяется потребителям по электрическим кабельным сетям среднего напряжения [1], из них более 99% суммарной протяженности составляют распределительные сети напряжением 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения [2]. По данным [3] кабельные сети 6–10 кВ состоят приблизительно на 95 % из трехжильных кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). В соответствии с ПУЭ [4] в России кабельные сети 6–10 кВ, как правило, должны работать с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР), при этом необходимость применения ДГР поставлена в зависимость только от величины суммарного емкостного тока замыкания на землю промышленной частоты $I_{c\Sigma}$. Принятые в России режимы заземления нейтрали электрических сетей среднего напряжения (изолированная или заземленная через ДГР) имеют главной целью обеспечение такого уровня тока замыкания на землю, который давал бы возможность в течение длительного времени (до двух часов в сетях генераторного напряжения и до 6 часов во всех остальных сетях [5]) не отключать поврежденный элемент и выполнить защиту от данного вида повреждений с действием на сигнал.

В кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной или с заземленной через ДГР нейтралью (компенсацией емкостных токов ОЗЗ) и выполненных кабелями с БПИ, преобладающим видом повреждений являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), составляющие 80–90% от общего числа электрических повреждений [6–8 и др.]). Наиболее опасной разновидностью ОЗЗ являются дуговые перемежающиеся замыкания на землю (ДПОЗЗ), сопровождающиеся опасными для всей электрически связанной сети перенапряжениями, максимальная кратность которых может достигать величины $K_п$ = 3,5–4 [7–15 и др.].

ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения условно разделяются на замыкания длительного характера ($t_з \geq 3$ мин) и кратковременные («мгновенные земли») длительностью $t_з < 3$ мин [8]. По данным [8] максимальная длительность ОЗЗ в исследованных сетях составляла 7,25 час. Наибольшую опасность для кабельных сетей 6–10 кВ представляют длительные ДПОЗЗ, перенапряжения при которых могут обусловить возникновение вторичных пробоев изоляции в других элементах сети (т.е. двойных и многоместных замыканий), приводящих к отключениям релейной защитой от коротких замыканий (КЗ) не только кабельных линий (КЛ), но и силовых трансформаторов и высоковольтных электродвигателей (ЭД). Отключение питающих КЛ и силовых трансформаторов приводят к нарушениям электроснабжения потребителей, выход из работы ЭД в ряде случаев может приводить к нарушениям всего технологического процесса. Таким образом, ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, прежде всего, дуговые, часто являются причиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Анализ, приведенный в [2], показал, что наибольший ущерб возникает при отказах КЛ 6–10 кВ, на которые приходится более 70% всех нарушений электроснабжения потребителей. Поэтому повышение уровня эксплуатационной надежности распределительных кабельных сетей 6–10 кВ является одним из ключевых факторов повышения надежности электроснабжения потребителей. Возможности повышения эксплуатационной надежности кабельных сетей 6–10 кВ в значительной мере определяются техническим совершенством (селективностью и устойчивостью функционирования [16]) защиты от ОЗЗ, обеспечивающей быстрое и селективное определение поврежденного присоединения.

Для защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью основное применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности (ТЗНП), основанные на контроле составляющей основной частоты 50 Гц тока нулевой последовательности защищаемого присоединения [17–22

и др.]. Однако возможности широкого применения ТЗНП ограничены не всегда достаточной чувствительностью защит данного типа на присоединениях с относительно большими значениями собственного емкостного тока $I_{c\,собс*} = I_{c\,собс} / I_{c\Sigma}$. В [23–25] показано, что увеличить чувствительность при устойчивых ОЗЗ (УОЗЗ) и область возможного применения по величине $I_{c\,собс*}$ токовых защит в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью позволяет многопараметрический принцип их выполнения, однако даже при его применении остаются проблемы с обеспечением необходимой чувствительности ТЗНП при значительно более опасных, чем УОЗЗ, длительных ДПОЗЗ. Практически обычные исполнения ТЗНП способны обеспечить требуемую чувствительность на присоединениях с $I_{c\,собс*} < 0{,}15$–$0{,}2$ только при УОЗЗ и при наиболее опасной разновидности ДПОЗЗ, протекающей в соответствии с теорией W. Petersen (повторные зажигания заземляющей дуги на максимуме восстанавливающегося напряжения поврежденной фазы каждый полупериод рабочей частоты 50 Гц, т.е. через 10 мс [13]), однако доля таких ДПОЗЗ в общем числе дуговых замыканий в кабельных сетях 6–10 кВ по данным [26, 27] не превышает 1 %. В большинстве случаев ДПОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ характеризуются большими интервалами между повторными пробоями изоляции порядка 20–50 мс [например, 7, 28 и др.], при которых эффективное значение тока в защите недостаточно для ее устойчивых срабатываний. Более эффективны при ДПОЗЗ многопараметрические ТЗНП, однако они могут обеспечить достаточную чувствительность при ДПОЗЗ только на присоединениях с небольшими собственными емкостными токами $I_{c\,собс*} < 0{,}1$ [25]. Такие значения $I_{c\,собс*}$ характерны только для присоединений, подключенных к шинам 6–10 кВ в основном на трансформаторных пунктах (подстанциях) 6–10/0,4 кВ в кабельных сетях систем промышленного электроснабжения [29].

В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для защиты от ОЗЗ, как правило, применяются токовые защиты, основанные на использовании способов абсолютного и относительного замера уровня высших гармоник (ВГ) токов нулевой последовательности присоединений защищаемого объекта

[30–32 и др.]. Способ относительного замера ВГ требует централизованного выполнения устройств защиты, что ограничивает возможности его широкого применения. Поэтому основное применение получили максимальные токовые защиты нулевой последовательности на основе способа абсолютного замера высших гармоник (ТЗНПВГ), в частности, устройство защиты типа УСЗ–2/2 [30–32], а также его цифровые аналоги в микропроцессорных терминалах релейной защиты и автоматики (РЗА) для ЛЭП среднего напряжения некоторых фирм-изготовителей. Область возможного применения ТЗНПВГ – селективности несрабатываний при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ, как и рассмотренной выше ТЗНП, ограничена относительной величиной собственного емкостного тока $I_{с.собс*}$ защищаемого присоединения. С учетом возможной степени нестабильности общего уровня ВГ в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ применение ТЗНПВГ практически возможно только на присоединениях с $I_{с.собс*} < 0{,}07–0{,}1$ [33, 34], т.е. в основном на трансформаторных подстанциях (ТП) 6–10/0,4 кВ кабельных сетей промышленных предприятий.

Отметим также, что при разработке устройств ТЗНПВГ, как правило, принимается, что в компенсированных сетях при резонансной или близкой к ней (±5% [5]) настройке ДГР возможны лишь УОЗЗ, а дуговые прерывистые замыкания имеют кратковременный характер, при котором после нескольких повторных пробоев изоляции через интервалы времени порядка 5–10 или более периодов рабочей частоты происходит полное гашение заземляющей дуги [8, 35, 36]. Такие дуговые прерывистые ОЗЗ не представляют особой опасности для сети и поврежденного элемента, и в соответствии с требованиями ПУЭ [4] селективная фиксация их устройствами защиты от ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ не является обязательной. С учетом этого известные исполнения устройств ТЗНПВГ предназначены для действия только при УОЗЗ, а их несрабатывания от кратковременных бросков переходного тока при дуговых замыканиях обеспечиваются, как правило, за счет быстрого

возврата измерительного органа тока после гашения заземляющей дуги и небольшой временной задержки на срабатывание. Однако при возможных в реальных условиях эксплуатации расстройках компенсации в кабельных сетях с заземлением нейтрали через ДГР также могут возникать ДПОЗЗ, сопровождаемые опасными перенапряжениями с кратностью $K_п$ = 2,7 и более [например, 7, 8]. Такие опасные для сети ДПОЗЗ устройствами ТЗНПВГ не фиксируются.

Анализ опыта эксплуатации, выполненный ОРГРЭС, подтверждает достаточно низкую селективность и чувствительность применяемых в настоящее время исполнений ТЗНП и ТЗНПВГ на центрах питания (ЦП) кабельных сетей 6–10 кВ [37]. Поэтому снижение аварийности в кабельных сетях 6–10 кВ, т.е. повышение их эксплуатационной надежности, невозможно без повышения технического совершенства устройств защиты от ОЗЗ, применяемых на ЦП.

Большую селективность и чувствительность, чем у токовых защит, позволяют обеспечить устройства защиты от ОЗЗ, использующие измерительные органы с двумя подведенными величинами – током и напряжением нулевой последовательности $3i_0$ и $3u_0$. К защитам, основанным на использовании измерительных органов с двумя подведенными величинами, относятся прежде всего направленные защиты от ОЗЗ.

В России и других странах широкое применение получили токовые направленные защиты нулевой последовательности (ТНЗНП), предназначенные для применения в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью [17–22 и др.]. Принцип действия ТНЗНП основан на контроле фазных соотношений между векторами напряжения $3\underline{U}_0$ и тока $3\underline{I}_0$ нулевой последовательности или их составляющих рабочей частоты. При обеспечении чувствительности по току и напряжению нулевой последовательности условия срабатывания ТНЗНП определяются только углом сдвига фаз между векторами напряжения $3\underline{U}_0$ и тока $3\underline{I}_0$. Поэтому условия селективности ТНЗНП при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ не ограничены относительными значениями собственного емкостного тока защищаемого присоединения, что позволяет применять защиты данного типа при $I_{c\,собс} > (0{,}15–0{,}2)I_{c\Sigma}$. Однако

преимущества ТНЗНП обеспечиваются в основном при УОЗЗ. По данным эксплуатации и исследований известно, что некоторые исполнения ТНЗНП ведут себя неудовлетворительно при ОЗЗ с перемежающимися дугами из-за возможных в переходных режимах нарушений фазных соотношений между напряжением $3\underline{U}_0(t)$ и током $3\underline{I}_0(t)$ нулевой последовательности [18, 20, 29, 37–39]. Недостатком направленных защит от ОЗЗ являются также отказы их функционирования из-за возможных в реальных условиях эксплуатации ошибок в полярности подключения вторичных цепей кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП).

В [37] показано, что в целом эффективность функционирования применяемых в настоящее время исполнений ТНЗНП едва ли можно считать приемлемой: средняя оценка селективности более 200 эксплуатируемых устройств защиты данного типа, выполненных с реле наиболее распространенных типов (ЗЗП-1, ЗЗП-1М [40, 41]), составляет 2,5, что объясняется ложными срабатываниями защиты при отключении ОЗЗ, а также излишними срабатываниями при дуговых замыканиях.

Для замены неэффективных исполнений ТНЗНП типа ЗЗП-1 (ЗЗП-1М) на ЧЭАЗ с 1998 г. освоен выпуск нового микроэлектронного направленного реле типа ЗЗН, разработанного во ВНИИЭ [42]. Функции ТНЗНП предусмотрены также практически во всех исполнениях микропроцессорных терминалов релейной защиты и автоматики (РЗА) линий среднего напряжения российских и зарубежных фирм-производителей. В литературных источниках информация об эффективности функционирования новых микроэлектронных и микропроцессорных исполнений ТНЗНП отсутствует, однако экспериментальные испытания некоторых цифровых исполнений ТНЗНП, выполненные в [29] с использованием тестовых сигналов токов и напряжений в формате Comtrade-осциллограмм и программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ, выявили возможность отказов срабатываний при внутренних и излишних срабатываний при внешних ДПОЗЗ.

Применение рассмотренных традиционных ТЗНП, основанных на использовании составляющих основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности, в принципе возможно и в компенсированных кабельных сетях, если для действия защиты использовать не реактивную (емкостную), а активную составляющую мощности нулевой последовательности. Однако этот способ, учитывая малую величину активной составляющей тока ОЗЗ (в кабельных сетях 6–10 кВ в среднем порядка 5% от $I_{c\Sigma}$ [7–9, 11, 35, 36]), предъявляет повышенные требования к точности работы ТТНП и органа направления мощности. Еще сложнее обеспечить селективность ТНЗНП при ДПОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, так как при дуговых замыканиях переходные токи $3i_0$ имеют практически чисто емкостный характер.

Более эффективное решение в части направленной защиты от ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ можно получить на основе ВГ. Способ выполнения такой защиты предложен Кискачи В.М. [43]. Принцип действия защиты по способу [43] основан на использовании фазных соотношений ВГ в токах и производной напряжения нулевой последовательности. Практическое применение данный способ получил в направленном устройстве защиты от ОЗЗ типа «Спектр», разработанном в ИЭИ (ИГЭУ) на основе двух способов, обеспечивающих определение поврежденного присоединения как в установившихся, так и переходных режимах ОЗЗ [43, 44]. Недостатком устройства защиты «Спектр» является 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.

Учитывая отсутствие эффективных направленных защит от ОЗЗ, основанных на использовании активной составляющей или ВГ установившегося режима ОЗЗ, в России для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ на протяжении многих лет разрабатывались направленные защиты на основе

электрических величин переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции. Преимуществами устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, является возможность фиксации не только дуговых прерывистых замыканий, но и кратковременных самоустраняющихся ОЗЗ (КрОЗЗ). Так как пробои в элементах с твердой или комбинированной изоляцией не являются преходящими и, возникнув, впоследствии неуклонно развиваются до полного пробоя (УОЗЗ, ДПОЗЗ или междуфазного КЗ), селективную сигнализацию КрОЗЗ в кабелях и электрических машинах можно использовать в целях диагностирования состояния изоляции элементов сети и предотвращения аварийного отключения присоединений релейной защитой от КЗ [45, 46]. По данным [18, 45–47] фиксацией КрОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и использованием информации о них для проведения высоковольтных испытаний поврежденного элемента сети можно предотвратить до 50% внезапных отключений КЛ и более 30% внезапных отключений электродвигателей.

В развитие и совершенствование принципов выполнения направленных устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, значительный вклад внесли известные ученые и специалисты СССР и России: Кискачи В.М. (ВНИИЭ), Попов И.Н., Лачугин В.Ф. (ЭНИН), Шуляк В.Г. (ЮРГПУ-НПИ), Дударев Л.Е. (ДПИ), Шуин В.А. (ИЭИ-ИГЭУ) и др. Однако несмотря на наличие в России технических решений в части защит указанного типа, эффективность которых подтверждена эксплуатацией экспериментальных и опытных образцов, в настоящее время серийно выпускается только устройство ТОР 110-ИЗН, разработанное совместно ЭНИН и ООО НПП «Релематика». Отметим, что существенным недостатком защит от ОЗЗ на основе переходных процессов является отсутствие у них непрерывности действия в установившемся режиме замыкания, необходимой при поиске поврежденного участка при УОЗЗ методом оперативных переключений в сети, а также при выполнении защиты от ОЗЗ с действием на отключение. Поэтому наиболее эффективное техниче-

ское решение в части направленных защит от ОЗЗ должно быть основано на использовании электрических величин как переходного процесса, так и установившегося режима ОЗЗ.

Изложенное выше позволяет сделать вывод, что получившие наиболее широкое применение токовые и токовые направленные защиты не позволяют получить в полной мере универсальное и комплексное решение проблемы защиты от ОЗЗ для кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через ДГР, обеспечивающее высокое техническое совершенство и надежность функционирования при всех разновидностях замыканий. В связи с этим актуальными являются разработки и исследования, основанные на использовании других принципов выполнения селективной защиты от ОЗЗ.

В2 **Степень разработанности темы. Обоснование направления исследований.** К перспективным принципам выполнения защиты от ОЗЗ, позволяющим обеспечить повышение их технического совершенства, на наш взгляд, относятся практически не применяемые в настоящее время в России:

1) адаптивные токовые защиты нулевой последовательности;

2) направленные и ненаправленные защиты, основанные на контроле проводимости (адмитанса) нулевой последовательности.

Под адаптивной релейной защитой понимается «концепция защиты, которая позволяет и пытается найти корректировку различных функций защит для того, чтобы сделать их более приспособленными к действующим условиям электрической сети» [48]. Известные предложения по выполнению адаптивных токовых защит от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью основной целью имеют повышение их чувствительности к замыканиям через переходное сопротивление [например, 49, 50 и др.]. Для этого первичный ток срабатывания ТЗНП автоматически уменьшается с уменьшением коэффициента полноты замыкания, определяемого отношением измеренного значения напряжения нулевой последовательности к номинальному фазному напряжению $b = U_0/U_{ф.н}$. При ДПОЗЗ значения I_0 и U_0, подводимые к защите, в общем

случае изменяются в разной степени в зависимости от параметров сети и поврежденной линии, места ОЗЗ в сети, интервалов времени между повторными пробоями изоляции, условий гашений и повторных зажиганий заземляющей дуги и других факторов, поэтому адаптивные ТЗНП на основе указанного выше принципа не позволяют обеспечить повышение селективности и чувствительности при дуговых замыканиях. Поэтому при разработке адаптивных токовых защит от ОЗЗ, предназначенных для применения в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью, в качестве факторов, определяющих «действующие условия сети», должно учитываться влияние на их функционирование не только переходного сопротивления, но прежде всего переходных процессов при ДПОЗЗ. В переходных режимах ОЗЗ свободные составляющие напряжения $3u_0(t)$ связаны со свободными составляющими переходных токов $3i_0(t)$ параметрами сети и поврежденной и неповрежденных линий [18, 47, 51]. Эта взаимосвязь позволяет использовать составляющие напряжения $3u_0(t)$ в целях адаптации уставки по току срабатывания ТЗНП к условиям функционирования не только в установившемся, но и в переходных режимах ОЗЗ. В компенсированных кабельных сетях при выполнении адаптивных токовых защит на основе ВГ, кроме указанных факторов, должна учитываться также нестабильность общего уровня высших гармоник в токе ОЗЗ. В кабельных сетях 6–10 кВ в установившемся режиме замыкания спектр ВГ тока ОЗЗ полностью определяется гармоническим составом напряжения поврежденной фазы, т.е. и напряжения $3u_0(t)$ [23, 33], что позволяет обеспечить адаптацию ТЗНПВГ к нестабильности общего уровня гармоник в защищаемой сети. В настоящее время адаптивные токовые защиты от ОЗЗ, в полной мере обладающие указанными свойствами, отсутствуют. Поэтому дальнейшие исследования и разработки в данном направлении являются актуальными.

В европейских и некоторых других странах для защиты от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, достаточно широкое применение получили защиты, основанные на контроле

проводимости нулевой последовательности $\underline{Y}_0 = 3\underline{I}_0/\underline{U}_0$ защищаемого присоединения на рабочей частоте сети, называемые, как правило, адмитансными [52–55]. В компенсированных кабельных сетях адмитансные защиты выполняются реагирующими на ВГ тока и напряжения нулевой последовательности. На основе данного принципа возможно выполнение как максимальной ненаправленной, так и направленной защит от ОЗЗ. В [51] отмечается более высокая эффективность функционирования адмитансной защиты по сравнению с традиционными ТЗНП и ТНЗНП, в частности, более высокая чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление при УОЗЗ. Однако в указанном и других источниках не рассматриваются вопросы влияния переходных процессов при дуговых замыканиях в сетях с изолированной нейтралью и нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ в компенсированных сетях на эффективность функционирования адмитансных защит и способы ее обеспечения. Поэтому применительно к адмитансным защитам от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ актуальной задачей является разработка и исследование способов их адаптации к влиянию указанных факторов.

Исследования в выбранном направлении проводились автором при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в Ивановском государственном энергетическом университете в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы” на тему “Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ” (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215).

Автор выражает также глубокую благодарность за научные консультации при выполнении работы к.т.н., доценту кафедры автоматического управления ЭЭС ИГЭУ Шадриковой Т.Ю. и д.т.н., профессору, профессору кафедры электрических систем ИГЭУ Слышалову В.К.

В.3 **Цель работы** – совершенствование принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ распределительных кабельных сетей напряжением 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

В.4 **Задачи, решаемые в работе:**

1 Совершенствование методов анализа переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ для исследования динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений.

2 Анализ известных принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.

3 Разработка и исследование принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной и с компенсацией емкостных токов, обеспечивающей высокую устойчивость функционирования к замыканиям через переходное сопротивление и перемежающуюся дугу.

4 Разработка и исследование способов повышения эффективности функционирования ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью.

5 Разработка и исследование принципов выполнения направленной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной и компенсированной нейтралью.

6 Сравнительный анализ эффективности адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.

7 Разработка функционально-структурных схем адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для выполнения на их основе макетного и экспериментального образцов защиты и проведения их испытаний на НПП «ЭКРА».

В.5 **Объект и предмет исследований.** Объектом исследований являются распределительные кабельные сети напряжением 6–10 кВ систем про-

мышленного и городского электроснабжения, работающие с изолированной нейтралью или с резонансным заземлением нейтрали через ДГР Предмет исследований – принципы выполнения и алгоритмы функционирования адаптивных токовых и адмитансных устройств защиты от ОЗЗ в указанных сетях.

В.6 **Методология и методы диссертационного исследования.** Как уже было отмечено выше, основным фактором, определяющим недостаточное техническое совершенство известных способов выполнения и исполнений адаптивных токовых и адмитансных защит, является существенное влияние на эффективность их функционирования переходных процессов при дуговых замыканиях на землю. Учитывая сложность переходных процессов при дуговых ОЗЗ основным методом их исследования в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали в работе являлось математическое моделирование с использованием аналитических и имитационных моделей. Для решения задач в работе использовались также методы теории электрических цепей и электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах.

В.7 **Научную новизну** работы представляют:

1 Методы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при исследованиях динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений, включающие модификацию аналитического решения уравнений переходных процессов при замыканиях на землю на основе двухчастотной схемы замещения, методику эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, методику приближенного учета зависимости индуктивностей трехжильных кабелей от частоты токов переходного процесса.

2 Способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанный на использовании соотношений мгновенных значений для составляющих основной частоты тока и производной напряжения нулевой последовательности, позволяющий обеспечить повышение динамической устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

3 Принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях.

4 Принципы выполнения ненаправленной и направленной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанной на непосредственном контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие высокую динамическую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

В.8 **Теоретическая значимость** работы обусловлена следующим. **Доказана** возможность повышения селективности и устойчивости функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит в переходных режимах при дуговых ОЗЗ на основе использования соотношений мгновенных значений между током и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до 1,5–2 кГц. **Изложены** способы повышения динамической устойчивости функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали. **Изучены** преимущества предложенных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит по сравнению с традиционными защитами указанных типов на основе интегральных соотношений между током и напряжением нулевой последовательности. **Проведена** модернизация существующих методик аналитического расчета переходных процессов при ОЗЗ на основе двухчастотной схемы замещения и формирования имитационных моделей кабельных сетей с применением программы Simulink с пакетом расширения SimPowerSystem. **Раскрыты** основные причины недостаточного технического совершенства существующих способов выполения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующих основных положениях:

1 Методика эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, которая может быть использована при анализе влияния переходных процессов при ОЗЗ на динамическую устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений.

2 Результаты исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, позволяющие оценить эффективность функционирования мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ при устойчивых и дуговых замыканиях на землю.

3 Результаты сравнительного анализа эффективности применения мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ.

4 Техническое задание для выполнения НПП «ЭКРА» на базе микропроцессорного терминала МиР экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ, включающей, кроме традиционных функций защиты от ОЗЗ, также функции универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты и универсальной мультичасотной адмитансной защиты от замыканий на землю.

В.9 **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 и на имитационных математических моделях, с данными исследований на физических моделях и с результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках, а также с данными исследовательских и лабораторных испытаний макетного образца адаптивной токовой и экспериментального образца максимальной и направленной адмитансной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ.

В.10 **Внедрение результатов исследований**. Принципы выполнения, структурно-функциональные схемы и алгоритмы функционирования универсальных мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ

использованы Индустриальным партнером ИГЭУ по ПНИЭР RFMEFI57716X0215 ООО НПП «ЭКРА» при разработке макетных образцов соответствующих защит и экспериментального образца комплексной защиты кабельных сетей 6–10 кВ от замыканий на землю.

Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, позволяющие исследовать переходные и установившиеся режимы ОЗЗ, и цифровые модели разработанных защит от ОЗЗ внедрены в учебном процессе на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» ИГЭУ при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплин «Спецвопросы релейной защиты» и «Математическое моделирование объектов электроэнергетики и устройств автоматического управления ими», в научно-исследовательской работе, выполнении выпускных квалификационных работ.

В.11 **Основные положения, выносимые на защиту:**

1 Методы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при исследованиях динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений: модификация аналитического решения на основе двухчастотной схемы замещения, методика эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, методика приближенного учета зависимости индуктивностей трехжильных кабелей от частоты токов переходного процесса.

2 Способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, обеспечивающий повышение динамической устойчивости функционирования при дуговых перемежающихся замыканиях.

3 Принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях.

4 Принципы выполнения ненаправленной и направленной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанной на контроле величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие повышение динамической устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

5 Функционально-структурные схемы и алгоритмы функционирования макетных образцов универсальных мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ и результаты их исследований на имитационных моделях компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

6 Результаты сравнительного анализа эффективности применения в кабельных сетях 6–10 кВ мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ.

В.12 **Личный вклад автора заключается** в постановке цели и конкретных задач исследования, выполнении аналитического обзора известных принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ, разработке принципов выполнения, структуры и алгоритмов функционирования адаптивной токовой, ненаправленной максимальной адмитансной и направленной адмитансной защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, разработке имитационных моделей компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ и моделей адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ для исследований эффективности их функционирования, получении аналитических решений отдельных задач исследования, разработке тестовых сигналов в формате Comtrade-осциллограмм, методики и программы лабораторных и исследовательских испытаний макетного и экспериментального образцов адаптивных токовых и адмитансных защит, проведении и анализе результатов испытаний, внедрении результатов исследований и разработок в учебный процесс подготовки магистрантов по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», в подготовке публикаций по теме диссертации.

В.13 **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 – принципы выполнения и алгоритмы 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) соответствует разработка принципов эквивалентирования математических имитационных моделей компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ для исследований переходных процессов при однофазных замыканиях на землю;

– п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют разработки новых принципов выполнения, структурно-функциональных схем, алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ;

– п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют разработка имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали и цифровых моделей адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ в среде моделирования Matlab для исследований эффективности функционирования

разработанных новых принципов выполнения и алгоритмов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ.

В.14 **Апробация результатов исследований**. Результаты исследований докладывались и обсуждались на XL сессии семинара «Кибернетика энергетических систем» (Новочеркасск, 2018г.), на Международной молодежной научно-технической конференции IEEE» Релейная защита и автоматика» (Москва, 2018г.), на IV Международной научно-технической конференции «Современные направления развития релейной защиты и автоматики энергосистем» (Екатеринбург, 2013 г.), на Международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО 2013) (Чебоксары, 2013 г.), на XVI, XVII и XVIII Международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVI Бенардосовские чтения») (Иваново, 2011 г., 2013 г., 2015 г.), на Восемнадцатой и Девятнадцатой международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2012г., 2013 г.), на III, IV, V и VI Международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012 г.; Новочеркасск, 2013 г.; Томск, 2014 г.; Иваново, 2015г.), на VIII, IX, X, XI и XII Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия - 2013» (Иваново, 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 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.15 **Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 23 работах [56–78], из них 4 в изданиях по перечню ВАК [70, 76, 77, 78], а также 19 в тезисах докладов и статьях международных научно-технических конференций [57, 58, 61 – 63, 65 – 69, 71 – 75].

В.16 **Основное содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка литературы из 149 наименований. Общий объем диссертации составляет 206 страниц, из них основной текст 188 страниц, содержащий 64 рисунка и 8 таблиц, список литературы 18 страниц.

В главе 1 рассмотрены основные особенности и характеристики кабельных сетей 6–10 кВ, определяющие параметры электрических величин переходного процесса; показаны методы и модели для анализа переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ; дан анализ влияния частотных характеристик трехжильных кабелей 6–10 кВ на точность расчетов переходных процессов при замыканиях фазы на землю; проанализированы факторы, влияющие на соотношения токов и напряжений нулевой последовательности в переходных режимах при дуговых замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.

В главе 2 рассмотрены критерии оценки способов выполнения и устройств защиты от замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения. Дан аналитический обзор известных способов выполнения адаптивных токовых защит от замыканий на землю. Выполнен аналитический обзор известных способов выполнения и исполнений адмитансных защит от замыканий на землю. Показана общая оценка эффективности применения известных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.

В главе 3 приведены результаты разработки и исследования принципов выполнения адаптивных токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ. Разработана адаптивная максимальная токовая защита от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанная на использовании соотношений мгновенных значений для составляющих основной частоты тока и производной напряжения нулевой последовательности. Разработана мультичастотная адаптивная токовая защита нулевой последовательности от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основан-

ная на использовании соотношений мгновенных значений суммы составляющей основной частоты и высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности. Разработана мультичастотная адаптивная токовая защита нулевой последовательности от ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанная на использовании соотношений мгновенных значений высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц установившегося и переходных режимов замыканий на землю.

В главе 4 отражены результаты разработки и исследований принципов выполнения адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ. Разработаны принципы выполнения ненаправленной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанной на непосредственном контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения с использованием соотношений для суммы мгновенных значений составляющих основной частоты и высших гармоник в диапазоне частот до ~2 кГц тока и производной напряжения нулевой последовательности. Разработаны принципы выполнения ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с заземлением нейтрали через ДГР, основанной на контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения с использованием соотношений для суммы мгновенных значений высших гармонических составляющих в диапазоне частот до ~2 кГц тока и производной напряжения нулевой последовательности. Разработаны принципы выполнения мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ, основанной на контроле знака и величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ. Разработано техническое задание для НПП «ЭКРА» на экспериментальный образец комплексной защиты от ОЗЗ, включающей, кроме традиционных функций защиты от ОЗЗ, также функции универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты и универсальной мультичасотной адмитансной защиты от ОЗЗ.

Глава 1 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

1.1 Основные особенности и характеристики кабельных сетей 6–10 кВ, определяющие параметры электрических величин переходного процесса

1.1.1 **Классификация распределительных кабельных сетей 6–10 кВ.** Классификация кабельных сетей напряжением 6–10 кВ может осуществляться по разным признакам. Основными признаками, определяющими условия применимости адаптивных токовых и адмитансных, являются назначение (характер потребителя) и режим заземления нейтрали сети. По назначению различают кабельные сети промышленного и городского электроснабжения. Назначение определяет особенности схем (конфигурации) кабельных сетей, режимы их работы сети, длины и сечения КЛ, состав и особенности объектов сети, прежде всего, приемных ТП 6–10/0,4 кВ [80–84]. Режимы заземления нейтрали определяют особенности электромагнитных переходных и установившихся процессов при ОЗЗ, степень опасности для сети и поврежденного элемента разновидностей ОЗЗ, принципы выполнения защиты от ОЗЗ.

В России в кабельных сетях 6–10 кВ, как правило, применяются режимы заземления нейтрали, допускающие в течение ограниченного времени работу сети с ОЗЗ и действие защиты от данного вида повреждений на сигнал. К ним, кроме непосредственно указанных в ПУЭ [4] режимов изолированной нейтрали и резонансного заземления через ДГР, также относятся заземление нейтрали через высокоомный резистор и комбинированное заземление нейтрали через ДГР и высокоомный резистор [35, 85–90 и др.]. Большая часть кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения в России работает с резонансным заземлением нейтрали через ДГР. Незначи-

тельная часть (порядка 10%) кабельных сетей 6–10 кВ, в основном, в системах промышленного электроснабжения, имеет величину $I_{C\Sigma}$, не превышающую 10 А, и работает с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор.

При низкоомном заземлении нейтрали в кабельных сетях среднего напряжения используется резистор, создающий ток от нескольких десятков до 1000-2000 А. В России режим низкоомного заземления нейтрали используется только в кабельных сетях 6–10 кВ собственных нужд блочных электростанций и газоперекачивающих компрессорных станций [91–95], а также в кабельных сетях напряжением 20 кВ, выполняемых КЛ из сшитого полиэтилена (ШПЭ). При наличии в кабельной сети высоковольтных ЭД величина тока ОЗЗ, создаваемого заземляющим резистором, ограничивается значениями порядка десятков ампер (в России 35–38 А [91–95]) в целях исключения возможности выплавления стали статора электродвигателя. При таких значениях тока ОЗЗ и небольших значениях собственных емкостных токов кабельных присоединений 6–10 кВ собственных нужд блочных электростанций и газоперекачивающих компрессорных станций требуемая чувствительность защиты от ОЗЗ, как правило, с запасом обеспечивается простыми и надежными ТЗНП.

1.1.2 **Схемы и основные характеристики распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного электроснабжения.** В кабельных сетях 6–10 кВ промышленных предприятий применяются в основном радиальные схемы распределения электроэнергии, реже – магистральные и смешанные схемы [80–82]. На рисунке 1.1, представляющем наиболее общий вариант схемы и состав объектов распределительной кабельной сети 6–10 кВ промышленного предприятия, можно выделить 3 группы объектов ЦП, РП (или РТП) и ТП. Особенностью систем электроснабжения промышленных предприятий является то, что на присоединениях 6–10 кВ всех объектов кабельной сети, включая ТП, в соответствии с требованиями ПУЭ должна предусматриваться установка стационарных устройств защиты от ОЗЗ (на рис. 1.1 –

УЗЗ). Для этого на всех КЛ предусматривается установка кабельных ТТНП, а на шинах 6–10 кВ каждой секции ЦП и РП – трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), обеспечивающих возможность измерения как всех фазных напряжений, так и напряжения нулевой последовательности $3U_0$.

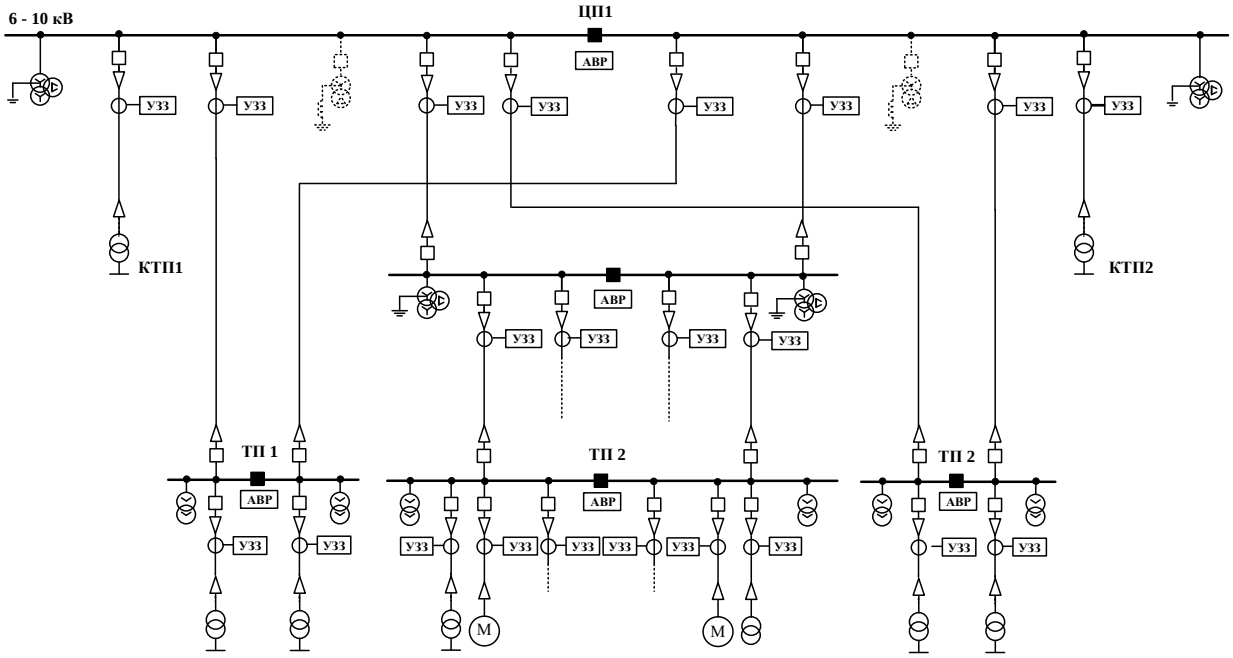


Рисунок 1.1 – Радиальная схема распределения электроэнергии в кабельной сети 6–10 кВ системы промышленного электроснабжения

На ТП установка ТНКИ, как правило, не предусматривается, что не позволяет применять на объектах данного типа УЗЗ с двумя подведенными величинами. Таким образом, в кабельных сетях 6–10 кВ промышленного электроснабжения применение адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ по техническим причинам возможно только на ЦП и РП (РТП).

Существенное влияние на условия применимости адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ, как будет показано ниже, оказывают относительное значение собственного емкостного тока $I_{c\,собс*} = I_{c\,собс} / I_{c\,\Sigma}$, а также длина КЛ защищаемого присоединения. В табл. 1.1 и 1.2 приведены диапазоны значений и средние величины основных параметров кабельных сетей 6–10 кВ, полученные в [23, 29] на основе статистической обработки данных по системам электроснабжения предприятий различных отраслей промышлен-

ности (целлюлозно-бумажной, металлургической, нефтеперерабатывающей и др.).

Таблица 1.1 – Значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения, питаемых от шин 6–10 кВ понизительных подстанций (ГПП) [23, 29]

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 $I_{C\,собс*}$ присоединений, подключенных к шинам объекта	Диапазон значений	0,01 – 0,45 (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 [23, 29]

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 (2х185)
Относительное значение собственного емкостного тока присоединений, подключенных к шинам секции $I_{c\,собс*}$	0,01 – 0,3	0,075

Из данных, приведенных в табл. 1.1 и 1.2, можно видеть, что наибольшие ограничения в части области применения простых и надежных ТЗНП, определяемые величиной $I_{C\,собс*}$ защищаемого присоединения, возникают на ЦП (ГПП, ГРУ ТЭЦ) и в некоторых случаях на РП. Поэтому необходимость в применении более совершенных защит от ОЗЗ с двумя подведенными величинами (токовых направленных, адаптивных токовых или адмитансных) возникает только на указанных объектах кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения.

1.1.3 **Схемы и основные характеристики распределительных кабельных сетей 6–10 кВ систем городского электроснабжения.** Питающие электрические сети, кроме ЦП, включают РП и КЛ, питающие эти пункты. Питание РП осуществляется по радиальным схемам от разных секций шин 6–10 кВ ЦП [83, 84]. Для питания ТП электроснабжения электроприемников первой категории могут использоваться радиальная схема, магистральные двухлучевая с односторонним питанием, двух- или трехлучевая с двухсторонним питанием (например, рис. 1.2). Для электроснабжения электроприемников второй категории применяются петлевые и кольцевые схемы питания, при этом на ТП устанавливается, как правило, один трансформатор (рис. 1.2).

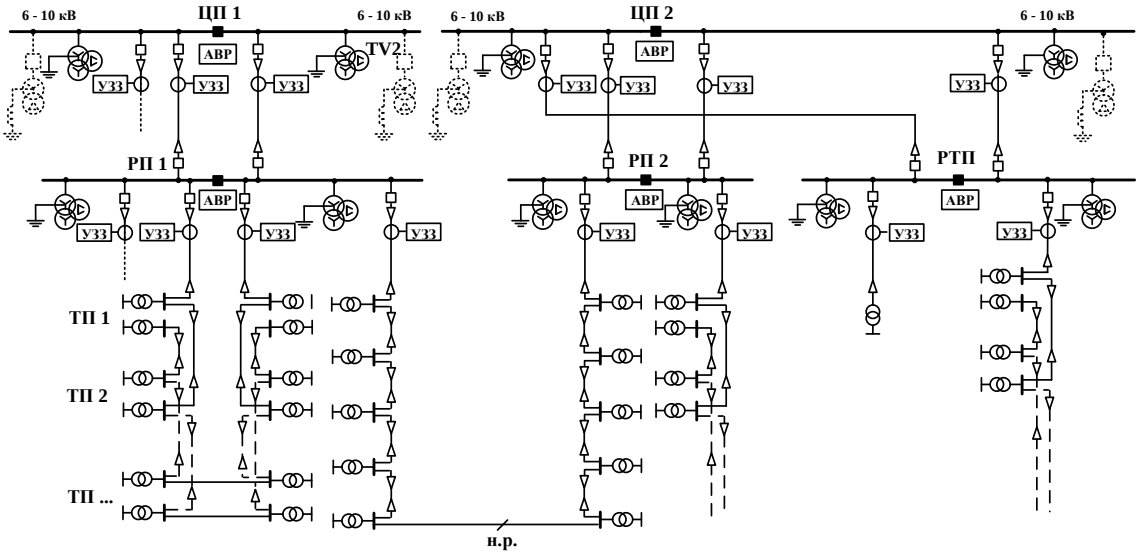


Рисунок 1.2 – Типовые схемы распределения электроэнергии в кабельных сетях 6–10 кВ системы городского электроснабжения [83]

По схемам присоединения к сети принято различать тупиковые, проходные и узловые ТП. Питание тупиковых ТП от ЦП или РП осуществляется по радиальным КЛ. Проходная ТП имеет одну вводную и одну отходящую КЛ, узловая ТП – одну вводную и несколько отходящих КЛ. Большая часть ТП в схемах городских кабельных сетей 6–10 кВ являются проходными, доля узловых ТП в среднем не превышает 10% от общего числа ТП. В отличие от кабельных сетей промышленного электроснабжения, на ТП городского электроснабжения установка стационарных устройств защиты от ОЗЗ вводной и отходящих КЛ не предусматривается, а защита трансформаторов 6–10/0,4 кВ от КЗ, как правило, осуществляется плавкими предохранителями. Таким образом, в городских кабельных сетях 6–10 кВ применение адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ, как и в кабельных сетях промышленных предприятий, возможно только на ЦП и РП.

В таблице 1.3 даны примерные диапазоны изменения и средние значения основных параметров кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения, полученные в [96] на основе анализа данных по системам электроснабжения некоторых городов Российской Федерации.

Таблица 1.3 – Значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ городского электроснабжения, питаемых от шин 6–10 кВ ГПП [97]

Параметр		Значение параметра для объектов городской кабельной сети 6–10 кВ
Длина питающей КЛ от ЦП до РП, м	Диапазон значений	90 – 275
	Среднее значение	1710
Длина кабельного участка от ТП до ТП, м	Диапазон значений	25 – 1500
	Среднее значение	370
Число ТП в шлейфе, отходящем от ЦП или РП, шт.	Диапазон значений	2 – 13
	Среднее значение	4
Суммарная длина шлейфа, отходящего от РП, м	Диапазон значений	100 – 7500
	Среднее значение	1400
Относительное значение $I_{с\ собс*}$ питающих КЛ, отходящих от шин ЦП	Диапазон значений	0,05–0,6
	Среднее значение	0,2

Продолжение таблицы 1.3

Параметр		Значение параметра для объектов городской кабельной сети 6–10 кВ
Относительное значение $I_{c\ собс*}$ магистральных распределительных КЛ, отходящих от шин ЦП или РП	Диапазон значений	0,05–0,5
	Среднее значение	0,15

Из сравнения данных табл. 1.1, 1.2 и 1.3 можно видеть, что для кабельных сетей 6–10 кВ систем городского электроснабжения характерны большие длины питающих и особенно распределительных КЛ по сравнению с сетями электроснабжения промышленных предприятий. Соответственно, для городских кабельных сетей характерны большие относительные значения собственных емкостных токов $I_{c\ собс*}$ присоединений, подключенных к шинам 6–10 кВ ЦП и РП, ограничивающие возможности применения токовых защит от ОЗЗ с одной подведенной величиной. Следовательно, задача повышения технического совершенства защит от ОЗЗ, устанавливаемых на ЦП и РП, для городских кабельных сетей 6–10 еще более актуальна, чем для кабельных сетей систем промышленного электроснабжения.

1.2 Методы и модели для анализа переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

1.2.1 Особенности использования аналитических моделей для исследования переходных процессов при ОЗЗ

1.2.1.1 **Краткий обзор известных аналитических решений уравнений переходных процессов при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения.** Известные аналитические решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в электрических сетях среднего напряжения 6 – 35 кВ,

включая решения для кабельных сетей 6 – 10 кВ, можно классифицировать по следующим признакам:

1) по цели исследований переходных процессов при ОЗЗ (например, исследования перенапряжений при дуговых прерывистых ОЗЗ, исследования в целях оценки параметров и характеристик переходных токов при ОЗЗ, влияющих на функционирование защит от данного вида повреждений и др.);

2) по схеме замещения электрической сети, используемой для аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ;

3) по виду координат (составляющих), с использованием которых получено аналитическое решение уравнений переходного процесса при ОЗЗ (фазные составляющие, симметричные составляющие, α, β, 0-составляющие и др.).

Сложность аналитического решения определяется, прежде всего, сложностью принятой расчетной схемы замещения сети для исследования переходных процессов при ОЗЗ. В свою очередь сложность расчетной схемы замещения электрической сети зависит от цели исследований переходных процессов при ОЗЗ и связанной с ней необходимостью учета различных составляющих переходных токов и напряжений. Большая часть известных аналитических решений уравнений переходного процесса при ОЗЗ связана с оценкой максимальных кратностей перенапряжений при дуговых замыканиях. Известно [например, 7–9, 11 и др.], что максимальные перенапряжения в нейтрали сети и на неповрежденных фазах практически определяются только зарядной составляющей переходного процесса при ОЗЗ. Поэтому в расчетных схемах замещения сети для определения перенапряжений разрядную стадию, как правило, учитывают упрощенно, полагая, что она практически мгновенно обуславливает начальное распределение зарядов и напряжений. Такой подход применяется, в частности, в работах Сироты И.М., Лихачева Ф.А., Белякова Н.Н., Евдокунина Г.А., Дударева Л.Е. и ряда других специалистов по вопросам переходных процессов при ОЗЗ [7, 8, 12, 15, 35, 97 и др.].

При анализе динамической устойчивости функционирования защит от ОЗЗ на разных принципах указанное выше представление разрядной стадии

переходного процесса, как показано в [18, 23, 25, 26, 29, 47, 98–102 и др.], неприемлемо, т.к. может привести к значительным погрешностям в оценке максимальных и среднеквадратичных значений переходных токов. Поэтому для решения таких задач расчетная схема замещения сети должна учитывать не только зарядную составляющую, но и основную частотную составляющую разрядной стадии переходного процесса.

В целях учета зарядной и разрядной составляющей применялись два подхода, первый из которых основан на предположении о независимости процессов, связанных с разрядом поврежденной фазы, и процессов, связанных с дополнительным подзарядом емкостей неповрежденных фаз, а второй учитывает их взаимозависимость. Практически процессы разряда емкости поврежденной фазы и подзаряда неповрежденных фаз можно считать независимыми, если частоты основной разрядной и зарядной составляющих переходного процесса различаются на порядок и больше. Значительное различие частот основной разрядной и зарядной составляющих позволяет рассматривать процессы разряда емкости неповрежденной фазы и подзаряда емкостей неповрежденных фаз как независимые процессы в двух одночастотных схемах замещения. Этот подход используется, в частности, в работах Koch W., Шуляка В.Г. [103–105].

В [47, 51] показано, что частотное разделение основной разрядной и зарядных составляющих возможно не всегда. Поэтому процессы, связанные с разрядом емкости поврежденной фазы и подзарядом емкостей неповрежденных фаз, должны рассматриваться в общем случае как взаимозависимые. Учет их взаимозависимости обуславливает необходимость применения для расчета переходных процессов при ОЗЗ схем замещения, описываемых как минимум дифференциальным уравнением 4-го (для сети с изолированной нейтралью) или 5-го порядка (для компенсированной сети). Данный подход применен в работах Шуина В.А. [47, 51]

1.2.1.2 **Оценка точности и модификация аналитического решения уравнений переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, полученного в [47, 51].** В [47, 51] на основе сравнения экспериментальных и расчетных данных показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ частота и амплитуда разрядной и зарядной частотных составляющих переходного процесса при ОЗЗ определяется практически только суммарной емкостью фаз сети на землю и суммарными междуфазными емкостями неповрежденной части сети, параметрами поврежденной линии на участке от шин до точки ОЗЗ и переходным сопротивлением $R_п$ в месте повреждения, которые должны быть учтены в расчетной схеме замещения. С учетом этого в [47, 51] для исследования переходных процессов при ОЗЗ предложено использовать двухчастотную схему замещения, приведенную на рис. 1.3.

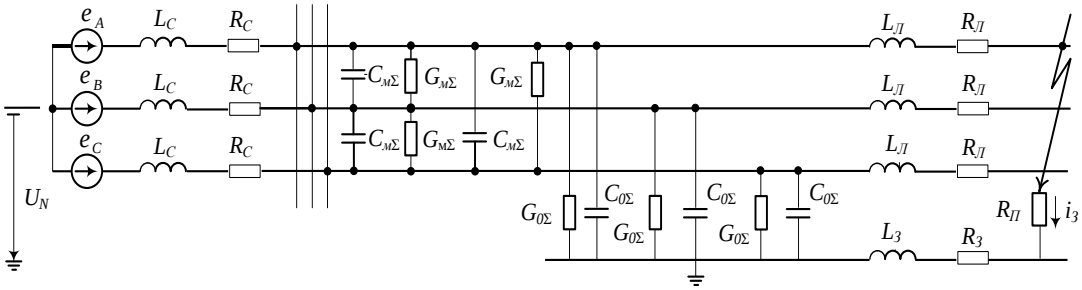


Рисунок 1.3 – Двухчастотная схема замещения кабельной сети 6-10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ, предложенная в [16]

Решение, полученное в [47, 51] на основе схемы замещения по рис. 1.3 с использованием метода симметричных составляющих, для напряжения нулевой последовательности $u_0(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} u_0(t) &= u_N(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) + \\ &+ E_m a_1 e^{-\delta_P t} \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2\varphi + \omega_p^2 \sin^2\varphi}}{\omega_p}\left[1 - \frac{U_N(0)}{E_m \sin\varphi}\right] \cdot \sin(\omega_P t + \varphi_p) + \\ &+ E_m a_2 e^{-\delta_З t} \frac{\sqrt{\omega^2 \cos^2\varphi + \omega_з^2 \sin^2\varphi}}{\omega_з}\left[1 - \frac{U_N(0)}{E_m \sin\varphi}\right] \cdot \sin(\omega_З t + \varphi_з); \end{aligned} \tag{1.1}$$

$$\omega_{P,З} = \tfrac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{k_c\omega_1^2 + \omega_2^2 \pm \sqrt{k_c^2\omega_1^4 + \omega_2^4 + (2k_c - 4)\omega_1^2\omega_2^2}}\ ; \tag{1.2}$$

$$\delta_{P,З} = \alpha \frac{\omega_{P,З}^2 - \omega_2^2}{2(2\omega_{P,З}^2 - \omega_2^2 - k_c\omega_1^2)}; \tag{1.3}$$

$$i_з^{(1)}(t) = 3i_{0з} = 3C_{0\Sigma}\frac{du_0(t)}{dt}, \tag{1.4}$$

где $\omega_р$, $\omega_з$, $\delta_р$, $\delta_з$ – соответственно угловые частоты и коэффициенты затухания разрядной и зарядной свободных составляющих переходного процесса; E_m – амплитуда фазной ЭДС; φ – начальная фаза пробоя изоляции;

$a_1 = \frac{\omega_1^2 - \omega_З^2}{\omega_P^2 - \omega_З^2}$; $a_2 = \frac{\omega_1^2 - \omega_P^2}{\omega_З^2 - \omega_P^2}$; $\varphi_р = arctg\frac{\omega_р \sin\varphi}{\omega\cos\varphi + \delta_р \sin\varphi}$; $\varphi_з = arctg\frac{\omega_з \sin\varphi}{\omega\cos\varphi + \delta_з \sin\varphi}$;

$\omega_1^2 = 1/L_1C_1$; $\omega_2^2 = 1/L_2C_2$; $k_с = 1 + C_1/C_2$; $L_1 = 3L_л + L_з$; $C_1 = C_{0\Sigma}$; $L_2 = 2L_С$; $C_2 = 0{,}5(C_{0\Sigma} + 3C_{м\Sigma})$; $R_1 = 3R_л + R_з + 3R_п$.

Анализ точности приведенного аналитического решения был выполнен сравнением результатов расчета переходного процесса при ОЗЗ по уравнениям (1.1) – (1.4) и решения, полученного с использованием имитационной модели, более точно учитывающей конфигурацию кабельной сети (рис. 1.4).

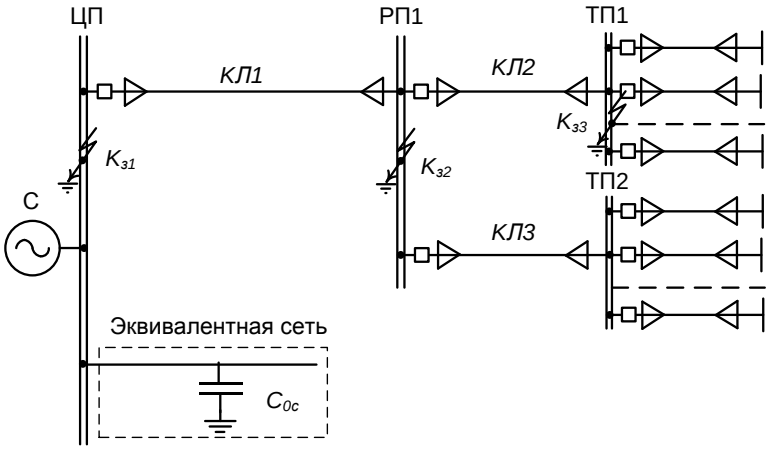


Рисунок 1.4 – Схема имитационной модели кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 30 А для оценки точности аналитического решения по уравнения (1.1) – (1.4)

Исследования показали, что аналитическое решение по уравнениям (1.1) – (1.4) обеспечивает приемлемую точность расчетов переходного процесса только при ОЗЗ в конце линии. При ОЗЗ в промежуточных точка КЛ возникают погрешности, обусловленные влиянием не учитываемых в схеме замещения по рис. 1.4 емкостей участка КЛ или сети (например, РП или ТП с отходящими КЛ) за местом повреждения. На рис. 1.5 в качестве примера

приведены расчетные осциллограммы переходного напряжения $u_0(t)$ и переходного тока в месте ОЗЗ $i_з^{(1)}(t)$ для кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 30 А при ОЗЗ в промежуточной точке $K_{з2}$. Анализ на имитационной модели сети показал, что указанные емкости приводят к появлению дополнительных высокочастотных разрядных составляющих. Дополнительные высокочастотные разрядные составляющие приводят к "зашумлению" разрядного тока, однако практически не оказывают влияния на частоту и амплитуду основной разрядной составляющей. Поэтому при расчете основной разрядной составляющей влиянием емкостей сети, расположенных за местом ОЗЗ, можно пренебречь. Однако влиянием этих емкостей нельзя пренебрегать при расчете зарядной и принужденной составляющей переходных токов и напряжений.

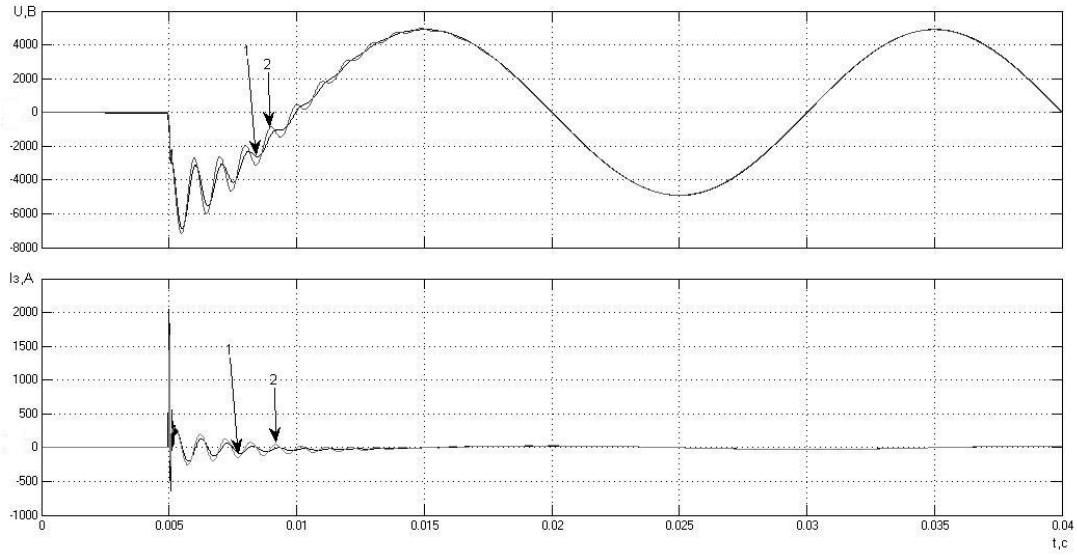


Рисунок 1.5 – Расчетные осциллограммы напряжения $u_0(t)$ и переходного тока $i_з^{(1)}(t)$ при ОЗЗ в промежуточной точке КЛ $K_{з2}$: 1 – расчет на имитационной модели; 2 – расчет по уравнениям (1.1) – (1.4)

Расчетную схему замещения сети, обеспечивающую учет влияния указанных емкостей, можно представить в виде, показанном на рис. 1.6.

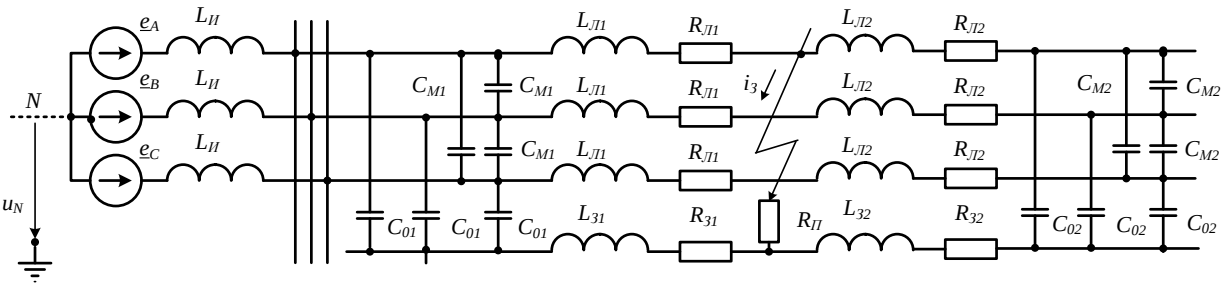


Рисунок 1.6 – Расчетная схема замещения сети 6-10 кВ, учитывающая влияние емкостей элементов, расположенных за местом ОЗЗ

Переходный процесс при ОЗЗ в схеме по рис. 1.6 описывается дифференциальным уравнением 6-го порядка (для сети с изолированной нейтралью), т.е. предложенная схема замещения является трехчастотной, и получение аналитического решения для нее в общем виде весьма громоздко. Для упрощения аналитического решения предлагается модифицированная методика расчета переходного процесса при ОЗЗ, позволяющая свести расчеты переходного процесса по схеме замещения рис. 1.6 к двум последовательным расчетам по двухчастотной схеме замещения рис. 1.3.

Для приведения схемы по рис. 1.6 к двухчастотной при расчете основной разрядной составляющей продольные сопротивления линии и емкости элементы сети, расположенные справа от места ОЗЗ ($L_{Л2}$, L_{32}, $R_{Л2}$, R_{32}, C_{02}, C_{M2}) не учитываются, т.е. принимается, что в уравнениях (1.1) – (1.4) $C_{0\Sigma} = C_{01}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1}$, а при расчетах по тем же уравнениям зарядной составляющей емкости сети, подключенные к шинам источника питания, определяются как сумма емкостей, расположенных по обе стороны от места повреждения: $C_{0\Sigma} = C_{01} + C_{02}$, $C_{M\Sigma} = C_{M1} + C_{M2}$.

На рис. 1.7 приведены расчетные осциллограммы переходного тока в месте ОЗЗ, полученные на имитационной модели сети по рис. 1.5 и по уравнениям (1.1) – (1.4) с использованием предложенной методики.

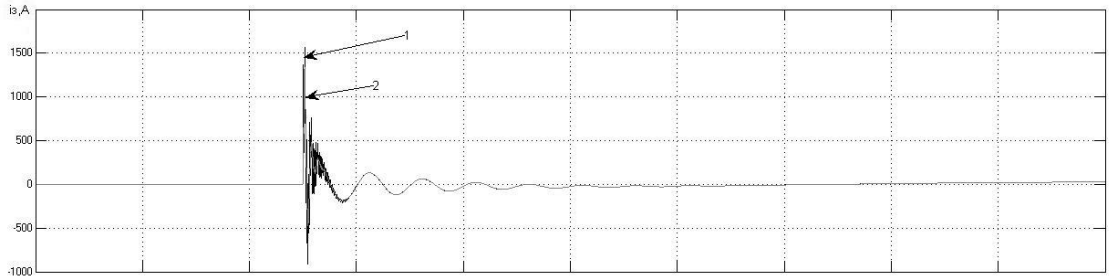


Рисунок 1.7 – Расчетные осциллограммы переходного тока в месте повреждения $i_з^{(1)}(t)$ при ОЗЗ в промежуточной точке КЛ $K_{з2}$(рис. 1.4): 1 – расчет на имитационной модели; 2 – расчет по уравнениям (1.1) – (1.4)

Сравнение расчетных осциллограмм переходного тока $i_з^{(1)}(t)$ на рис. 1.5 и 1.6 показывает, что предложенная методика повышает точность расчетов переходного процесса при ОЗЗ с применением аналитического решения для двухчастотной схемы замещения и расширяет область его применения.

Отметим, что точность расчетов переходного процесса при ОЗЗ по предложенной методике можно дополнительно увеличить, если учесть, что на устойчивость функционирования защит от ОЗЗ практически оказывают влияние только разрядные составляющие в спектре частот до 2 кГц. Последнее связано с тем, что в современных микропроцессорных исполнениях устройств РЗА применяются АЦП с частотой дискретизации $f_д$ = 4 кГц. Из рис. 1.8 можно видеть, что применение входных фильтров для выделения из сигналов тока и напряжения составляющих с частотами $f \leq 2$ кГц повышает точность расчетов электрических величин переходного процесса при ОЗЗ.

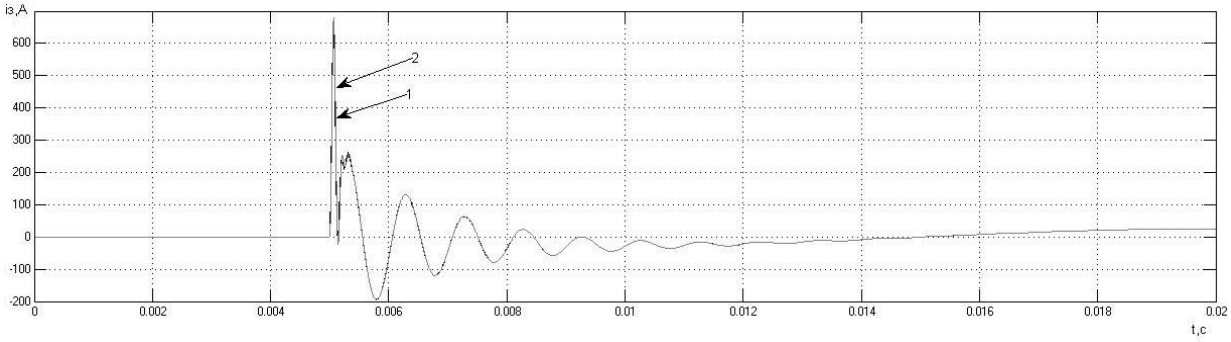


Рисунок 1.8– То же самое, что и на рис. 1.7, но сигналы переходного тока $i_з^{(1)}(t)$, полученные на имитационной модели сети и по уравнениям (1.1) – (1.4) с использованием методики раздельного расчета разрядной и зарядной составляющих, пропущены через ФНЧ с частотой среза 2 кГц

1.2.2 Имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных процессов при однофазных замыканиях на землю и методика их эквивалентирования

1.2.2.1 **Методы исследований переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, используемые в работе.** В настоящее время имитационное моделирование на ЭВМ является наиболее мощным средством количественного анализа переходных процессов в ЭЭС, в т.ч и в электрических сетях среднего напряжения при ОЗЗ. Современные системы моделирования на ЭВМ, например, программа Simulink с пакетом расширения SimPowerSystem для моделирования электротехнических устройств, программный комплекс для моделирования энергосистем PSCAD, программно-аппаратный комплекс для моделирования энергосистем RTDS [106–109] и др., позволяют создавать модели ЭЭС, электрических сетей и их объектов практически любой сложности. В данной работе для исследований переходных процессов при ОЗЗ и динамических режимов функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит применялись имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ, разработанные в программе Simulink с пакетом расширения SimPowerSystem [например, 106, 107 и др.].

Большое число факторов, влияющих на форму и значения электрических величин переходного процесса, и широкий диапазон изменения многих из них приводят к тому, что с применением метода имитационного моделирования можно проанализировать лишь ограниченную часть из большого числа расчетных вариантов, соответствующих конкретным сочетаниям влияющих факторов. Эффективность имитационного моделирования на ЭВМ можно существенно повысить, если из множества влияющих факторов и их сочетаний предварительно приближенными аналитическими методами выделить основные влияющие факторы и определить требуемый диапазон их изменения. Поэтому более эффективным методом исследования переходных процессов при ОЗЗ является сочетание рассмотренного выше аналитического решения рассматриваемой задачи на основе двухчастотной схемы замещения с применением предложенной

методики повышения точности расчетов и имитационного моделирования на ЭВМ.

1.2.2.2 **Полные имитационные модели кабельных сетей 6–10 кВ систем промышленного и городского электроснабжения.** Разработанные в системе моделирования Simulink трехфазные имитационные модели учитывают рассмотренные выше основные особенности схем кабельных сетей 6–10 кВ различного назначения (рис. 1.1 и 1.2).

Модель кабельной сети 6–10 кВ промышленного электроснабжения содержит три основных типа присоединений, подключенных к шинам ЦП (рис. 1.9):

– присоединение с древовидной структурой, в состав которого входят КЛ, питающая РП (секцию РП), КЛ, питающие ТП (секции ТП) и радиальные распределительные КЛ, подключенные к шинам ТП и питающие приемные понизительные трансформаторы 6-10/0,4 кВ и/или высоковольтные электродвигатели;

– присоединение древовидной структуры, в состав которого входят КЛ, питающая ТП (секцию ТП), и распределительные КЛ, подключенные к шинам ТП и питающие приемные трансформаторы 6-10/0,4 кВ и/или высоковольтные электродвигатели;

– радиальная тупиковая КЛ, питающая ТП 6-10/0,4 кВ.

Модель кабельной сети 6–10 кВ городского электроснабжения содержит три основных типа присоединений, подключенных к шинам ЦП (рис. 1.10):

– присоединение с древовидной структурой, в состав которого входят КЛ, питающая РП (секцию РП), и распределительные магистральные КЛ, подключенные к шинам РП и питающие ТП 6–10/0,4 кВ;

– магистральная распределительная КЛ, подключенная к шинам ЦП;

– радиальная тупиковая КЛ, питающая ТП 6–10/0,4 Кв.

При параметрировании моделей использовались значения параметров кабельных сетей 6–10 кВ, приведенные в табл. 1.1 и 1.2.

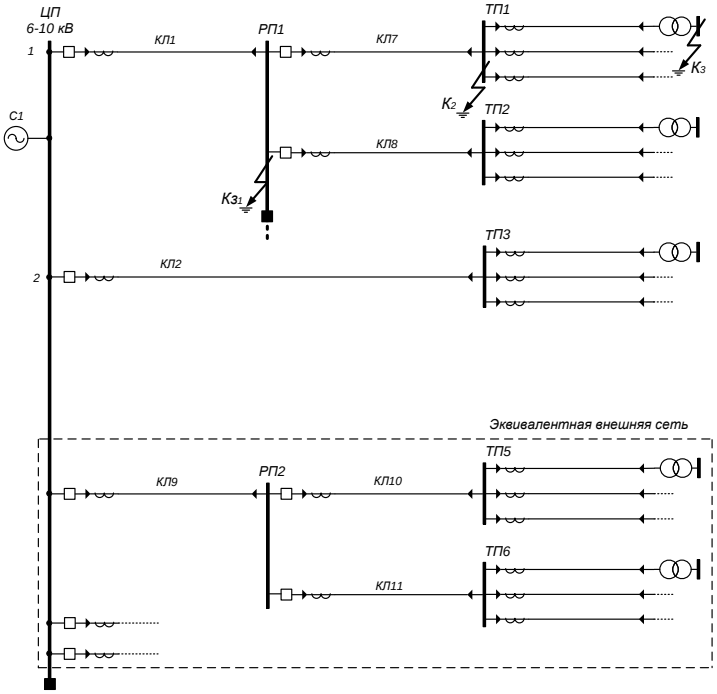


Рисунок 1.9 – Однолинейная схема модели кабельной сети 6–10 кВ системы электроснабжения промышленного предприятия и принцип ее эквивалентирования

1.2.2.3 **Эквивалентирование имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ.** Достаточно высокая сложность трехфазных имитационных моделей, выполненных в программе Simulink по схемам рис. 1.9 и 1.10, приводит к значительному увеличению затрат времени на проведение вычислительных экспериментов, обработку и анализ их результатов. Поэтому при исследованиях переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ возникает практическая необходимость в обоснованных упрощениях имитационной модели исследуемого объекта, не приводящих к существенной потере точности результатов.

Требования к точности расчетов переходных процессов при ОЗЗ в целях оценки их влияния на устойчивость функционирования защит от данного вида повреждений зависят от того, какие параметры переходных токов и напряжений или их соотношений используются в качестве воздействующих величин или влияют на значения последних. Точность расчетов мгновенных значений электрических величин переходного процесса в начальной стадии ОЗЗ имеет существенное значение только для импульсных направленных защит, основанных на контроле соотношений знаков первых полуволн переходного тока $3i_0(t)$ и напряжения $3u_0(t)$ нулевой последовательности или

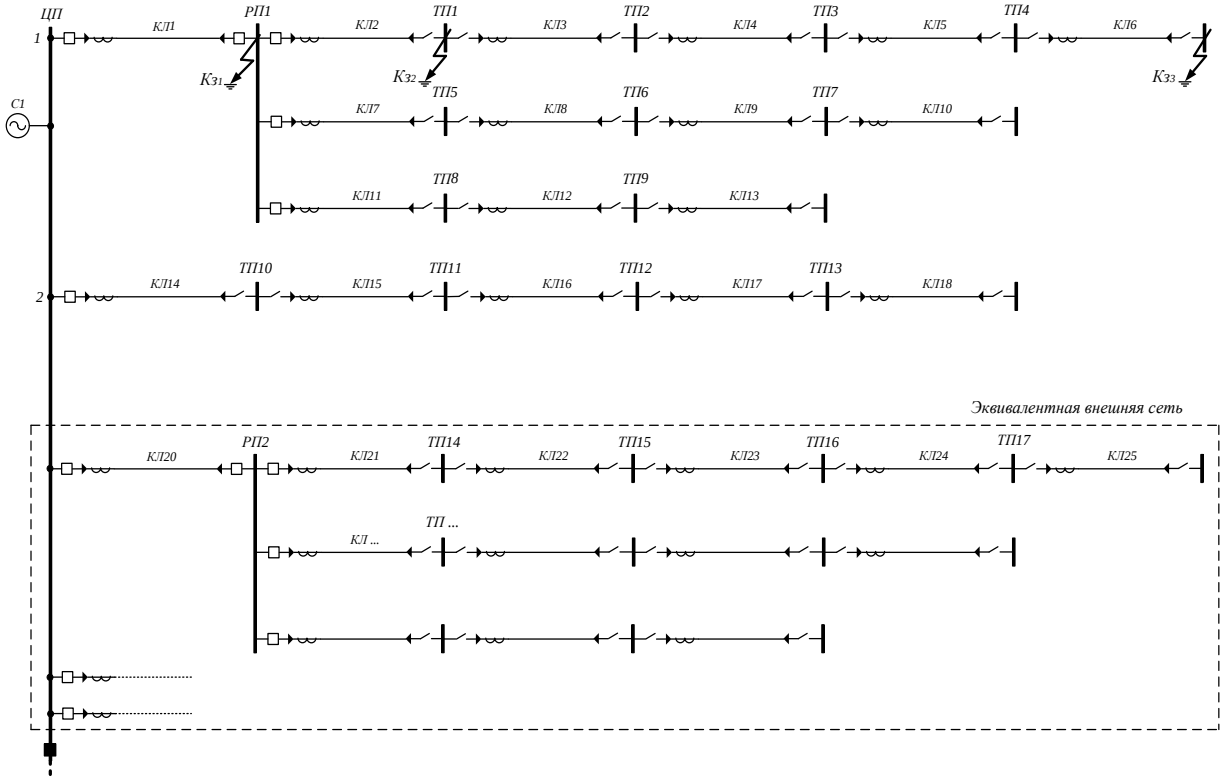


Рисунок 1.10 – Однолинейная схема модели кабельной сети 6–10 кВ системы городского электроснабжения и принцип ее эквивалентирования

знака мгновенной мощности нулевой последовательности $p_0(t) = 3u_0(t) \cdot 3i_0(t)$ в момент возникновения ОЗЗ (например, устройства типа ИЗС-1, УЗС-01, ТОР 110-ИЗН, КЗЗП, «Импульс» и др. [18, 26, 27, 47, 105, 110–122]), а также для централизованных импульсных устройств защиты от ОЗЗ, основанных на сравнении амплитуд переходных токов в присоединениях защищаемого объекта (например, устройств типа «Земля», СЗВИ, «Феррит» и др. [123–125 и др.]). Однако опыт эксплуатации устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании соотношений мгновенных значений электрических величин переходного процесса или амплитуд переходных токов, показал не всегда достаточную устойчивость их функционирования, и в настоящее время из устройств защит от ОЗЗ указанных выше типов практически применяется только устройство импульсной направленной защиты типа ТОР 110-ИЗН, разработанное ЭНИН и ООО НПП «Релематика» (ИЦ «Бреслер») [26, 27, 118].

Функционирование защит, обеспечивающих свойство непрерывности действия при УОЗЗ, т.е. основанных на использовании различных составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима замыкания (основной частоты 50 Гц, высших гармоник), а также комбинированных защит от ОЗЗ, основанных на использовании как составляющих установившегося режима ОЗЗ, так и электрических величин переходного процесса, как правило, определяется интегральными значениями подведенных величин, например, среднеквадратичным значением тока, отношением среднеквадратичных значений тока и напряжения, средним значением мощности и т.п. на заданном интервале наблюдения за процессом. К таким комбинированным защитам от ОЗЗ, как будет показано ниже, относятся также и исследуемые в данной работе адаптивные токовые и адмитансные защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ. Для таких защит важной является среднеквадратичная погрешность расчетов электрических величин переходного процесса при ОЗЗ с использованием эквивалентированной модели по сравнению с полной моделью исследуемой сети на интервале времени наблюдения (времени срабатывания защиты). Известно, что время существования свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, как правило, не более 10 мс [7, 8, 47 и др.]. Потому при необходимости фиксации устройством защиты однократных пробоев изоляции (КрОЗЗ) время наблюдения $T_н$ за процессом защиты, обладающей непрерывностью действия не только при УОЗЗ, но и в переходных режимах, должно быть не меньше 10 мс. Если перед защитой не ставится задача фиксации однократных пробоев изоляции, то время наблюдения входных величин $T_н$ может быть увеличено. Например, при требовании фиксации только УОЗЗ $T_н$, как правило, принимается равным периоду основной частоты T_{50} = 20 мс. При требовании устойчивой фиксации опасных для сети ДПОЗЗ, характеризующихся интервалами времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги до 50–60 мс, время наблюдения входных величин должно быть не меньше 60 мс [23–25]. Таким образом, при требовании фиксации КрОЗЗ и опасных ДПОЗЗ среднеквадратичная погрешность расчетов электрических величин переходного

процесса при ОЗЗ с использованием эквивалентированной имитационной модели по сравнению с полной исходной моделью сети должна оцениваться на интервале времени наблюдения $T_н$ от 10 до ~60 мс.

Вторым важным фактором, определяющим требования к точности расчетов электрических величин переходного процесса с применением эквивалентированных имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, является рабочий диапазон частот, используемый в устройстве защиты от ОЗЗ. В [23, 25, 26] показано, что для защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, а также комбинированных защит, основанных на использовании как составляющих установившегося режима ОЗЗ, так и электрических величин переходного процесса, рабочий диапазон частот целесообразно ограничить верхней частотой $f \leq 2$ кГц. Таким образом, требования к точности расчетов переходных процессов в основном определяются необходимой точностью отображения частотных составляющих переходных токов и напряжений в диапазоне частот до 2 кГц.

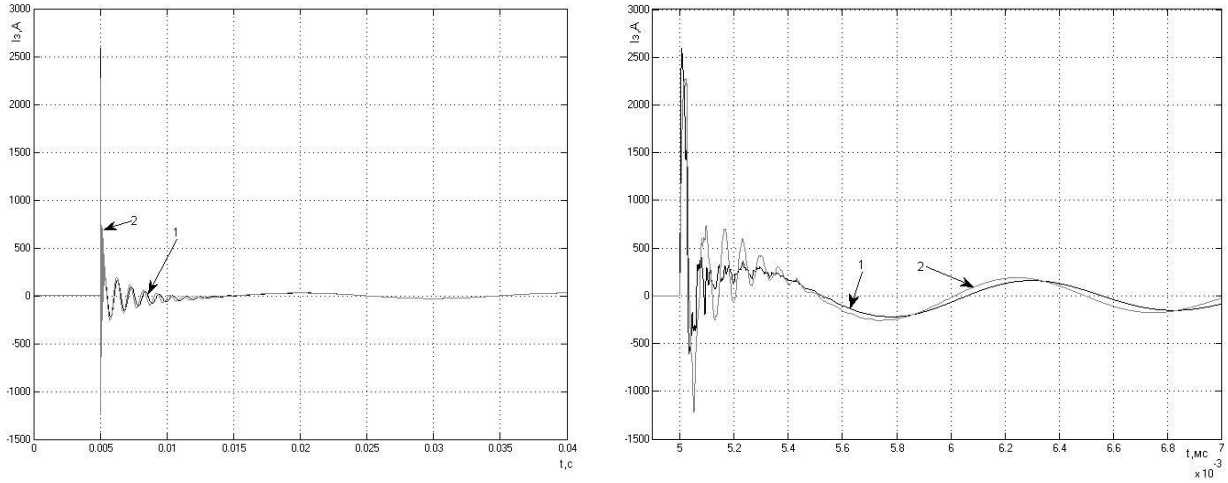
Предлагаемый принцип эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для исследования переходных процессов при ОЗЗ заключается в следующем. Для исследования динамических режимов функционирования защиты от ОЗЗ при внешних и внутренних повреждениях в составе модели достаточно применять точные модели (например, КЛ с распределенными параметрами) только для тех объектов, в которых непосредственно исследуются переходные токи и напряжения (например, для поврежденного и одного из неповрежденных присоединений (например, присоединения 1 и 2 на рис. 1.9 и 1.10), а всю остальную часть сети (внешнюю по отношению к выбранным присоединениям) представить эквивалентной упрощенной схемой замещения. Учитывая, что переходные токи ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ в диапазоне частот до 1,5–2 кГц сохраняют практически емкостный характер [23], в качестве упрощенного эквивалента для внешней сети при решении задач, связанных с разработкой устройств защиты от ОЗЗ, работающих в указанном частотном диапазоне, можно принять схему замещения, состоящую из емкостей и активных проводимостей фаз на землю $C_{0Э}$ и $G_{0Э}$ и емкостей и активных прово-

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

Сравнение результатов расчетов переходных токов и напряжений при ОЗЗ, полученных с использованием полных (рис. 1.9 и 1.10) и эквивалентированных имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ, показали, что рассмотренный способ эквивалентирования в большинстве случаев обеспечивает приемлемую точность расчета не только среднеквадратичных, но и амплитудных значений разрядной составляющей и практически точный расчет зарядной составляющей тока в месте повреждения $i_з^{(1)}(t)$ и напряжения на шинах $u_0(t)$, но также переходных токов нулевой последовательности $3i_{0\,пов}(t)$ и $3i_{0\,нен}(t)$ в поврежденном и неповрежденных присоединениях.

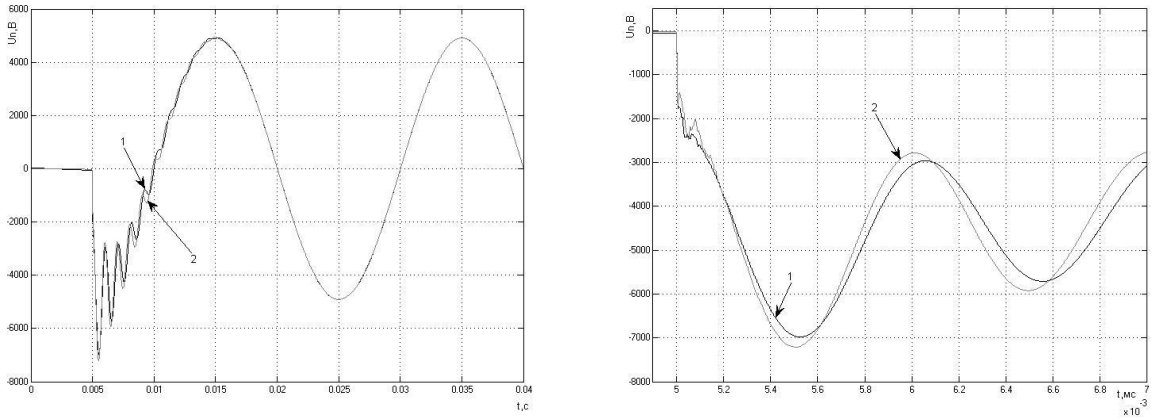
На рис. 1.11 и 1.12 в качестве иллюстрации дано сравнение расчетных осциллограмм переходных токов в месте и переходных напряжений в нейтрали сети по полной и эквивалентированной схемам имитационных моделей кабельной сети по рис. 1.9. Из расчетных осциллограмм переходного тока ОЗЗ (рис. 1.11, б) можно видеть, что эквивалентирование дает заметные погрешности по мгновенным значениям разрядной составляющей в начальной стадии переходного процесса, имеющей в кабельных сетях 6–10 кВ длительность порядка сотен микросекунд, только при повреждениях на шинах или вблизи шин.

Погрешности расчета мгновенных значений напряжения $u_0(t)$ даже на разрядной стадии не превышают единиц процентов (рис. 1.12, б). При увеличении расстояния $l_з$ до места ОЗЗ, а также переходного сопротивления в месте повреждения погрешности расчета разрядной составляющей тока и напряжения нулевой последовательности с использованием эквивалентированной модели быстро уменьшаются и уже при $l_з$ порядка десятков метров не превышают ~10%.



а) **б)**

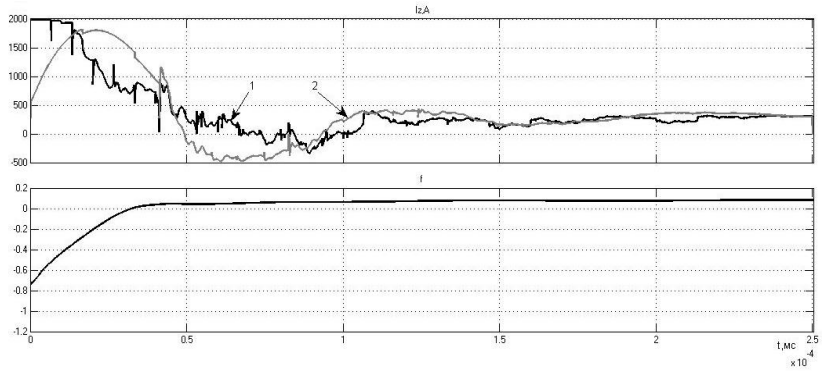
Рисунок 1.11 – Расчетные осциллограммы переходного тока в месте повреждения при ОЗЗ на шинах ЦП кабельной сети промышленного электроснабжения по рис. 1.9 $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{C\Sigma}$ = 30 А: а – полный ток переходного процесса в месте ОЗЗ; б – детализация разрядной составляющей: 1 – полная имитационная модель; 2 – эквивалентированная модель



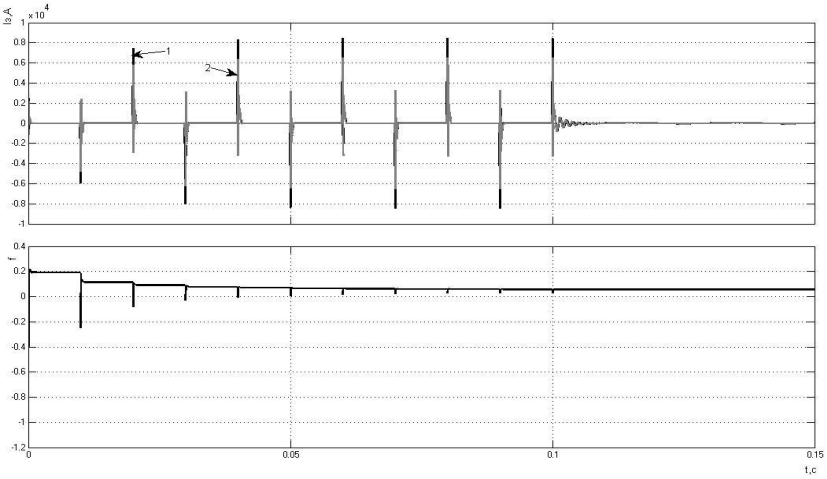
а) **б)**

Рисунок 1.12 – Расчетные осциллограммы переходного напряжения в нейтрали сети $u_N(t) = u_0(t)$ при ОЗЗ на шинах ЦП кабельной сети по рис. 1.9 с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{C\Sigma}$ = 30 А: а – полный ток переходного процесса в месте ОЗЗ; б – детализация разрядной составляющей: 1 – полная имитационная модель; 2 – эквивалентированная модель

На рис. 1.13 приведены результаты оценок текущего значения среднеквадратичной погрешности для разрядной стадии переходного процесса (рис. 1.13, а) и при ДПОЗЗ с повторными зажиганиями заземляющей дуги через каждые 10 мс (теория W. Petersen [13]).



а)



б)

Рисунок 1.13 – Расчетные осциллограммы переходного тока в месте повреждения при ОЗЗ на шинах ЦП кабельной сети по рис. 1.9 с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 30 А и среднеквадратичная погрешность на интервале существования кривой: а – детализация разрядной составляющей; б – дуговое перемежающееся замыкание: 1 – полная имитационная модель; 2 – эквивалентированная модель

Из рис. 1.13, а можно видеть, что среднеквадратичная погрешность по разрядной составляющей переходного тока при $T_н$ > 0,5 мс составляет примерно 5%. При ДПОЗЗ (рис. 1.13, б) среднеквадратичная погрешность по току при $T_н$ > 10 мс на всем интервале существования дугового замыкания не превышает 10–12%. Известно [16, 17], что в технике релейной защиты погрешности расчета тока КЗ (периодической составляющей) и тока ОЗЗ в установившемся режиме замыкания учитываются при выборе уставок в значениях коэффициента отстройки $K_{отс}$ и при оценке чувствительности в значениях коэффициента чувствительности $K_{ч.мин}$ и приближенно принимаются равными порядка 5–10%. Таким образом, расчеты переходных токов и напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с

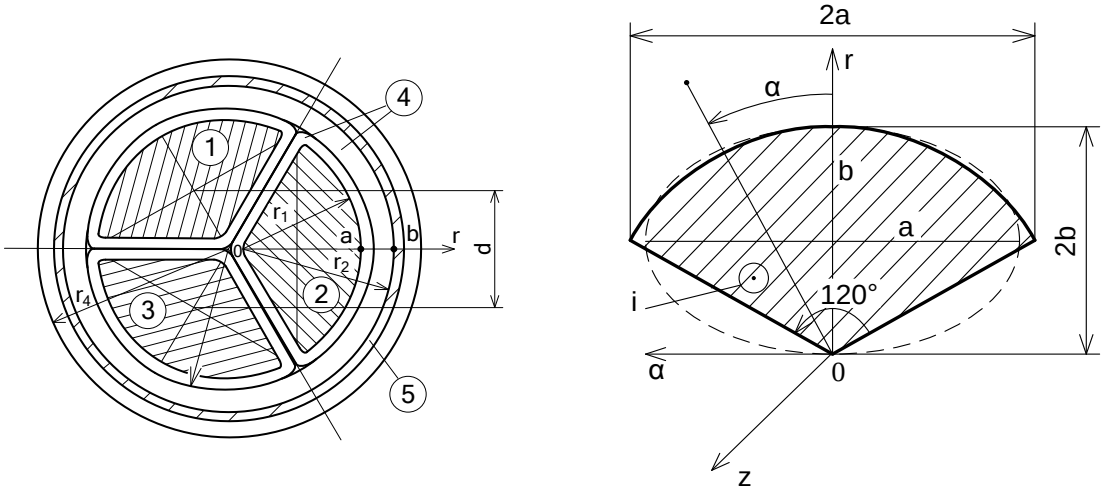
использованием эквивалентированных имитационных моделей позволяют обеспечить приемлемые в аспекте выбора уставок срабатывания и оценки чувствительности устройств защиты от данного вида повреждений значения среднеквадратичной погрешности.

1.3 Анализ влияния частотных характеристик трехжильных кабелей 6–10 кВ на точность расчетов переходных процессов при замыканиях фазы на землю

1.3.1 Методика определения частотных характеристик трехжильных кабелей напряжением 6 – 10 кВ

1.3.1.1 **Постановка задачи.** В разделе 1.2 было показано, что высокочастотная разрядная составляющая в значительной мере определяет и среднеквадратичное значение переходного тока как в месте повреждения, так и в поврежденной и неповрежденных КЛ при ДПОЗЗ. Известно, что индуктивности и активные сопротивления жил и оболочки трехжильных кабелях в общем случае зависят от частоты протекающего по ним тока. В то же время в большинстве публикаций и работ, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ зависимости продольных параметров кабельных линий от частоты не учитываются (например, [7, 9, 18, 23, 27, 29, 35, 47, 51, 97, 99, 102 – 105 и др.]), что может приводить к дополнительным погрешностям в оценке значений переходных токов как при моделировании на ЭВМ, так и при приближенных аналитических расчетах. Учитывая изложенное, для обоснования параметров моделей трехжильных КЛ 6–10 кВ, применяемых при расчетах переходных процессов при ОЗЗ, представляет интерес анализ зависимости продольных параметров кабеля, прежде всего индуктивности, от частоты протекающего по нему тока.

1.3.1.2 **Схема замещения и уравнения элементарного участка трехжильного кабеля.** Схематичное изображение сечения трехжильного кабеля и одной из его жил показано на рис. 1.14, а и б.



а) б)

Рисунок 1.14 – Основные элементы конструкции трехжильного кабеля 6-10 кВ (а) и форма сечения одной из его жил (б): 1, 2, 3 – жилы; 4 – изоляция; 5 – оболочка; *a, b* – полуоси эллипса; *r, α, z* – цилиндрические координаты точки наблюдения

Эквивалентная индуктивность жил кабеля зависит не только от геометрии системы (рис. 1.14), в частности, от взаимного расположения рассматриваемого провода (жилы кабеля) по отношению к другим, но и от соотношений токов трехфазной системы. Практический интерес представляют два случая:

1) ток в оболочке $i_{об} = -(i_1 + i_2 + i_3) = -3i_0 \neq 0$ (в фазных токах содержатся составляющие нулевой последовательности, что имеет место при ОЗЗ);

2) ток в оболочке $i_{об} = -(i_1 + i_2 + i_3) = -3i_0 = 0$, что имеет место в любых режимах без ОЗЗ.

При расчетах переходных процессов при ОЗЗ необходимо знать удельные (на единицу длины линии) индуктивности контура "фаза – фаза" ("жила – оболочка") и контура "фаза – земля" ("жила – жила") или контуров прямой (обратной) и нулевой последовательности, используемые при задании параметров моделей трехфазных линий электропередачи с распределенными и сосредоточенными параметрами в большинстве систем моделирования (например, Simulink).

Схему замещения элементарного участка трехжильного кабеля длиной *dx* можно представить в виде, показанном на рис. 1.15.

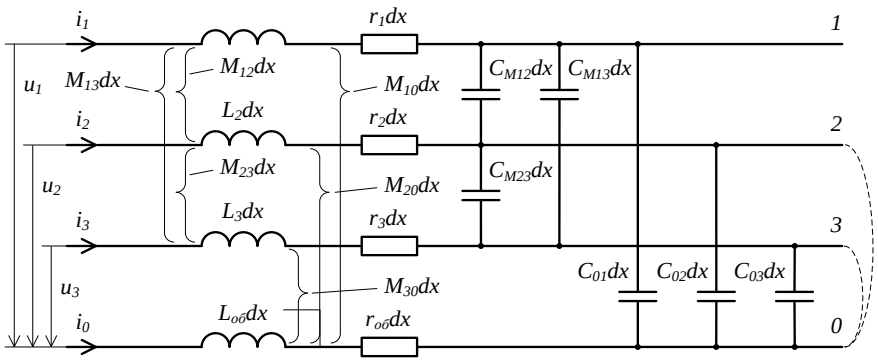


Рисунок 1.15 – Схема замещения элементарного участка трехжильного кабеля длиной *dx*

На схеме рис. 1.15: L_1, L_2, L_3 – удельные собственные индуктивности жил; M_{12}, M_{23}, M_{31} – взаимные индуктивности жил; $L_{об}$ – индуктивность оболочки, M_{10}, M_{20}, M_{30} – взаимные индуктивности между жилами и оболочкой.

Для токов и индуктивных составляющих напряжений фаз 1, 2 и 3 в схеме замещения рис. 1.15 справедливы следующие уравнения:

$$u_1 = (L_1 + L_{об} - 2M_{10})\frac{di_1}{dt} + (L_{об} + M_{12} - 2M_{20})\frac{di_2}{dt} + \\ +(L_{об} + M_{13} - 2M_{30})\frac{di_3}{dt}; \quad (1.5)$$

$$u_2 = (L_{об} + M_{12} - 2M_{10})\frac{di_1}{dt} + (L_2 + L_{об} - 2M_{20})\frac{di_2}{dt} + \\ +(L_{об} + M_{23} - 2M_{30})\frac{di_3}{dt}; \quad (1.6)$$

$$u_3 = (L_{об} + M_{13} - 2M_{10})\frac{di_1}{dt} + (L_{об} + M_{23} - 2M_{20})\frac{di_2}{dt} + \\ +(L_3 + L_{об} - 2M_{30})\frac{di_3}{dt}. \quad (1.7)$$

Для трехжильных силовых кабелей, обладающих достаточно высокой степенью симметрии жил, можно принять, что

$$L_1 = L_2 = L_3 = L; \quad (1.8)$$

$$M_{12} = M_{13} = M_{23} = M. \quad (1.9)$$

$$M_{10} = M_{20} = M_{30} = M_0. \qquad (1.10)$$

Для упрощения методики определения параметров прямой и нулевой последовательности по трехфазной схеме замещения кабеля взаимные индуктивности между жилой и оболочкой удобно включить в индуктивность оболочки. Суммируя (1.5) – (1.7), для индуктивной составляющей напряжения $3u_0$ и тока нулевой последовательности $3i_0$ получим следующее уравнение

$$\begin{aligned} 3u_0 &= u_1 + u_2 + u_3 = (L + 3L_{об} + 2M - 6M_0)\frac{d(i_1 + i_2 + i_3)}{dt} = \\ &= (L + 3L_{об} + 2M - 6M_0)\frac{d3i_0}{dt} = L_0\frac{d3i_0}{dt}, \end{aligned} \qquad (1.11)$$

где

$$L_0 = (L + 3L_{об} + 2M - 6M_0) \qquad (1.12)$$

– индуктивность контура нулевой последовательности.

При $i_{об} = -(i_1 + i_2 + i_3) = -3i_0 = 0$, когда в токах фаз содержатся только составляющие прямой и обратной последовательности, эквивалентная индуктивность жилы для указанных составляющих равна

$$L_{1,2} = L - M. \qquad (1.13)$$

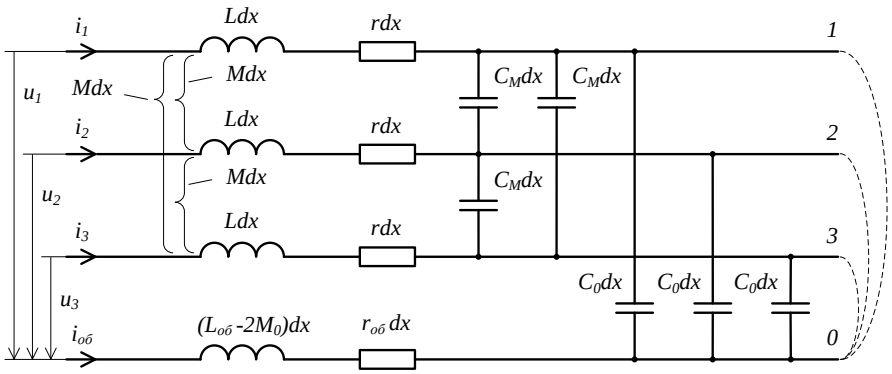
Полные индуктивности контуров "жила – жила" и "жила – оболочка" определяются выражениями:

$$L_{ж-ж} = 2L - 2M; \qquad (1.14)$$

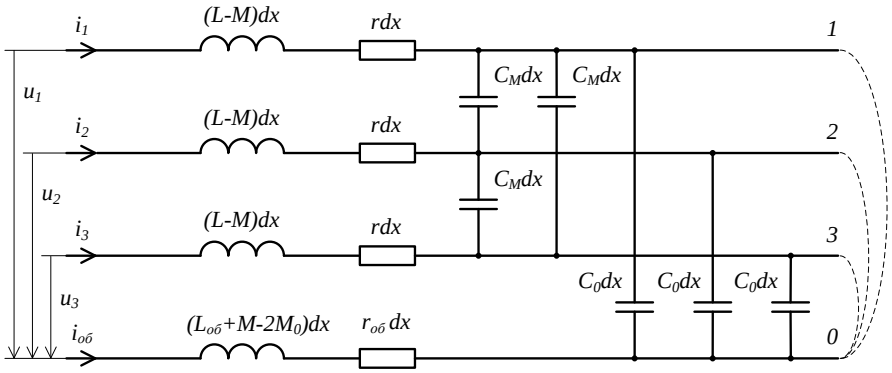
$$L_{ж-об} = L + L_{об} - 2M_0. \qquad (1.15)$$

С учетом (1.12) – (1.15) схему замещения элементарного участка трехжильного кабеля длиной dx по рис. 1.15 можно преобразовать к виду, показанному на рис. 1.16, а или 1.16, б. Из выражений (1.11) и (1.12) и (1.14) и (1.15) можно видеть, что для расчета частотных характеристик индуктивностей прямой (обратной) и нулевой последовательности и частотных характеристик индуктивных элементов схемы замещения трехжильного кабеля по рис. 1.16, б необходимо определить зависимости от частоты полной индуктивности контура "жила – оболочка" $L_{ж-об}(\omega) = L(\omega) + L_{об}(\omega) - 2M_0(\omega)$ и контура "жила - жила" $L_{ж\text{-}ж}(\omega) = L(\omega) - 2M(\omega)$. Для определения частотных характеристик индуктивных элементов эквивалентной схемы замещения по

рис. 1.16, а необходимо дополнительно определить взаимную индуктивность между жилами M или собственную индуктивность жилы L.



а)



б)

Рисунок 1.16 – Варианты представления эквивалентной схемы замещения элементарного участка трехжильного кабеля длиной dx

1.3.1.3 **Определение индуктивности контура "жила - оболочка" $L_{ж\text{-}об}$.** Полную индуктивность контура, включающего k-ю жилу и оболочку, можно определить из выражения

$$L_{k\,ж-об} = L_{ke} + L_{ki} + L_{об.i} \ (k = 1, 2, 3), \qquad (1.16)$$

где L_{ke} – внешняя индуктивность, обусловленная магнитным потоком между жилой и оболочкой (например, для жилы 2 на рис. 1.14 – потоком Φ_{ab}); L_{ki} и $L_{об.\,i}$ – соответственно внутренняя индуктивность жилы и внутренняя индуктивность оболочки, обусловленные магнитными потоками внутри указанных проводов.

Таким образом, для определения частотной характеристики индуктивности контура "жила – оболочка" необходимо определить зависимости от час-

тоты его внешней индуктивности $L_{ke}(\omega)$, внутренней индуктивности оболочки $L_{об.i}(\omega)$ и внутренней индуктивности жилы кабеля $L_{ki}(\omega)$.

1.3.1.4 **Определение внутренней индуктивности оболочки $L_{об\,i}(\omega)$.** Точное решение данной задачи имеется только для оболочки, представляющей собой полый провод круглого сечения. Согласно [126] для цилиндрической оболочки с радиусами r_3 и r_4 (рис. 1.14, б) при постоянном токе и низкой частоте индуктивность вычисляется по формуле

$$L_{об.i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left(\frac{r_3^4}{r_4^2 - r_3^2} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3} \cdot + \frac{r_4^2 - 3 \cdot r_3^2}{4 \cdot (r_4^2 - r_3^2)} \right), \qquad (1.17)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Частотную характеристику собственной индуктивности оболочки $L_{об.\,i}(\omega)$ целесообразно определять совместно с ее активным сопротивлением $r_{об}(\omega)$, необходимым, как и индуктивность, для построения модели кабеля. Для этого воспользуемся выражением, полученным в [127] для комплексного сопротивления оболочки $\underline{Z}_{об}(\omega) = r_{об}(\omega) + j\omega L_{об}(\omega)$:

$$\underline{Z}_{об.i}(\omega) = r_{об.i}(\omega) + j\omega L_{об.i}(\omega) = \frac{k \cdot \rho}{2\pi \cdot r_4} \cdot \frac{I_0(k \cdot r_4) \cdot H_1^{(1)}(k \cdot r_3) - H_0^{(1)}(k \cdot r_4) \cdot I_1(k \cdot r_3)}{I_1(k \cdot r_4) \cdot H_1^{(1)}(k \cdot r_3) - H_1^{(1)}(k \cdot r_4) \cdot I_1(k \cdot r_3)}, \qquad (1.18)$$

где $k = \sqrt{-j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}$, $\omega = 2\pi f$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\rho = \frac{1}{\gamma}$ – удельное сопротивление провода; γ – удельная проводимость провода; $I_0(\zeta)$, $I_1(\zeta)$ – функции Бесселя 1-го рода нулевого и первого порядков, $H_0^{(1)}(\zeta)$ и $H_1^{(1)}(\zeta)$ – функции Ханкеля 1-го рода нулевого и первого порядков.

Внутренняя индуктивность оболочки равна мнимой части выражения (1.18), деленной на $j\omega$.

1.3.1.5 **Определение внутренней индуктивности жилы L_{ki}.** Геометрически жила кабеля очень точно аппроксимируется эллипсом с полуосями *a, b* (рис. 1.14, б). Согласно [126] при постоянном токе и при низкой частоте внутренняя индуктивность жилы эллиптического сечения определяется выражением:

$$L_{ki}(0) = \frac{\mu_0}{8\pi}. \qquad (1.19)$$

При резко выраженном поверхностном эффекте, т.е. в случаях, когда эквивалентная глубина проникновения

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}} << a, b \qquad (1.20)$$

где $\omega = 2\pi f$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$; γ – удельная проводимость провода жилы, расчет производится по формуле

$$L_{ki} = \frac{1}{\pi^2 \cdot a} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{2 \cdot \omega \cdot \gamma}} K(k^2), \qquad (1.21)$$

где K – полный эллиптический интеграл первого рода с модулем $k = b/a$.

К сожалению, формула (1.21) не применима при частотах 50 < f < < 5000 Гц, т.е. для большинства наиболее важных технических приложений расчетов переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6 – 10 кВ. Приближенное решение данной задачи можно найти на основе теоремы о потоке электромагнитной энергии [128], если рассматривать жилу эллиптического сечения как жилу кругового сечения, периметр которой совпадает с периметром эллипса, что имеет место [129] при ее радиусе

$$r_э = \frac{3}{2} \cdot \frac{a+b}{2} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{a \cdot b}. \qquad (1.22)$$

В этом случае при $\Delta << r_э$ индуктивность жилы вычисляется по формуле

$$L_{ki} = \frac{X_{ki}}{\omega} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot r_э \cdot \Delta \cdot \gamma} = \frac{1}{2\pi \cdot r_э} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{2 \cdot \omega \cdot \gamma}}. \qquad (1.23)$$

При $r_э \approx \Delta$ (слабовыраженный поверхностный эффект) можно использовать известную методику расчета сопротивлений и индуктивностей круглых проводов [126].

1.3.1.6 **Определение внешней индуктивности жилы L_{ke}.** Эта индуктивность является внешней индуктивностью двухпроводной линии жила-оболочка. В силу того, что не существует силовых линий, полностью примыкающих к поверхностям электродов, расчет точного значения L_{ke} может быть выполнен лишь при расчете магнитного поля всей системы "жила – промежуток – оболочка" (рис. 1.17).

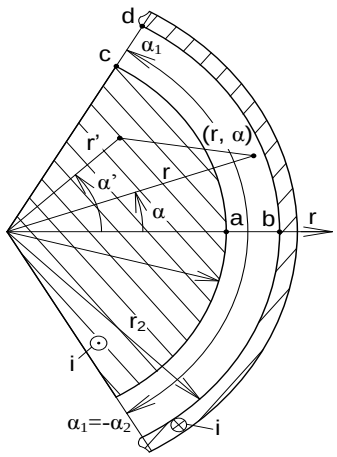


Рисунок 1.17 – Геометрические характеристики промежутка "жила-оболочка"

Ограничиваясь рассмотрением поля в промежутке, определим индуктивность при постоянном токе $L_{ke}(0)$ по формуле:

$$L_{ke}(0)=\frac{\Phi_{\tilde{n}\partial}}{i}=\frac{1}{i}\cdot\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}\frac{\Phi(\alpha)d\alpha}{\alpha_2-\alpha_1};\ \Phi(\alpha)=A(r_1,\alpha)-A(r_2,\alpha), \tag{1.24}$$

где $A=A_z(r,\alpha)$ – векторный магнитный потенциал в промежутке жила-оболочка; Φ_{cp} – среднее значение магнитного потока.

Так как при постоянном токе оболочка не создает магнитного поля в промежутке (по закону полного тока), для $A_z(r,\alpha)$ справедливо выражение:

$$\begin{aligned}A_z&=\frac{\mu_0\cdot\delta}{2\pi}\cdot\int_{o'}^{r_1}\int_{\alpha_1(r')}^{\alpha_2(r')}\ln\frac{1}{\sqrt{r^2+r'^2-2\cdot r\cdot r'\cdot\cos(\alpha-\alpha')}}\cdot r'\cdot dr'\cdot d\alpha'+C=\\&=-\frac{\mu_0\cdot\delta}{2\pi}\int_{o'}^{r_1}r'\cdot dr'\cdot\int_{\alpha_1}^{\alpha_2}\ln\left(r^2\cdot\left[1+\left(\frac{r'}{r}\right)^2-2\cdot\frac{r'}{r}\cdot\cos(\alpha-\alpha')\right]\right)\cdot d\alpha'+C,\end{aligned} \tag{1.25}$$

где $\delta=\dfrac{i}{S_{æ}}=\dfrac{i}{0,5\cdot r_1^2\cdot(\alpha_2-\alpha_1)}$ – плотность тока.

Используя разложение [130]

$$\begin{aligned}\ln\left(1+\left(\frac{r'}{r}\right)^2-2\cdot\frac{r'}{r}\cdot\cos(\alpha-\alpha')\right)&=-2\cdot\left(\frac{r'}{r}\cdot\cos(\alpha-\alpha')+\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{r'}{r}\right)^2\cdot\cos\left[2(\alpha-\alpha')\right]+\right.\\&\left.+\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{r'}{r}\right)^3\cdot\cos\left[3(\alpha-\alpha')\right]+\ldots+\frac{1}{k}\cdot\left(\frac{r'}{r}\right)^k\cdot\cos\left[k(\alpha-\alpha')\right]\right),\end{aligned} \tag{1.26}$$

при вычислении (1.25) получим

$$A_z(r,\alpha)=\frac{\mu_0\cdot\delta\cdot S_{æ}}{2\pi}\cdot\ln\frac{1}{r}+ \tag{1.27}$$

$$+\frac{\mu_0\cdot\delta}{2\pi}\cdot 2\cdot r_1^2\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin\left(k\cdot\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}\right)}{(k+2)\cdot k^2}\cdot\left(\frac{r_1}{r}\right)^k\cdot\cos\left[k\cdot\left(\alpha-\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}\right)\right]+C.$$

Постоянную C в (1.27) определим, приняв $A_z(r=r_2)=0$,

$$C=-\frac{\mu_0\cdot\delta}{2\pi}\cdot\left(S_{æ}\cdot\ln\frac{1}{r_2}+2\cdot r_1^2\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin\left(k\cdot\frac{\alpha_2-\alpha_1}{2}\right)}{(k+2)\cdot k^2}\cdot\left(\frac{r_1}{r_2}\right)^k\cdot\cos\left[k\cdot\left(\alpha-\frac{\alpha_1+\alpha_2}{2}\right)\right]\right). \qquad (1.28)$$

Магнитный поток в пространстве между жилой и оболочкой *Ф(α)* равен:

$$\Phi(\alpha)=A_z(r_1,\alpha)=\frac{\mu_0\cdot i}{2\pi}\cdot\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{\mu_0\cdot i}{\pi\cdot S_{æ}}\cdot r_1^2\cdot\sum_{k=1}^{\infty}\left(1-\frac{r_1}{r_2}\right)^k\cdot\frac{\sin(k\cdot\alpha_2)}{(k+2)\cdot k^2}\cdot\cos(k\cdot\alpha). \qquad (1.29)$$

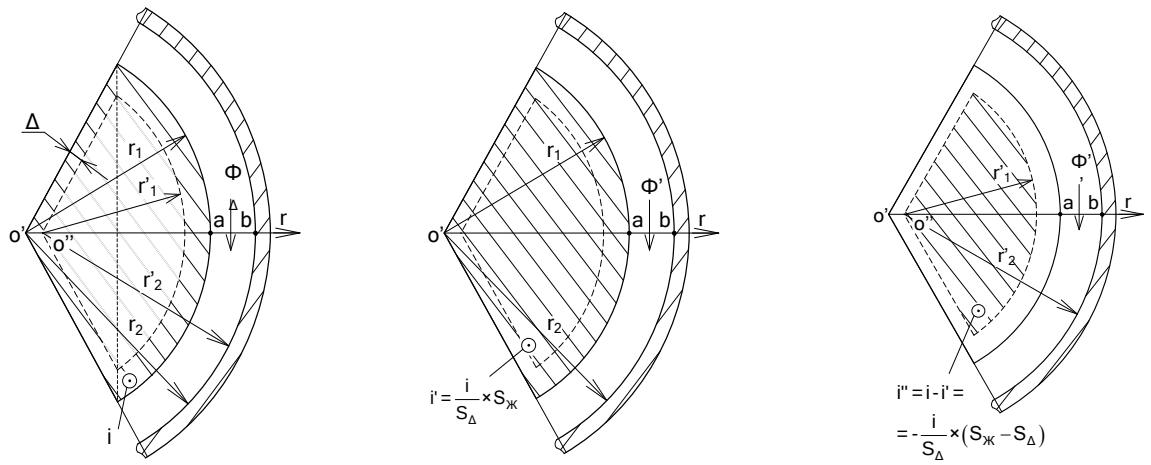
Расчеты для трехжильных кабелей показали, что при $k > 1$ величина $(1-r_1/r_2)^k$ не превышает нескольких сотых, поэтому практические расчеты с точностью до нескольких процентов допустимо проводить по формуле

$$\Phi(\alpha)\simeq\frac{\mu_0\cdot i}{2\pi}\cdot\ln\frac{r_2}{r_1}+\frac{\mu_0\cdot i}{\pi\cdot S_{æ}}\cdot r_1^2\cdot\left(1-\frac{r_1}{r_2}\right)\cdot\frac{\sin(60°)}{3}\cdot\cos(\alpha). \qquad (1.30)$$

С учетом (1.30) из (1.24) получим:

$$L_{ke}(0)=\frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\ln\frac{r_2}{r_1}+0,239\cdot\frac{\mu_0}{\pi\cdot S_{æ}}\cdot r_1^2\cdot\left(1-\frac{r_1}{r_2}\right). \qquad (1.31)$$

1.3.1.7 **Расчет внешней индуктивности $L_{ke}(\omega)$ при резко выраженном поверхностном эффекте (Δ<< $r_э$).** В этом случае можно воспользоваться формулами п. 1.2.5 и расчетной схемой, приведенной на рис. 1.18.



а) б) в)

Рисунок 1.18 – Расчетная схема для определения внешней индуктивности $L_{ke}(\omega)$ при резко выраженном поверхностном эффекте

Геометрические характеристики расчетной схемы определяются из соотношений: $r'_1 = r_1 - 2\cdot\Delta$; $r'_2 = r_2 - \Delta$; $S_{æ} = \frac{1}{2}\cdot r_1^2\cdot(\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{1}{3}\cdot\pi\cdot r_1^2$;

$S_\Delta = \Delta\cdot p = 2\cdot\Delta\cdot r_1^2\cdot\left(1+\frac{\pi}{3}\right)$.

Магнитный поток Φ_Δ (рис. 1.18, а), определяющий индуктивность $L_{e\Delta}(\omega)$ равен алгебраической сумме потоков Φ' и Φ'' (рис. 1.18, б, в), каждый из которых вычисляется с помощью формулы (1.30):

$$\Phi' = L_e'(0)\cdot i' = L_e'(0)\cdot i\cdot\frac{S_{ж}}{S_\Delta}; \tag{1.32}$$

$$\Phi'' = L_e''(0)\cdot i'' = -L_e''(0)\cdot i\cdot\frac{S_{ж} - S_\Delta}{S_\Delta}. \tag{1.33}$$

Индуктивность $L_e'(0)$ определяется непосредственно по (1.31), а для $L_e''(0)$ применяется формулу, являющаяся вариантом (1.31):

$$L_e''(0) = \frac{\mu_0}{2\pi}\cdot\ln\frac{r_2-\Delta}{r_1-\Delta} + 0,239\cdot\frac{\mu_0}{\pi}\cdot\frac{(r_1-2\cdot\Delta)^2}{S_{æ} - S_\Delta}\cdot\left(1-\frac{r_1-\Delta}{r_2-\Delta}\right). \tag{1.34}$$

Из (1.32) и (1.33) с учетом (1.31) и (1.34) для $L_{e\Delta}(\omega)$ получим:

$$L_{e\Delta}(\omega) = \frac{\Phi' + \Phi''}{i} = L_e'(0)\cdot\frac{S_{ж}}{S_\Delta} - L_e''(0)\cdot\left(\frac{S_{ж}}{S_\Delta} - 1\right). \tag{1.35}$$

1.3.1.8 **Расчет коэффициентов взаимоиндукции между жилами *M*.** Этот расчет выполняем через индуктивности петель "жила-оболочка" и жила-жила". Для определения индуктивности петли «жила-жила» аппроксимируем жилы кабеля эллипсоидами с полуосями *a*, *b* (рис. 1.19).

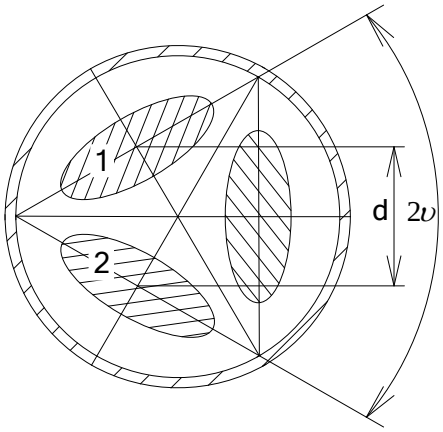


Рисунок 1.18 – К расчету коэффициентов взаимоиндукции для жил кабеля

Известно [126], что для коэффициентов взаимоиндукции $M_{12} = M_{21} = M$ имеет место равенство:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \left(L_1 + L_2 - L_{12} \right) = \frac{1}{2} \cdot (2L - L_{ж-ж}), \qquad (1.36)$$

где $L_1 = L_2 = L$ – собственные индуктивности проводов 1 и 2; $L_{12} = L_{ж\text{-}ж}$ – полная индуктивность контура "жила – жила".

Применим для определения L_{12} формулу двухпроводной линии с эллиптическими проводами [126].

$$L_{12} = L_{ж-ж} = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot d}{a+b} + \frac{1}{4} + \Delta \right), \qquad (1.37)$$

где

$$\Delta = \frac{\delta^2}{4} \cdot \cos 2\upsilon - \frac{1}{32} \cdot \delta^4 \cdot \left(3 + 2 \cdot \cos 4\upsilon\right) + \frac{5}{192} \cdot \delta^6 \cdot \left(6 \cdot \cos 2\upsilon + \cos 6\upsilon\right); \qquad (1.38)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{d}}.$$

Собственные индуктивности жил $L_1 = L_2 = L$ для постоянного тока и низких частот могут определены по найденным выше индуктивностям контура "жила – оболочка".

1.3.2 Оценочные расчеты зависимостей индуктивностей трехжильного кабеля от частоты

1.3.2.1 **Конструктивные размеры трехжильного кабеля.** Оценочные расчеты частотных характеристик индуктивностей выполнены для трехжильного кабеля типа ААБ-6-3х240. Для кабеля ААБ-6-3х240 конструктивные параметр, необходимые при расчете индуктивностей (рис. 1.14, 1.15, 1.16, 1.17), имеют следующие значения:

$r_1 = 15{,}2 \cdot 10^{-3}$ м;

$r_2 = 19{,}75 \cdot 10^{-3}$ м ,

$a = 12 \cdot 10^{-3}$ м;

$b = 7{,}5 \cdot 10^{-3}$ м;

$d = 19{,}2 \cdot 10^{-3}$ м;

$S_{ж} = 242 \cdot 10^{-6}$ м^2

$\delta = 0{,}488$;

$2\upsilon = 60°$;

Удельное активное сопротивление кабеля с алюминиевыми жилами $\rho = \dfrac{1}{\gamma_{Al}} = 0{,}028 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

1.3.2.2 **Оценочные расчеты влияния частоты на индуктивности кабеля ААБ-6-3х240.** Для внутренней индуктивности жилы кабеля при постоянном токе и низкой частоте из (1.19) получим

$$L_{ki}(0) = \frac{\mu_0}{8\pi} = 0{,}5 \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м.}$$

При резко выраженном поверхностном эффекте, т.е. в случаях, когда эквивалентная глубина проникновения $\Delta = \sqrt{2/\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma} << a,b$, расчеты по (1.21) для для значений частоты 5000 Гц и 500000 Гц дали следующие результаты:

f_1 = 5000 Гц: Δ = 1,19·10^{-3} м, $L_{ki}(\omega)$ = 0,112·10^{-7} Гн/м;

f_2 = 500 000 Гц: Δ = 0,119·10^{-3} м, $L_{ki}(\omega)$ = 0,0112·10^{-7} Гн/м.

Расчеты для указанных выше частот f_1 и f_2 по (1.23) дают значения индуктивностей, отличающиеся от найденных по формуле (1.21) лишь в третьем знаке. Таким образом, для инженерных расчетов частотной характеристики внутренней индуктивности жил кабеля целесообразно использовать более простую формулу (1.23). Из приведенных результатов можно видеть, что внутренняя индуктивность жил кабеля существенно зависит от частоты и уменьшается при ее увеличении. Аналогичным образом существенно будет зависеть от частоты и внутренняя индуктивность оболочки.

Расчет внешней индуктивности контура "жила – оболочка" при постоянном токе и низкой частоте $L_{ke}(0)$ определим из (1.31). При указанных выше конструктивных размерах кабеля ААБ-6-3х240 получим: $L_{ke}(0) = 0{,}734 \cdot 10^{-7}$

Гн/м. Полную индуктивность петли «жила-оболочка» для этого кабеля получим из (1.12), суммируя индуктивности $L_{ke}(0)$, $L_{ki}(0)$, $L_{об.i}(0)$:

$$L_{ж-об}(0)=L_{ke}(0)+L_{ki}(0)+L_{об.i}(0)= \\ =(0{,}734+0{,}5+0{,}16)\cdot 10^{-7}=1{,}394\cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м.}$$

Расчеты, выполненные по формулам (1.32) – (1.35) для кабеля ААБ-240 ($r_1=15{,}2\cdot 10^{-3}$ м, $r_2=19{,}75\cdot 10^{-3}$ м, $S_{ж}=242\cdot 10^{-6}$ м^2) при частоте $f=500$ кГц ($\Delta=0{,}119\cdot 10^{-3}$ м, $S_{\Delta}=14{,}8\cdot 10^{-6}$ м^2) дали следующие значения внешней индуктивности: $L_e'(0)=0{,}734\cdot 10^{-7}$ Гн/м; $L_e''(0)=0{,}738\cdot 10^{-7}$ Гн/м; $L_{e\Delta}(2\pi\cdot 500000)=0{,}69\cdot 10^{-7}$ Гн/м, т.е. при приближенных расчетах при резко выраженном поверхностном эффекте допустимо принять $L_{e\Delta}\approx L_e'(0)$, т.к. внешняя индуктивность петли "жила – оболочка" практически не зависит от частоты.

Следует отметить, что и при решении других технических задач внешний поток и внешнюю индуктивность, сравнительно мало зависящие от распределения тока по сечению проводника, обычно считают одинаковыми для всех частот и при изменении частоты учитывают лишь изменение внутренней индуктивности [126]. Таким образом, частотная характеристика индуктивности контура "жила – оболочка" определяется только зависимостью от частоты внутренней индуктивности жилы и оболочки.

Выше было показано, что уже при частоте f = 5000 Гц внутренняя индуктивность жилы $L_{ki}(\omega)$ по сравнению с ее значением при постоянном токе и низкой частоте $L_{ki}(0)$ уменьшается почти в 5 раз. При повышении частоты также значительно уменьшается и внутренняя индуктивность оболочки $L_{об.i}$. Из (1.16) следует, что при значениях частоты f от нескольких килогерц и выше полная индуктивность контура "жила – оболочка"

$$L_{ж-об}(\omega)=L_{ke}(\omega)+L_{ki}(\omega)+L_{об.i}(\omega)\rightarrow L_{ke}(\omega)\approx L_{ke}(0),$$

т.е. определяется в основном внешней индуктивностью, практически не зависящей от частоты.

Достоверность рассмотренной методики была проверена сравнением результатов расчетов с ее использованием зависимости от частоты индуктивности кабеля типа ААБ-6-3х240 с данными по расчетным частотным характеристикам указанного кабеля, приведенными в [131]. На рис. 1.20 приведена частотная характеристика индуктивности прямой последовательности L_1 трехжильного кабеля с сечением жил 240 мм^2 (кривая 1) и расчетные точки, соответствующие значениям L_1, рассчитанным при f = 50, 5000 и 500000 Гц с использованием рассмотренной выше методики (точки 2).

Частоты порядка единиц килогерц и выше характерны только для разрядных составляющих переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, зарядные составляющие имеют, как правило, частоту от сотен герц до 1-2 кГц. Из рис. 1.20 видно, что при расчетах разрядной составляющей переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6– 10 кВ в общем случае необходимо учитывать частотные характеристики индуктивностей кабеля, однако учет зависимости индуктивностей от частоты приводит к значительному усложнению моделей КЛ и кабельных сетей в целом.

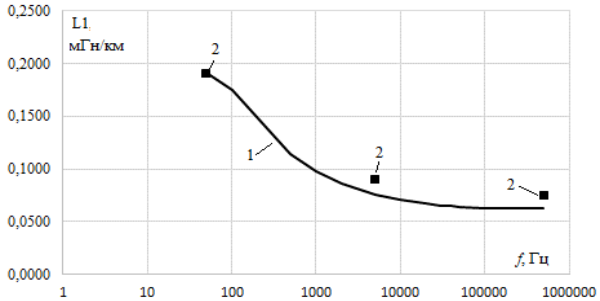


Рисунок 1.20 – Сравнение расчетов частотных характеристик индуктивности прямой последовательности L_1, рассчитанных по методике [131] (кривая 1) и по предложенной методике (расчетные точки 2 при f = 50, 5000 и 500000 Гц)

Из зависимостей рис. 1.20 можно видеть, что с увеличением частоты величина индуктивности L_1 стремится к предельному минимальному значению, определяемому только скоростью распространения электромагнитной волны в КЛ. Аналогичным образом изменяется в зависимости от частоты f и индуктивность нулевой последовательности L_0. Указанные предельные минимальные значения индуктивностей L_1 и L_0 могут быть определены из выражений [132]:

$$L_1^{(1\,км)} \approx \frac{1}{V_1^2 C_1^{(1\,км)}}; \tag{1.38}$$

$$L_0^{(1\,км)} \approx \frac{1}{V_0^2 C_0^{(1\,км)}}, \tag{1.39}$$

где V_1 и V_0 – скорости распространения электромагнитных волн в каналах «жила–жила» и «жила–оболочка»; $C_1^{(1\,км)}$, $C_0^{(1\,км)}$ – емкости КЛ прямой и нулевой последовательности.

Для трехжильных кабелей можно принять $V_1 \approx V_0$ = 150–160 м/мкс [132].

Ниже будет показано, что максимальное значение переходного тока, а также его среднеквадратичное значение при дуговых ОЗЗ на интервале времени наблюдения определяются в основном его разрядной составляющей. Поэтому для обеспечения приемлемой точности расчетов максимальных значений переходного тока и его среднеквадратичного значения при применении моделей кабельных линий, не учитывающих частотные зависимости индуктивностей, необходимо обеспечить прежде всего точность расчета его разрядной составляющих.

Разрядная составляющая переходного тока ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, как правило, имеет частоту от 3 кГц и выше. В указанном диапазоне частот индуктивности трехжильных кабелей $L_1(\omega)$ и $L_0(\omega)$ отличаются от значений, определенных по (1.38) и (1.39) не более, чем на 10%, что приводит к погрешностям в оценке амплитудных и среднеквадратичных значений разрядной составляющей переходного тока не более, чем на 3–5% [96]. Таким образом, для обеспечения приемлемой точности расчетов разрядных составляющих переходного тока ОЗЗ при использовании моделей КЛ, не учитывающих частотные зависимости индуктивностей $L_1(\omega)$ и $L_0(\omega)$, значения последних приближенно можно определить по (1.38) и (1.39). Так как частота зарядной составляющей переходного тока в кабельных сетях в основном определяется индуктивностью источника питания L_c (рис. 1.3), то рассмотренный подход к определению индуктивностей КЛ L_1 и L_0 практически не вносит погрешностей в определение параметров зарядных составляющих переходного тока и напряжения нулевой последовательности.

1.4 Анализ факторов, влияющих на соотношения токов и напряжений нулевой последовательности в переходных режимах при дуговых замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

1.4.1 **Основные факторы, влияющие на значения токов и напряжений нулевой последовательности в переходных режимах при дуговых замыканиях.** Выше отмечалось, что в большинстве исполнений защит от ОЗЗ, прежде всего, цифровых, в качестве воздействующих величин, как правило, используются среднеквадратичные значения тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ нулевой последовательности или их отношения. Среднеквадратичное значение на интервале времени наблюдения (времени усреднения сигнала) тока $3i_0$ нулевой последовательности в переходных режимах ОЗЗ в значительной мере определяется его разрядной составляющей, амплитуда, частота колебаний и коэффициент затухания которой зависят от множества факторов, основными из которых являются: суммарный емкостный ток сети $I_{c\Sigma}$, расстояние $l_з$ до места повреждения от шин, значения параметров поврежденной линии на участке до места ОЗЗ, условия гашения и повторных зажиганий и гашений заземляющей дуги, определяющие максимальные перенапряжения и, соответственно, максимальные значения бросков переходного тока, величина интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции, величина переходного сопротивления в месте повреждения и его характер и др. Влияние указанных факторов на амплитуду и среднеквадратичное значение переходного тока при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ достаточно подробно исследовано в ряде работ, например, [7, 23, 29, 47, 51, 96, 102, 104 и др.]. В аспекте совершенствования принципов выполнения исследуемых в данной работе защит от ОЗЗ с двумя подведенными величинами – адаптивных токовых и адмитансных – основную роль играет не величина отдельно взятых тока и напряжения нулевой последовательности, а их соотношения в переходных режимах при дуговых замыканиях на землю. В известных работах, посвященных исследованиям переходных процессов в целях совершенствования защит от ОЗЗ, вопросы особенностей соотношений значе-

ний тока и напряжения нулевой последовательности при дуговых замыканиях не рассматриваются.

Известно [7–9, 11 и др.], что величина максимальных перенапряжений в нейтрали кабельных сетей 6–10 кВ в основном определяется зарядной составляющей. Это означает, что, в отличие от переходного тока, на величину переходного напряжения нулевой последовательности при ОЗЗ большее влияние оказывает не разрядная, а зарядная составляющая. По этой причине величина отношения среднеквадратичного значения тока к среднеквадратичному значению напряжения $3I_0/3U_0$, определяющая условия функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит, при дуговых ОЗЗ на одном и том же присоединении не может оставаться постоянной.

Ниже исследуется влияние различных факторов на величину отношения $3I_0/3U_0$ при дуговых ОЗЗ. Оценка указанного влияния производилась с использованием разработанных эквивалентированных имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ. Исследования на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ проводились при следующих расчетных условиях:

– номинальной напряжение сети $U_{ном}$ = 6 кВ;

– величина суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ = 5 … 30 А;

– величина активной составляющей тока ОЗЗ $I_{a\Sigma}$ составляет 3–6% от $I_{c\Sigma}$ (в среднем обычно принимается 5%) [7, 8, 35, 85];

– условия гашения и повторных зажиганий заземляющей дуги соответствуют теориям W. Petersen и I.E. Peters, J. Slepian [13, 14];

– интервалы времени между повторными пробоями изоляции: при дуговых прерывистых ОЗЗ с гашениями заземляющей дуги при первом переходе тока переходного процесса через нулевое значение (теория W. Petersen) Δt = = 10, 30, 50, 70, 90 мс; при дуговых прерывистых ОЗЗ с гашениями заземляющей дуги при переходе через нулевые значения составляющей рабочей частоты 50 Гц (теория I.E. Peters, J. Slepian) Δt = 20, 40, 60, 80 мс;

– переходное сопротивление в месте повреждения в момент пробоя изоляции определяется сопротивлением электрической дуги $R_д$.

1.4.2 **Анализ факторов, влияющих на соотношения токов и напряжений нулевой последовательности при дуговых замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ.** Влияние указанных факторов исследовалось на эквивалентированных имитационных моделях кабельных сетей с изолированной нейтралью напряжением $U_{ном}$ = 6 кВ с различными значениями $I_{cΣ}$ = 5 … 30 А. Имитировались дуговые ОЗЗ по теориям W. Petersen и I.E. Peters, J. Slepian на шинах источника питания с различными интервалами времени между повторными пробоями изоляции $Δt$ от 10 до 90 мс при $R_д$ = 0.

В табл. 1.4 и 1.5 в качестве примера приведены результаты расчетов, выполненных для кабельных сетей с $I_{cΣ}$ = 5 и $I_{cΣ}$ = 30 А.

Таблица 1.4 – Относительные значения тока $3I_{0*}$ в месте повреждения, напряжения $3U_{0*}$ и их отношения при дуговых ОЗЗ на шинах источника питания в кабельной сети 6 кВ с $I_{CΣ}$ = 5 А при различных интервалах времени $Δt$ между повторными пробоями изоляции

$U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{cΣ}$ = 5 А, $I_{aΣ}$ = 0,05$I_{cΣ}$, $R_д$ = 0										
$Δt$, мс	10	20	30	40	50	60	70	80	90	УОЗЗ
$3I_{0з*} = 3I_{0з}/I_{cΣ}$, о.е.	28,1	13,9	11,9	8,6	7,38	6,32	5,34	5	4,18	1
$3U_{0*} = 3U_0/3U_{a\,ном}$, о.е.	3,2	1,18	2,37	1,11	1,87	~1	1,57	0,95	1,35	1
$3I_{0з*}/3U_{0*}$, о.е.	8,78	11,8	5,02	7,75	3,94	6,32	3,4	5,26	3,09	1

Таблица 1.5 – Относительные значения тока $3I_{0*}$ в месте повреждения, напряжения $3U_{0*}$ и их отношения при дуговых ОЗЗ на шинах источника питания в кабельной сети 6 кВ с $I_{CΣ}$ = 30 А при различных интервалах времени $Δt$ между повторными пробоями изоляции

$U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{cΣ}$ = 30 А, $I_{aΣ}$ = 0,05$I_{cΣ}$, $R_д$ = 0										
$Δt$, мс	10	20	30	40	50	60	70	80	90	УОЗЗ
$3I_{0з*} = 3I_{0з}/I_{cΣ}$, о.е.	8,53	4,73	3,88	2,94	2,5	2,17	1,83	1,72	1,47	1
$3U_{0*} = 3U_0/3U_{a\,ном}$, о.е.	2,43	1,18	1,92	1,11	1,58	1	1,36	0,92	1,19	1
$3I_{0з*}/3U_{0*}$, о.е.	3,51	4	2,02	2,65	1,58	2,17	1,34	1,87	1,23	1

Из данных, приведенных в табл. 1.4 и 1.5, можно видеть, что:

– при дуговых ОЗЗ среднеквадратичное значение тока $3I_0$ увеличивается в большей степени, чем среднеквадратичное значение напряжения $3U_0$ по сравнению со значениями последних при УОЗЗ;

– степень различия в увеличении эффективных значений $3I_0$ и $3U_0$, характеризуемая отношением $3I_{0з*}/3U_{0*}$, существенно зависит от условий гашения и повторного зажигания заземляющей дуги (момента гашения, величины интервалов времени Δt), а также величины суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$;

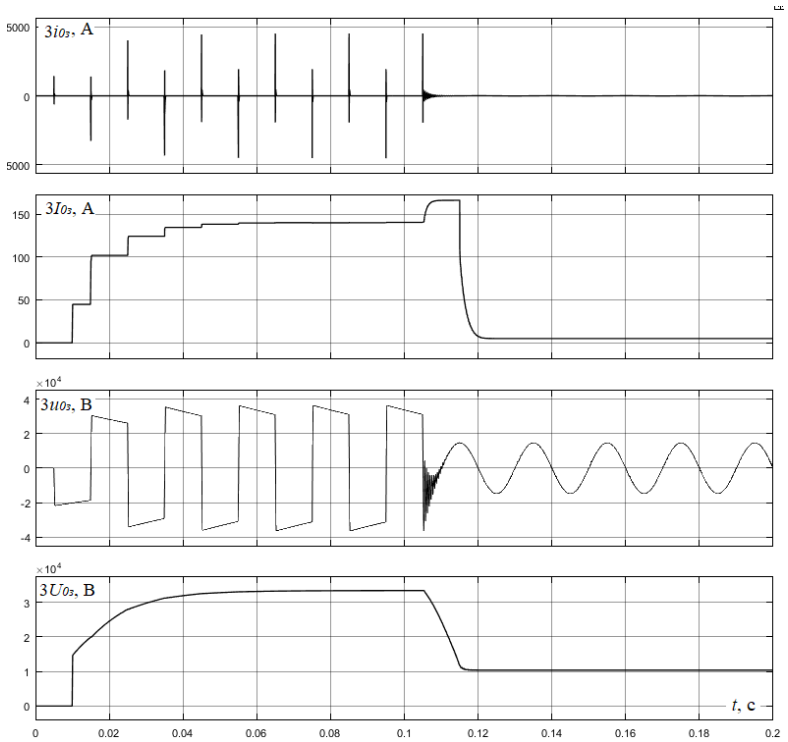
– отношение $3I_{0з*}/3U_{0*}$ при ОЗЗ через перемежающуюся дугу при различных значениях интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции существенно (в несколько раз) превышает указанное отношение в установившемся режиме ОЗЗ (при УОЗЗ величина отношения $3I_{0з*}/3U_{0*}$ в о.е. равна 1).

Соотношения среднеквадратичных значений тока $3I_{0з}$ и напряжения $3U_0$ в переходных и установившемся режимах ОЗЗ при различных значениях интервалов времени Δt между повторными пробоями изоляции иллюстрируют осциллограммы, приведенные на рис. 1.20.

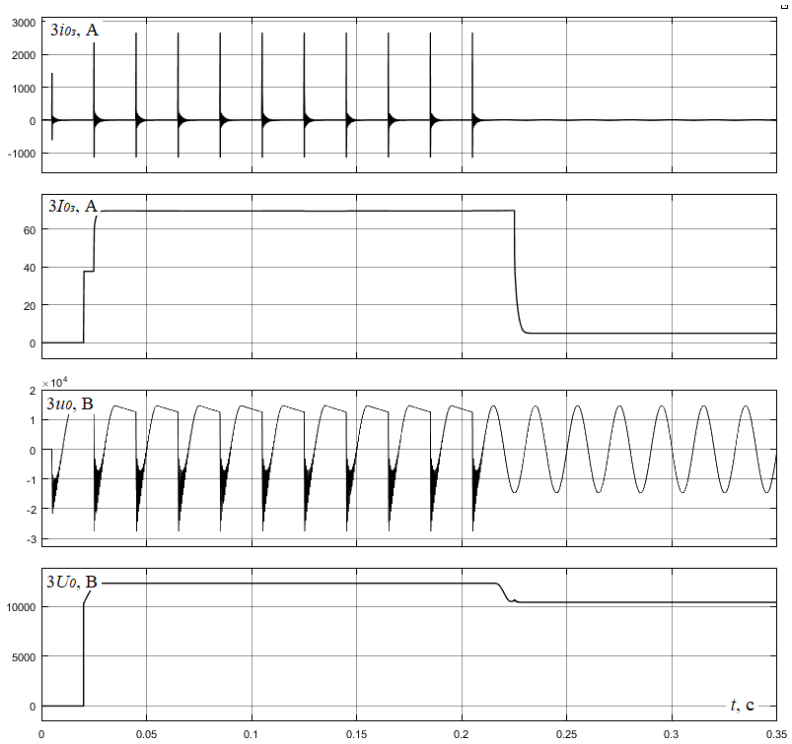
Осциллограммы, приведенные на рис. 1.21, иллюстрируют характер изменения среднеквадратичных значений тока в месте ОЗЗ $3I_{0з}$ и напряжения $3U_0$ в условиях дугового ОЗЗ, смоделированного на основе реальной осциллограммы. Из рис.1.21 можно видеть, что при ОЗЗ в одной и той же точке сети отношение величин $3I_{0з}/3U_0$ непрерывно меняется в зависимости от условий гашения заземляющей дуги и интервалов времени между повторными пробоями изоляции, что может привести к нарушениям устойчивости функционирования адаптивных токовых и адмитансных защит, выполненных на традиционных принципах.

Исследования на имитационных моделях кабельных сетей показали также, что в дуговой стадии ОЗЗ на величину отношения $3I_{0з}/3U_0$ существенное влияние могут оказывать также и другие факторы: величина активной составляющей тока ОЗЗ $I_{a\Sigma}$, определяющая скорость стекания дополнительного заряда с емкостей фаз сети после гашения заземляющей дуги, переход-

ное сопротивление в месте ОЗЗ, оказывающее наиболее существенное влияние на затухание разрядной составляющей переходного тока, и др.



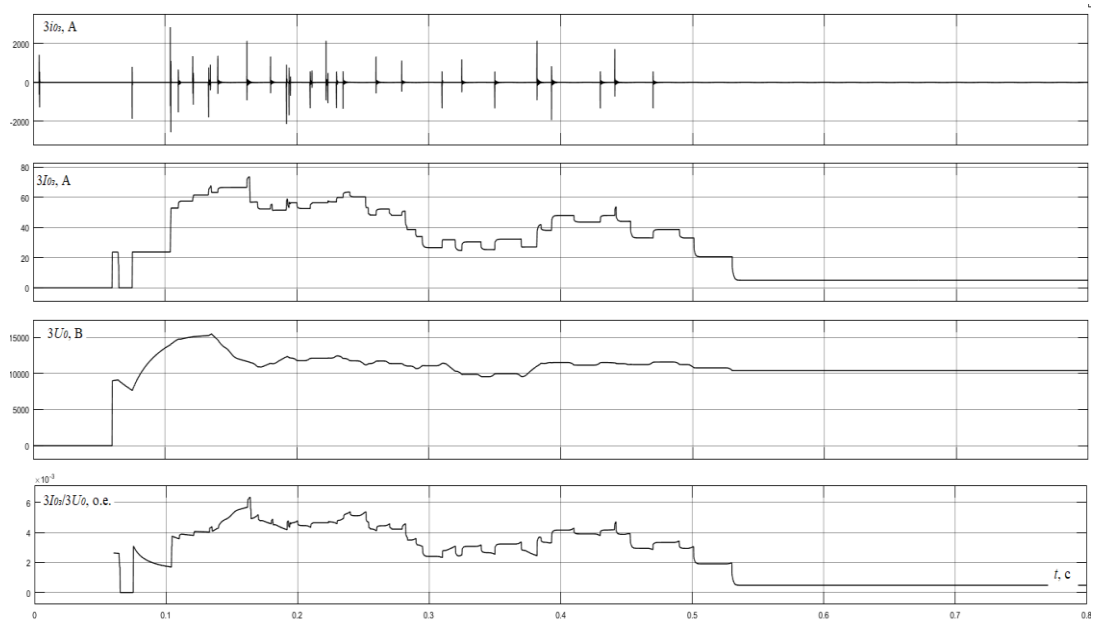
а)



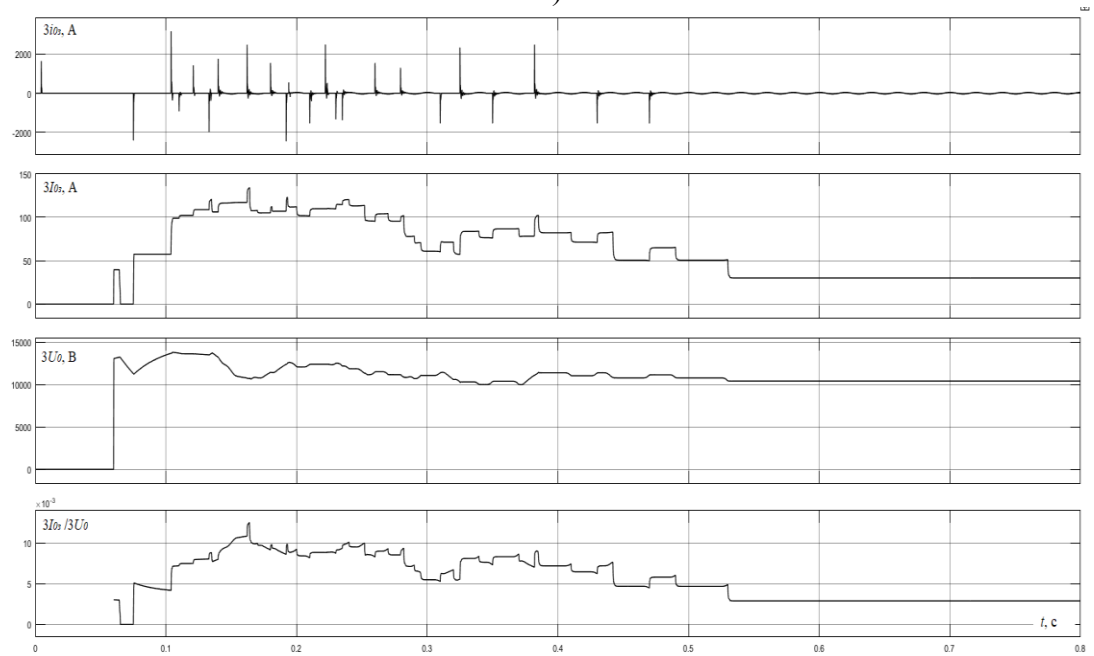
б)

Рисунок 1.20 – Расчетные осциллограммы переходного тока $3i_{0з}(t)$ в месте ОЗЗ, напряжения $3u_0(t)$ и их текущих среднеквадратичных значений $3I_{0з}(t)$ и $3U_0(t)$ для сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$= 5 А, $I_{a\Sigma}$ = 0,05$I_{c\Sigma}$, $R_д$ = 0: а – ДПОЗЗ по теории W. Petersen (Δt = 10 мс); б – ДПОЗЗ по теории I.E. Peters, J. Slepian (Δt = 20 мс)

Результаты исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ позволяют сделать вывод, что использование традиционных способов построения адаптивных токовых и адмитансных защит, основанных на допущении о линейной зависимости между среднеквадратичными значениям полного тока и напряжения нулевой последовательности $3I_{0з}$ и $3U_0$, не позволяет обеспечить их эффективную адаптацию к условиям дуговых ОЗЗ.



а)



б)

Рисунок 1.21 – Расчетные осциллограммы переходного тока $3i_{0з}(t)$ в месте ОЗЗ, текущих среднеквадратичных значений $3I_{0з}(t)$ и $3U_0(t)$ и их отношения $3I_{0з}(t)/3U_0(t)$ при дуговом ОЗЗ, смоделированном на основе реальной осциллограммы:

а – $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 5 А; б –$U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 30 А

1.5 Выводы по главе 1

1.5.1 Показано, что задача повышения технического совершенства защиты от ОЗЗ на основе устройств с двумя подведенными величинами актуальна прежде всего для ЦП и РП кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения.

1.5.2 Предложена модификация аналитического решения уравнений переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ на основе двухчастотной схемы замещения, позволяющая увеличить точность расчетов переходных токов и напряжений.

1.5.3 Обоснована методика эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ без существенной потери точности расчетов переходных токов и напряжений.

1.5.4 Разработана методика расчета частотных характеристик индуктивностей трехжильных кабелей напряжением 6–10 кВ. Достоверность методики проверена сравнением расчетов частотных зависимостей индуктивностей кабелей с частотными характеристиками, полученными другими авторами.

1.5.5 Показано, что с учетом особенностей разрядной и зарядной составляющих токов и напряжений переходного процесса при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ применение моделей линий, для которых индуктивности прямой и нулевой последовательности определены по скорости распространения электромагнитных волн в трехжильных кабелях и не учитывают их зависимость от частоты, обуславливает погрешности по амплитуде и частоте свободных составляющих в пределах ~5%.

1.5.6 На основе исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ показано, что способы выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ, основанные на допущении о линейной зависимости между среднеквадратичными значениями тока нулевой последова-

тельности в месте повреждения и напряжения нулевой последовательности, не позволяют обеспечить высокую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу, поэтому актуальной задачей является их совершенствование.

Результаты исследований, изложенных в главе 1, опубликованы в работах [56 – 74, 78].

Глава 2 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ СПОСОБОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ИСПОЛНЕНИЙ АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ И АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

2.1 Критерии оценки способов выполнения и устройств защиты от замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения

2.1.1 **Основные свойства защиты от ОЗЗ в кабельных сетях среднего напряжения.** Основными свойствами защиты от ОЗЗ, как и устройств релейной защиты от КЗ, являются селективность и устойчивость функционирования, составляющие комплексное свойство – техническое совершенство [16, 17, 20 и др.]. Для некоторых устройств релейной защиты и, в частности, устройств защиты от ОЗЗ в целях сравнения различных способов ее выполнения условия селективности несрабатываний при внешних и устойчивости функционирования при внутренних повреждениях (чувствительности) удобно объединить в общее условие, определяющее область возможного применения защит данного типа. Для многих исполнений защиты от ОЗЗ условие применимости определяется соотношением между собственным емкостным током защищаемого присоединения $I_{c\,собс}$ и суммарным емкостным током сети $I_{c\Sigma}$, т.е. относительным значением собственного емкостного тока $I_{c\,собс*} = I_{c\,собс}/I_{c\Sigma}$ [18, 23–25, 29, 34 и др]. Например, для наиболее широко применяемых в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью ТЗНП условие применимости имеет вид [18]

$$I_{c\,собс*} \le \frac{1}{1+K_{отс}K_{пер}K_{ч.мин}}, \qquad (2.1)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности функционирования ТЗНП при внешних ОЗЗ; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий влияние на функционирование защит переходных процессов при ДПОЗЗ; $K_{ч.мин}$ – ми-

нимально допустимое по ПУЭ [4] значение коэффициента чувствительности защиты при внутренних ОЗЗ.

Условия применимости можно рассматривать в качестве одного из основных критериев сравнения различных исполнений защит от ОЗЗ данного типа или защит на различных принципах.

2.1.2 **Дополнительные критерии сравнения защит от ОЗЗ.** В аспекте оценки эффективности технических решений в части защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ целесообразно также использовать дополнительные критерии, основными из которых, на наш взгляд, следует считать:

– универсальность, определяющая возможность применения защиты от ОЗЗ в сетях с различными режимами заземления нейтрали сети;

– способность фиксировать все разновидности ОЗЗ, включая ДПОЗЗ и КрОЗЗ;

– динамическая устойчивость функционирования (устойчивость в условиях влияния на работу измерительных органов защиты переходных процессов [133]);

– свойство непрерывности действия при УОЗЗ;

– чувствительность к ОЗЗ через большое переходное сопротивление.

Все защиты от ОЗЗ по назначению принято делить на две большие группы, как правило, различающиеся по роду используемых для действия электрических величин: защиты для сетей с изолированной нейтралью и защиты для компенсированных сетей. Большая часть (примерно 90%) кабельных сетей 6–10 кВ работает с компенсацией емкостных токов ОЗЗ, потому назначение защиты от ОЗЗ в значительной мере определяет универсальность (в смысле области применения) того или иного технического решения. Наиболее эффективными следует считать комплексные технические решения, обеспечивающие возможность применения защиты в сетях с любым режимом заземления нейтрали. Возможность получения таких решений на многофункциональной основе рассматриваются, например, в [23, 134].

Способностью фиксировать не только УОЗЗ, но и наиболее опасные для сети и поврежденного элемента ДПОЗЗ обладают только устройства защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса или комбинированные устройства на основе переходных процессов и электрических величин установившегося режима ОЗЗ. Фиксация КрОЗЗ позволяет использовать информацию о них в целях диагностирования состояния изоляции элементов сети. Более эффективными следует считать устройства защиты комбинированного типа, которые обладают непрерывностью действия в установившемся режиме ОЗЗ, необходимой при поиске поврежденного участка кабельной сети 6–10 кВ (например, на магистральных КЛ ГРС) с использованием метода деления сети (метода оперативных переключений).

Динамическая устойчивость функционирования устройств является одним из важнейших свойств защиты от ОЗЗ в силу специфики данного вида повреждений. Известно [например, 7–10, 12, 15, 28, 135 и др.], что большая часть ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ имеет дуговой прерывистый характер. Такой характер, прежде всего, в начальной стадии развития повреждения изоляции, длящейся не менее 3 минут, в кабельных сетях 6–10 кВ имеет не менее 80% всех ОЗЗ [12]. Отказы срабатывания при внутренних или излишние срабатывания защиты при внешних ДПОЗЗ могут привести к необусловленным переходам последних в двойные или многоместные замыкания, отключаемые штатным действием релейной защиты от КЗ, т.е. увеличению аварийности и снижению эксплуатационной надежности защищаемой кабельной сети.

В кабельных сетях 6–10 кВ переходное сопротивление в месте повреждения в момент пробоя изоляции определяется сопротивлением электрической дуги, падение напряжения на которой $U_д$, как правило, не превышает 100 В [15, 136], а активное динамическое сопротивление $R_д$ составляет тысячные доли Ома [137]. При таких параметрах электрическая дуга в месте пробоя изоляции не оказывает существенного влияния на параметры переходного тока и тем более установившегося тока ОЗЗ. Однако в установившихся режимах ОЗЗ переходное сопротивление в месте ОЗЗ может достигать

достаточно больших значений. По данным [138] в кабельных сетях 6–10 кВ в установившемся режиме ОЗЗ переходное сопротивление в месте повреждения может достигать значений порядка R_n = (2–2,5)$X_{c\Sigma}$ = (2–2,5)/3$\omega C_{0\Sigma}$ и более, что может быть причиной отказов срабатывания из-за недостаточной чувствительности защиты.

2.2 Аналитический обзор известных способов выполнения адаптивных токовых защит от замыканий на землю

2.2.1 **Принцип действия традиционных адаптивных токовых защит от ОЗЗ.** Как уже отмечалось выше, основной целью большинства известных способов выполнения адаптивных токовых защит от ОЗЗ имеет целью повышение их чувствительности к замыканиям через переходное сопротивление. Зависимость между током нулевой последовательности в месте ОЗЗ и напряжением нулевой последовательности можно просто определить из комплексной схемы замещения сети по методу симметричных составляющих. Для схемы сети по рис. 1.3 комплексная схема замещения будет иметь вид, приведенный на рис. 2.1.

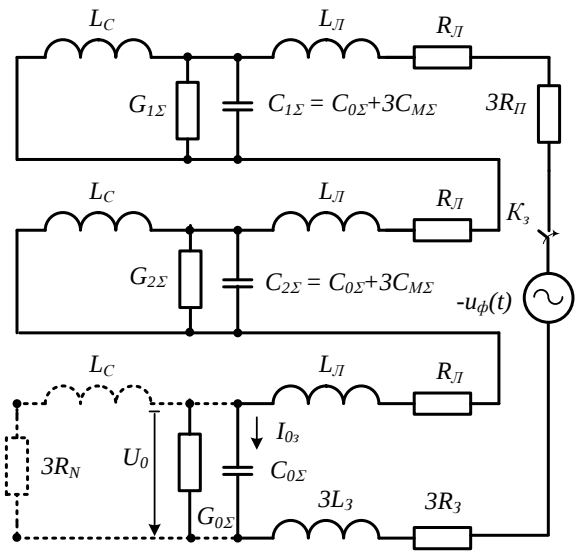


Рисунок 2.1 – Комплексная схема замещения сети по методу симметричных составляющих в режиме ОЗЗ

Пренебрегая падениями напряжения от емкостных токов ОЗЗ в продольных активно-индуктивных сопротивлениях КЛ и источника питания, а также активными потерями в изоляции, из схемы замещения по рис. 2.1 можно получить следующие соотношения для тока нулевой последовательности в месте ОЗЗ $3I_{0з}$ и напряжения нулевой последовательности $3U_0$ в сети

$$3I_{0з} = \frac{3U_ф \omega C_{0\Sigma}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{c\Sigma}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = bI_{c\Sigma}; \qquad (2.1)$$

$$U_0 = \frac{U_ф}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = bU_ф, \qquad (2.2)$$

где $b = U_0/U_ф$ – коэффициент полноты замыкания, учитывающий влияние переходного сопротивления R_n в месте повреждения.

Как правило, значение b определяют при $U_ф = U_{ф.ном}$

$$b = \frac{U_0}{U_{ф.ном}} \approx \frac{1}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}}. \qquad (2.3)$$

Ток в месте ОЗЗ $3I_{0з}$ распределяется в неповрежденных присоединениях пропорционально собственным емкостям фаз на землю $3C_{0\,собс}$, т.е.

$$3I_{0\,неп} = \frac{3U_ф \omega C_{0\,собс}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{c\,собс}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = bI_{c\,собс}. \qquad (2.4)$$

В сети с изолированной нейтралью значение тока $3I_{0\,пов}$ в поврежденном присоединении равно сумме емкостных токов всех неповрежденных присоединений, т.е. определяется емкостью фаз на землю внешней сети $3(C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс})$

$$3I_{0\,пов} = \frac{3U_ф \omega (C_{0\,\Sigma} - C_{0\,собс})}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = \frac{I_{c\,\Sigma} - I_{c\,собс}}{\sqrt{1+(3\omega C_{0\Sigma} R_n)^2}} = b(I_{c\,\Sigma} - I_{c\,собс}). \qquad (2.5)$$

Из (2.1) – (2.5) следует, что при УОЗЗ через переходное сопротивление напряжение нулевой последовательности, ток в месте ОЗЗ и токи нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденных присоединениях уменьшаются в одинаковой степени пропорционально коэффициенту полноты замыкания на землю b. Указанное свойство напряжения $3U_0$ и токов $3I_0$ при УОЗЗ используется в традиционных адаптивных ТЗНП для изменения ус-

тавки по току срабатывания в зависимости от текущего значения коэффициента b

$$I_{0\,с.з}(b) = bI_{0\,с.з}(0) \qquad (2.6)$$

и автоматического повышения чувствительности защиты при устойчивых замыканиях через переходное сопротивление.

При дуговых ОЗЗ ток в защите, как было показано в разделе 1.4, может как увеличиваться, так и уменьшаться по сравнению с его значением при УОЗЗ. Как правило, значение тока $3I_0$ изменяется в значительно большей степени, чем значение напряжения $3U_0$, т.е. коэффициент полноты замыкания при дуговых замыканиях на землю для тока и напряжения нулевой последовательности имеют разные значения, т.к. величина отношения $3I_{0з*}/3U_{0*}$, характеризующая отношение коэффициентов полноты по току и напряжению замыкания при дуговом ОЗЗ в одной и той же точке сети, кроме переходного сопротивления в месте повреждения, зависит от множества других влияющих на переходный процесс факторов. Потому при дуговых ОЗЗ рассмотренный способ регулирования уставки ТЗНП по току срабатывания в общем случае не позволяет автоматически обеспечить как требуемую отстроенность от внешних ОЗЗ, так и необходимую чувствительность при внутренних повреждениях.

В сети с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор R_N (рис. 2.1), ток в месте ОЗЗ $3I_{0з}$ и напряжение $3U_0$ определяются по выражениям

$$3I_{0з}(b) = \frac{3U_ф}{|\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_n|} = \frac{3U_ф}{Z_{0\Sigma}} \cdot \frac{Z_{0\Sigma}}{|\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_n|} = b3I_{0з}(b=1) = b\sqrt{I_{c\Sigma}^2 + I_{R_N}^2}\,; \qquad (2.7)$$

$$3U_0(b) = Z_{0\Sigma}3I_{0з}(b) = 3U_ф \frac{Z_{0\Sigma}}{|\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_n|} = b3U_ф\,, \qquad (2.8)$$

где $\underline{Z}_{0\Sigma} = \dfrac{-j3R_N}{-j + 3R_N\omega C_{0\Sigma}}$ – суммарное сопротивление нулевой последовательности сети с заземлением нейтрали через резистор R_N.

Ток $3I_{0\,неп}$ в неповрежденном присоединении, как и в сети с изолированной нейтралью, определяются собственным емкостным током $I_{c\,собс}$ и при ОЗЗ через переходное сопротивление равен

$$3I_{0\,неп} = I_{c\,собс}\frac{Z_{0\Sigma}}{\left|\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_n\right|} = bI_{c\,собс}. \qquad (2.9)$$

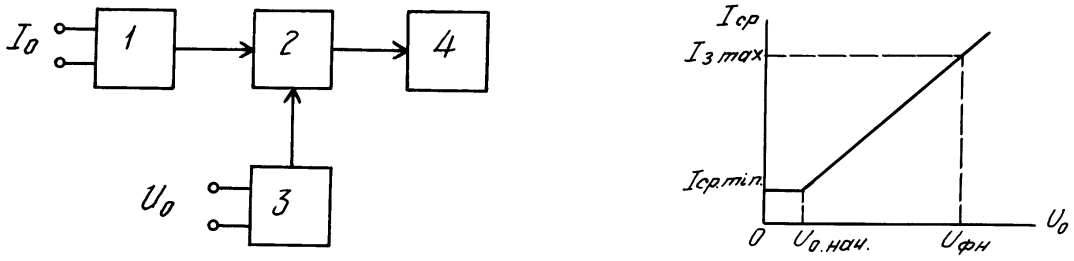
Ток $3I_{0\,пов}$ в поврежденном присоединении, кроме емкостной, содержит также активную составляющую и равен

$$3I_{0\,пов} = 3I_{0\,з}\frac{Z_{0\Sigma}}{\left|\underline{Z}_{0\Sigma} + 3R_n\right|} = b\sqrt{I_{c\Sigma}^2 + I_{R_N}^2}. \qquad (2.10)$$

Из (2.8) – (2.10) следует, что рассмотренный способ выполнения адаптивной ТЗНП при УОЗЗ применим и в сетях с заземлением нейтрали через высокоомный резистор. Однако при дуговых замыканиях, как и в сети с изолированной нейтралью, способ неработоспособен.

2.2.2 **Обзор известных принципов выполнения адаптивных токовых защит от ОЗЗ.** Патентный поиск по теме исследований выявил предложения по принципам выполнения адаптивных токовых защит от ОЗЗ, приведенные в [49, 50].

В [49] предлагается реле защиты отходящего присоединения электрический сети с изолированной нейтралью от ОЗЗ, содержащее входной блок, вход которого соединен с вторичной обмоткой ТТНП, а выход с одним из входов измерительного блока, выход которого соединен с исполнительным органом, отличающееся тем, что оно снабжено блоком автоматического регулирования тока срабатывания, подключенного к другому входу измерительного органа (рис. 2.2, а).



а) **б)**

Рисунок 2.2 – Функциональная схема (а) и характеристика срабатывания (б) реле защиты от ОЗЗ по [139]: 1 – ТТНП; 2 – входной блок; 3 – блок автоматического регулирования тока срабатывания; 4 –исполнительный орган

Блок 3 реализует приведенную на рис. 2.2, б зависимость $I_{ср} = f(U_0)$, задаваемую следующими соотношениями:

$$I_{ср} = I_{ср.мин} \text{ при } U_0 \approx U_{0\ нач}; \quad (2.11)$$

$$I_{ср} = I_{ср.min} + KU_0 \text{ при } U_{0\ нач} < U \approx U_{ф.ном}, \quad (2.12)$$

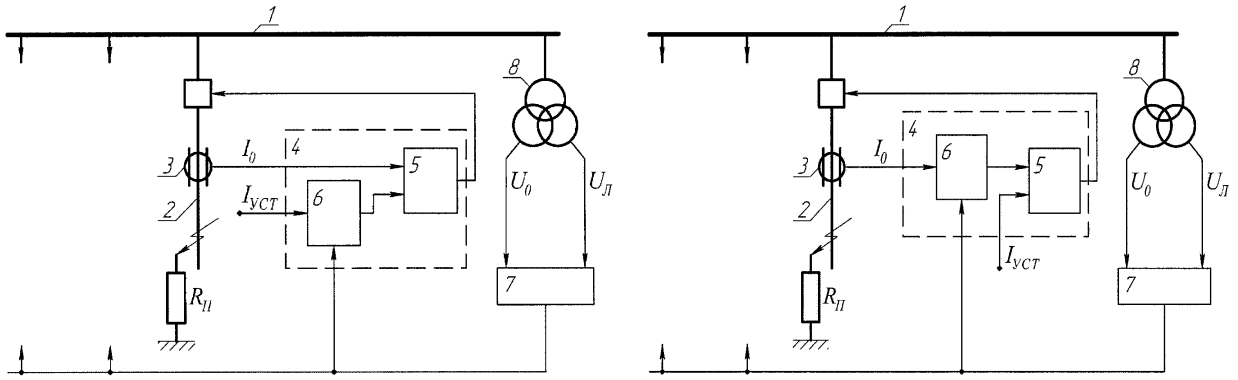
где $K = (I_{з.max} - I_{ср.min})/(U_{ф.ном} - U_{0\ нач})$ – коэффициент наклона линейной части зависимости $I_{ср} = f(U_0)$; $I_{ср.min}$ – минимальный ток срабатывания реле; $U_{0\ нач} \leq 0{,}15)U_{ф.ном}$ – начальное значение напряжения смещения нейтрали сети; $I_{з.max}$ – наибольший ток металлического замыкания ОЗЗ в данной электрической сети; $U_{ф.ном}$ – номинальное фазное напряжение сети.

Отметим, что в приведенных выше выражениях (2.11) и (2.12), определяющих характеристику срабатывания защиты, не учтены минимально допустимые значения коэффициента отстройки $K_{отс}$ и коэффициента чувствительности $K_{ч.мин}$, без чего не может быть обеспечена требуемая устойчивость функционирования при внешних и внутренних устойчивых замыканиях на землю.

Блок автоматического регулирования уставки по току срабатывания 3 выполняет также функцию запрета срабатывания реле, если напряжение смещения нейтрали U_0 меньше некоторого минимального значения, что обеспечивает отстройку реле защиты от режимов, не связанных с ОЗЗ, в том числе и от токов небаланса ТТНП. В целом реле защиты по [139] реализует рассмотренный в п. 2.2.1 общий принцип действия адаптивной токовой защиты от ОЗЗ, основной целью которой является повышение чувствительности при УОЗЗ через переходное сопротивление. Как уже отмечалось выше в п. 2.2.1, данный принцип построения адаптивной токовой защиты неэффективен при дуговых ОЗЗ.

В [50] предложено устройство токовой защиты электрических сетей от ОЗЗ, содержащее на каждой линии датчик тока нулевой последовательности и релейный орган блока защиты с задаваемой уставкой на срабатывание, функциональный модуль вычисления показателя полноты замыкания на землю, первый и второй входы которого подключены к измерительному трансформатору напряжения, модуль автоматической адаптивной коррекции тока

уставки на срабатывание защиты, на первый вход которого поступает сигнал о токе уставки, второй его вход соединен с выходом функционального модуля вычисления показателя неполноты замыкания на землю, а выход модуля автоматической адаптивной коррекции тока уставки на срабатывание защиты соединен со вторым входом релейного органа блока защиты, первый вход которого связан с датчиком тока нулевой последовательности (рис. 2.3, а). Второй вариант предложенного устройства отличается от первого тем, что в блок защиты каждой линии дополнительно введен модуль автоматической адаптивной коррекции величины сигнала о контролируемом токе нулевой последовательности линии, первый вход которого связан с датчиком тока нулевой последовательности, второй его вход соединен с выходом функционального модуля вычисления показателя неполноты замыкания на землю, выход модуля автоматической адаптивной коррекции тока уставки на срабатывание защиты соединен с первым входом релейного органа блока защиты, а на второй его вход поступает сигнал о заданном токе уставки (рис. 2.3, б).



а) **б)**

Рисунок 2.3 – Функциональные схемы устройства защиты от ОЗЗ по [140]: а – вариант 1; б – вариант 2; 1 – секция шин с группой присоединенных линий 2; 3 – датчик тока нулевой последовательности; 4 – блок защиты; 5 – релейный орган с двумя входами и одним выходом, действующим на отключение или на сигнал; 6 – модуль автоматической адаптивной коррекции уставки (вариант 1) или модуль автоматической адаптивной коррекции величины сигнала о контролируемом токе нулевой последовательности (вариант 2); 7 – модуль вычисления коэффициента полноты замыкания на землю; 8 – измерительный трансформатор напряжения

Варианты защиты 1 и 2 рассматриваемого изобретения практически равноценны с точки зрения эффективности функционирования при УОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью – обеспечивают повышение чувствительности при УОЗЗ через переходное сопротивление за счет уменьшения уставки $I_{уст}$ пропорционально коэффициенту неполноты замыкания $b = U_0/U_ф$ (вариант 1) или увеличения тока, подводимому к релейному органу защиты, в $1/b$ раз при $I_{уст}$ = const (вариант 2).

В отличие от реле адаптивной защиты, предложенном в [49], в обоих вариантах устройства адаптивной токовой защиты от ОЗЗ по [50] величина коэффициента полноты замыкания определяется не по (2.3) при $U_ф = U_{ф.ном}$, а по непосредственно измеренному значению фазного напряжения $U_Л/\sqrt{3}$ (рис. 2.3, а, б), что позволяет уменьшить погрешности по току срабатывания защиты, учитываемые при выборе уставки в коэффициенте отстройки $K_{отс}$, и увеличить ее чувствительность. Основным недостатком в обоих вариантах устройства защиты от ОЗЗ по [50], как и реле защиты по [49], является то, что в них не решена проблема обеспечения динамической устойчивости функционирования при дуговых ОЗЗ, что ограничивает возможности их практического применения.

На рис. 2.4 в качестве примера приведены полученные на имитационной модели кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{cΣ}$ = 5 А осциллограммы, иллюстрирующие изменение воздействующей величины (среднеквадратичного значения тока) $3I_{0неп}$ в неповрежденном присоединении с собственным емкостным током $I_{c\,собс}$ = 0,2 $I_{cΣ}$, величины коэффициента полноты замыкания b и текущей уставки адаптивной ТЗНП $I_{0уст} = f(b)$ при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в устойчивое замыкание. Предполагается, что уставка $I_{0уст}$ выбрана из условия отстройки от внешнего УОЗЗ без учета влияния переходных процессов при дуговых замыканиях.

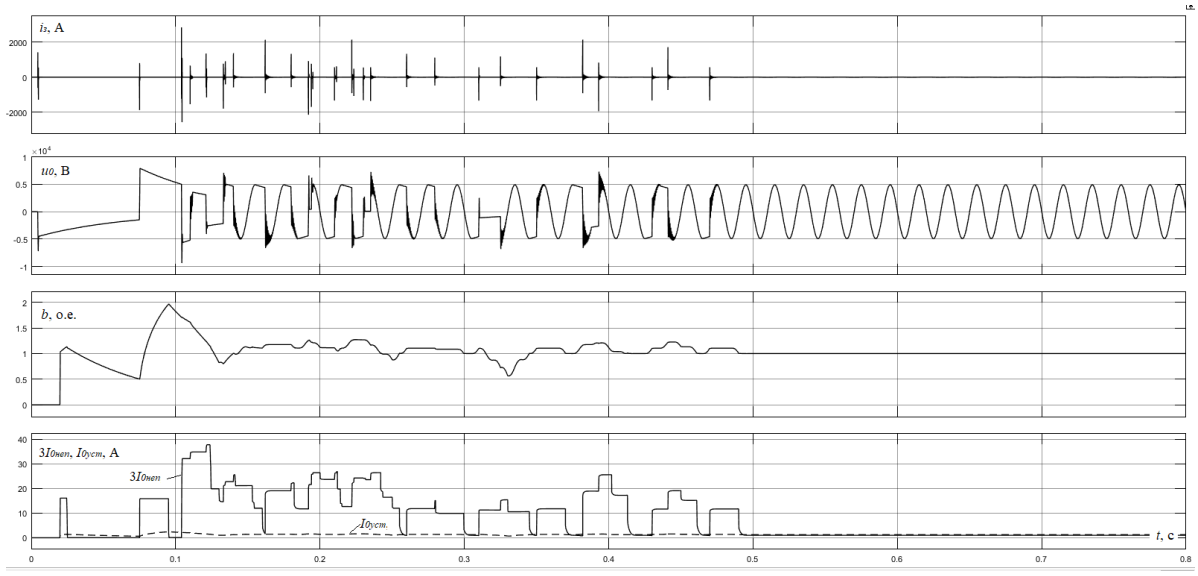


Рисунок 2.4 – Расчетные осциллограммы, иллюстрирующие особенности функционирования адаптивной ТЗНП при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в устойчивое замыкание в сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 5 А на присоединении с собственным емкостным током $I_{c\,собс}$ = 0,2 $I_{c\Sigma}$

Из осциллограмм можно видеть, что предложенный в [49, 50] принцип выполнения адаптивной ТЗНП обеспечивает необходимое соотношение между воздействующей величиной и уставкой ($I_{0уст} > 3I_{0неп}$) только на стадии устойчивого ОЗЗ. Для обеспечения устойчивых несрабатываний защиты на дуговой стадии ОЗЗ уставку по току срабатывания необходимо увеличивать в несколько раз, что приведет к уменьшению чувствительности защиты как при металлических УОЗЗ, так и при устойчивых замыканиях через переходное сопротивление.

Таким образом, первичный ток срабатывания $I_{0\,с.з}$ адаптивной ТЗНП на рассмотренном принципе для обеспечения динамической устойчивости несрабатываний при внешних дуговых ОЗЗ должен выбираться по выражению

$$I_{0\,с.з} \geq bK_{отс}K_{пер}I_{c\,собс}, \qquad (2.13)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности функционирования, которые могут привести к уменьшению тока срабатывания по сравнению с расчетным значением; $K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий увеличение тока в переходных режимах при дуговых ОЗЗ.

Чувствительность защиты при внутренних УОЗЗ

$$K_ч = \frac{b(I_{c\Sigma} - I_{c\,собс})}{I_{0\,с.з}} \geq K_{ч.мин}, \qquad (2.14)$$

где $K_{ч.мин}$ – минимально допустимое значение коэффициента чувствительности.

Из (2.13) и (2.14) можно получить следующее условие применимости адаптивной ТЗНП при УОЗЗ

$$I_{c\,собс*} = \frac{I_{c\,собс*}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{отс} K_{пер} K_{ч.мин}}. \qquad (2.15)$$

Из (2.15) можно видеть, что необходимость учета влияния на функционирование адаптивной токовой защиты переходных процессов при дуговых ОЗЗ, может значительно ограничить область ее возможного применения.

Таким образом, известные предложения в части принципов выполнения адаптивной токовой защиты не позволяют получить эффективное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали. Отметим также, что рассмотренные выше технические решения не получили практического применения в кабельных сетях 6–10 кВ.

2.3 Аналитический обзор известных способов выполнения и исполнений адмитансных защит от замыканий на землю

2.3.1 **Принцип действия и характеристики срабатывания адмитансных защит от ОЗЗ.** Как уже отмечалось выше, в европейских и некоторых других странах для защиты от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения достаточно широкое применение получили защиты, основанные на контроле проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения, называемые также адмитансными [52–55, 139–142 и др.]. Как правило, адмитансные защиты от ОЗЗ применяются только в цифровых устройствах РЗА на современной микропроцессорной базе. В [52] отмечается более высокая эффективность функционирования адмитансной защиты по сравнению с тради-

ционными ТЗНП и ТНЗНП, в частности, более высокая по принципу действия чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление.

Действие адмитансных устройств защиты от ОЗЗ основано на контроле проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения, определяемой отношением вектора тока $3\underline{I}_0$ защищаемого присоединения к вектору напряжения $\underline{U}_0$

$$\underline{Y}_0 = 3\underline{I}_0/\underline{U}_0 = G_0 + jB_0, \qquad (2.16)$$

где $\underline{Y}_0$ – полная проводимость нулевой последовательности; G_0 и B_0 – соответственно активная и реактивная составляющие полной проводимости нулевой последовательности.

При внешних (вне защищаемой зоны, например, т. $K_{з1}^{(1)}$, рис. 2.5) УОЗЗ проводимость $\underline{Y}_0$ для неповрежденного присоединения определяется собственной проводимостью фаз на землю защищаемого присоединения $3\underline{Y}_{0\,собс}$ и в электрической сети с изолированной нейтралью равна

$$\underline{Y}_{0\,неп} = 3\underline{Y}_{0собс} = 3G_{0\,собс} + j\omega 3C_{0\,собс}, \qquad (2.17)$$

где $3G_{0\,собс}$ – активная составляющая собственной проводимости $3\underline{Y}_{0\,собс}$; $3\omega C_{0\,собс}$ – реактивная составляющая $3\underline{Y}_{0\,собс}$.

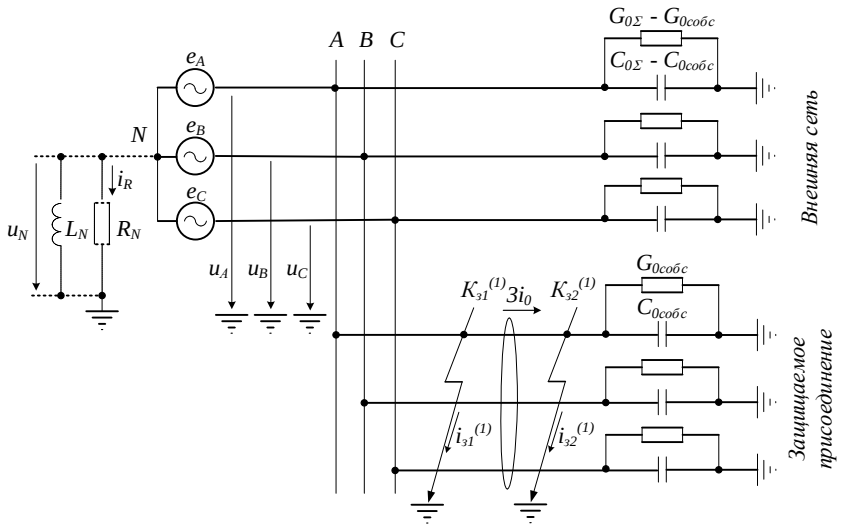


Рисунок 2.5 – К определению проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения при внешних (т. $K_{з1}^{(1)}$) и внутренних (т. $K_{з2}^{(1)}$) ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор

При внутренних (в защищаемой зоне – т. $K_{з2}^{(1)}$, рис. 2.5) УОЗЗ проводимость на зажимах защиты в электрической сети с изолированной нейтралью для поврежденного присоединения определяется взятой с обратным знаком суммой проводимостей нулевой последовательности всех неповрежденных присоединений (суммарной проводимостью внешней сети) и равна

$$\underline{Y}_{0\,пов} = -3(G_{0\Sigma} - G_{0\,собс}) - j3\omega(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}), \qquad (2.18)$$

где $3G_{0\,\Sigma}$ – суммарная активная проводимость фаз сети на землю.

На основе соотношений (2.17) и (2.18) можно выполнить ненаправленную максимальную и направленную адмитансные защиты. В сетях с изолированной нейтралью максимальная адмитансная защита выполняется реагирующей на значение (модуль) полной проводимости Y_0 или величину ее реактивной (емкостной) составляющей B_0. В кабельных сетях среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, активная составляющая проводимости нулевой последовательности, как уже отмечалось выше, составляет несколько процентов от реактивной (емкостной) проводимости [7, 8, 11, 35, 36]. При $3\omega C_{0\,собс} >> 3G_{0\,собс}$ и $3\omega C_{0\Sigma} >> 3G_{0\Sigma}$ соотношения (2.17) и (2.18) можно представить в следующем виде:

$$\underline{Y}_{0\,неп} \approx j\omega 3C_{0\,собс}; \qquad (2.19)$$

$$\underline{Y}_{0\,пов} \approx -j3\omega(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}). \qquad (2.20)$$

Для обеспечения несрабатываний при внешних УОЗЗ уставка срабатывания максимальной адмитансной защиты должна выбираться из условия:

$$Y_{0\,уст} \geq K_{отс}\left|Y_{0\,неп}\right| \approx K_{отс}\left|B_0\right| = K_{отс}3\omega C_{0\,собс}, \qquad (2.21)$$

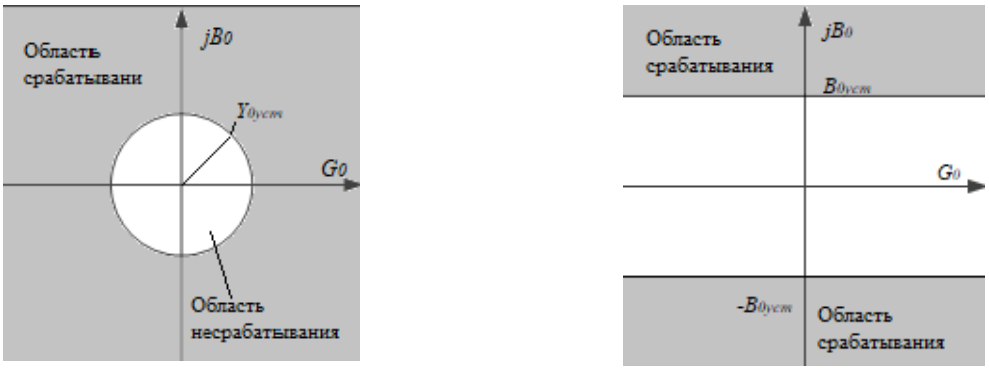
где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности измерений воздействующей величины, расчета значений $3C_{0\,собс}$ и др.

Условия срабатывания ненаправленной максимальной адмитансной защиты можно представить также в следующей форме

$$B_{0\,уст} \geq K_{отс}\left|B_{0\,неп}\right| \approx K_{отс}3\omega C_{0\,собс}; \qquad (2.22)$$

$$-B_{0\,уст} \leq K_{отс}\left|Y_{0\,неп}\right| \approx -K_{отс}3\omega C_{0\,собс}. \qquad (2.23)$$

Условию (2.21) соответствует характеристика срабатывания в комплексной плоскости проводимости $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$, представленная на рис. 2.6, а, условиям в форме (2.22) и (2.23) – характеристика срабатывания на рис. 2.6, б.



а) **б)**

Рисунок 2.6 – Характеристики срабатывания ненаправленной максимальной адмитансной защиты в комплексной плоскости проводимости $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$: а – по условию (2.21); б – по условиям (2.22) и (2.23)

Отметим, что условия выбора уставки срабатывания максимальной адмитансной защиты по (2.21) – (2.23) справедливы только для УОЗЗ. В переходных режимах при дуговых ОЗЗ в токах $3i_0$ поврежденного и неповрежденных присоединений преобладают свободные составляющие с частотами $f_{св}$ до нескольких килогерц и выше, что приводит к увеличению замера на зажимах защиты, основанной на контроле полной проводимости или ее реактивной (емкостной) составляющей $3Y_{0\,собс} \approx 3\omega_{св}C_{0\,собс} = 3 \cdot 2\pi \cdot f_{св}C_{0\,собс}$.

Расчетные осциллограммы, полученные на имитационной модели кабельной сети с изолированной нейтралью напряжением $U_{ном}$ = 6 кВ (рис. 2.7), иллюстрируют влияние переходных процессов на замер ненаправленной максимальной адмитансной защиты при дуговом ОЗЗ, переходящем в УОЗЗ.

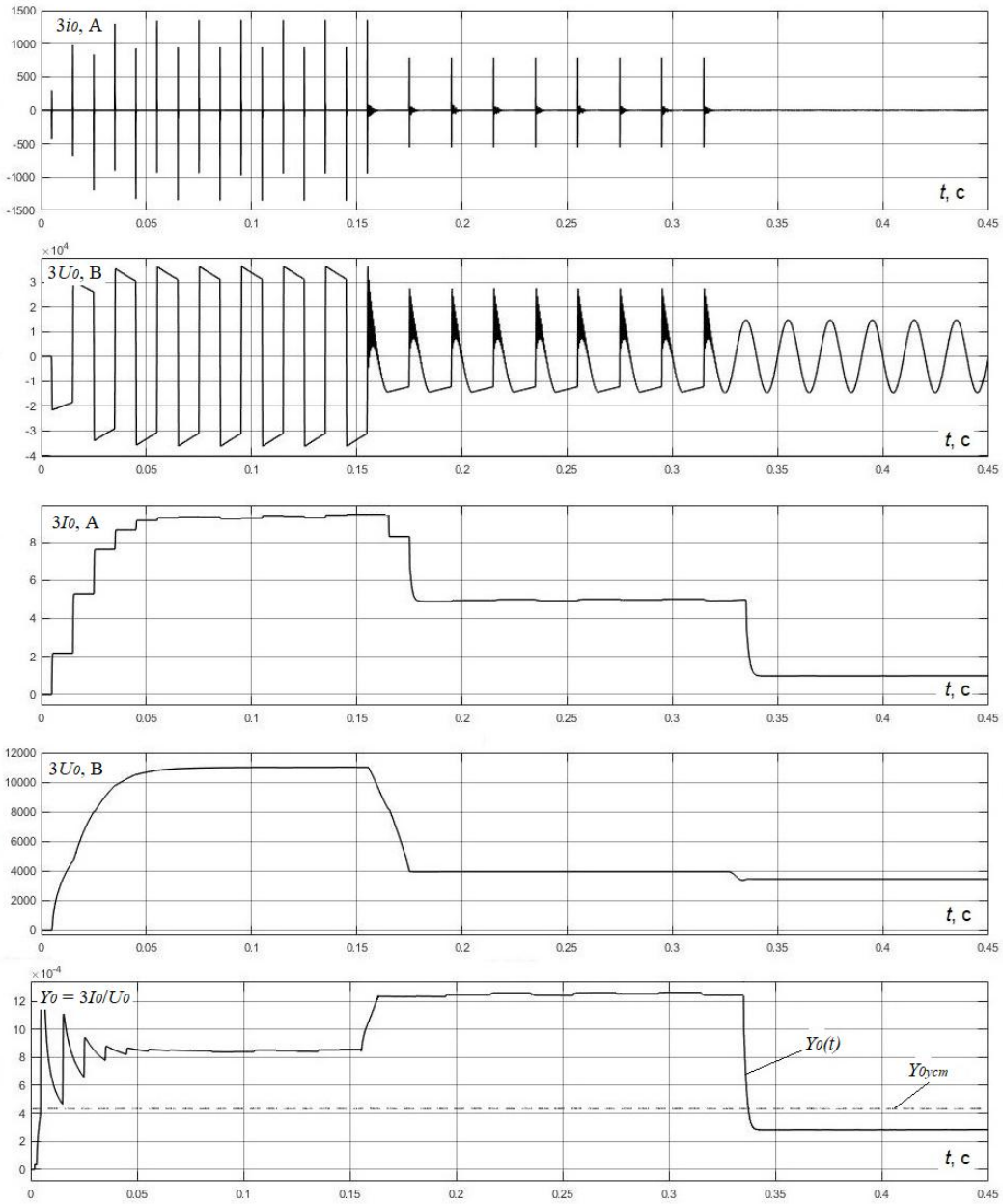


Рисунок 2.7 – Искажение замера Y_0 максимальной адмитансной защиты при дуговом ОЗЗ: $Y_0(t)$ –текущее значение полной проводимости нулевой последовательности; $Y_{0\,уст}$ – уставка по (2.21)

Поэтому для обеспечения несрабатываний в переходных режимах при внешних ДПОЗЗ уставки срабатывания максимальной адмитансной защиты в сетях с изолированной нейтралью в общем случае должны выбираться из условий:

$$Y_{0\,уст} \geq K_{отс} K_{пер} 3\omega C_{0\,собс}; \tag{2.24}$$

$$B_{0\,уст} \geq K_{отс} K_{пер} \left| B_{0\,нен} \right| \approx K_{отс} K_{пер} 3\omega C_{0\,собс}; \tag{2.25}$$

$$-B_{0\,уст} \le -K_{отс}K_{пер}\left|B_{0\,нен}\right| \approx -K_{отс}K_{пер}3\omega C_{0\,собс}, \qquad (2.26)$$

где $K_{пер} > 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение проводимости на зажимах защиты в переходных режимах при ДПОЗЗ.

При выборе уставок срабатывания $Y_{0\,уст}$, $B_{0\,уст}$ и $-B_{0\,уст}$ по (2.24)–(2.26) условие применимости максимальной адмитансной защиты в сетях с изолированной нейтралью (селективности при внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ), как и для рассмотренной выше адаптивной ТЗНП, будет определяться соотношением (2.15). Таким образом, необходимость отстройки от влияния переходных процессов при ДПОЗЗ ограничивает чувствительность и область возможного применения максимальных адмитансных защит от ОЗЗ.

В сетях с заземлением нейтрали через высокоомный резистор R_N при внешних УОЗЗ (например, т. $K_{з1}^{(1)}$, рис. 2.5) проводимость на зажимах защиты $\underline{Y}_0$, как и для сетей с изолированной нейтралью, определяется выражением (2.17), а при внутренних УОЗЗ для поврежденного присоединения равна

$$\underline{Y}_{0\,пов} = -3\left(G_{0\Sigma} - G_{0\,собс} + \frac{1}{3R_N}\right) - j3\omega\left(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}\right) \approx -\frac{1}{R_N} - j3\omega\left(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}\right). \qquad (2.27)$$

Соответственно, модуль проводимости $\underline{Y}_{0\,пов}$ равен

$$Y_{0\,пов} \approx \sqrt{\frac{1}{R_N^2} + \left[3\omega\left(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}\right)\right]^2}, \qquad (2.28)$$

т.е. высокоомное заземление нейтрали сети не нарушает принцип работы максимальной адмитансной защиты, но увеличивает замер и, соответственно, чувствительность при внутренних УОЗЗ. Следует отметить также, что высокоомное заземление нейтрали уменьшает броски переходных токов при дуговых ОЗЗ и за счет того позволяет уменьшить значение $K_{отс}$ в (2.24)–(2.26), дополнительно повышая чувствительность адмитансной защиты по сравнению с сетями с изолированной нейтралью и расширяя область ее возможного применения по величине $I_{с\,собс*}$.

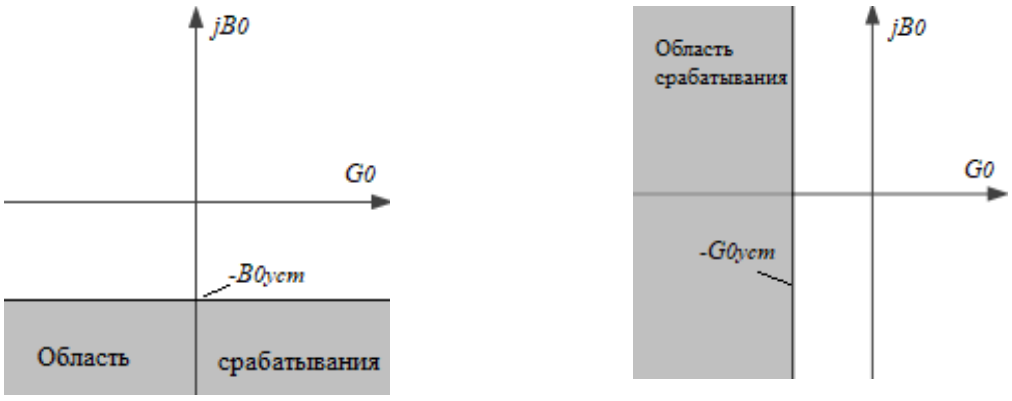
Для выполнения направленной адмитансной защиты в сетях, работающих с изолированной нейтралью и с заземлением нейтрали через высокоом-

ный резистор используется различие знаков активной G_0 и реактивной B_0 составляющих вектора проводимости $3\underline{Y}_0$ для неповрежденного и поврежденного присоединений. В сетях с изолированной нейтралью ввиду небольших значений активных потерь в изоляции фаз на землю для выполнения направленной адмитансной защиты более эффективно использование реактивной (емкостной) составляющей вектора $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$. Условие срабатывания направленной адмитансной защиты в этом случае в соответствии с (2.17) и (2.18) имеет вид

$$B_0 \le -B_{0\,уст}, \qquad (2.26)$$

где $B_{0\,уст}$ – уставка срабатывания по реактивной проводимости (определяемая, например, техническими возможностями реле защиты).

Характеристика срабатывания направленной адмитансной защиты по реактивной проводимости в комплексной плоскости $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$ имеет вид, показанный на рис. 2.8, а.



а) **б)**

Рисунок 2.8 – Характеристики срабатывания направленной адмитансной защиты:
а – по реактивной проводимости; б – по активной проводимости

При высокоомном заземлении нейтрали сопротивление резистора R_N обычно выбирается из условия [8, 9, 85–90 и др.]:

$$R_N = (1 \div 2) X_{c\Sigma} = (1 \div 2) \frac{1}{3\omega C_{0\Sigma}}. \qquad (2.29)$$

Потому величина активной составляющей проводимости G_0 в сетях с высокоомным заземлением нейтрали в отличие от сетей с изолированной нейтралью соизмерима с величиной B_0, что позволяет использовать для вы-

полнения направленной адмитансной защиты не только реактивную B_0, но и активную составляющую вектора полной проводимости $\underline{Y}_0$. Условие срабатывания направленной адмитансной защиты по активной проводимости имеет вид

$$G_0 \leq -G_{0\,уст}. \qquad (2.30)$$

Характеристика срабатывания направленной адмитансной защиты, основанной на использовании активной составляющей проводимости G_0, приведена на рис. 2.8, б.

В компенсированной сети при внешних УОЗЗ проводимость на зажимах защиты $\underline{Y}_0$ так же, как и в сети с изолированной нейтралью, определяется по выражению (2.17). При внутренних УОЗЗ проводимость на зажимах защиты в компенсированной сети определяется взятой с обратным знаком проводимостью внешней сети и индуктивностью ДГР L_N

$$\underline{Y}_0 = -3(G_{0\,\Sigma} - G_{0\,собс}) - j\omega 3(C_{0\,\Sigma} - 1/3\omega^2 L_N - C_{0\,собс}). \qquad (2.31)$$

Из (2.31) можно видеть, что при возможных в реальных условиях эксплуатации расстройках компенсации ($3\omega C_{0\,\Sigma} \neq 1/\omega L_N$) может изменяться знак реактивной составляющей, а также в значительных пределах значение полной проводимости нулевой последовательности. Потому выполнение селективной (ненаправленной или направленной) адмитансной защиты от ОЗЗ, основанной на использовании составляющих тока и напряжения рабочей частоты, в компенсированных сетях в общем случае возможно только на основе контроля активной составляющей проводимости G_0. Поскольку обеспечить селективность и высокую устойчивость функционирования при малых уровнях и нестабильности величины активной проводимости G_0, зависящей от текущего состояния изоляции защищаемого присоединения и сети, практически трудно, защиты от ОЗЗ, основанные на контроле активной проводимости нулевой последовательности в компенсированных сетях не получили применения. Отметим, что в компенсированных сетях для выполнения адмитансных защит от ОЗЗ могут быть использованы высшие гармонические составляющие тока и напряжения нулевой последовательности [52, 54, 141, 142].

2.3.2 **Сравнительный анализ известных способов выполнения и исполнений адмитансных защит от ОЗЗ для электрических сетей среднего напряжения.** Большинство известных по литературным и другим источникам исполнений адмитансной защиты от ОЗЗ для электрических сетей среднего напряжения основано использовании рассмотренных в п. 2.3.1 традиционных принципов выполнения. К таким исполнениям относятся, в частности, ненаправленные и направленные адмитансные защиты, применяемые в микропроцессорных терминалах РЗА для ЛЭП среднего напряжения производства фирм Schneider Electric, Areva, ABB, а также Польши и некоторых других стран [например, 52, 53, 139, 140]. В указанных устройствах адмитансной защиты в качестве воздействующей величины используется проводимость нулевой последовательности $\underline{Y}_0 = 3\underline{I}_0/\underline{U}_0$ и ее реактивная B_0 и активная G_0 составляющие, измеренные на рабочей частоте сети.

Основным недостатком данного подхода к построению ненаправленных адмитансных защит от ОЗЗ, как было показано выше, являются проблемы с обеспечением динамической устойчивости их функционирования в условиях влияния переходных процессов при ДПОЗЗ, что особенно актуально для кабельных сетей среднего напряжения, в которых замыкания через перемежающуюся дугу являются наиболее распространенным и опасным видом повреждений. Рассмотренный в п. 2.3.1 способ обеспечения динамической устойчивости функционирования при внешних ДПОЗЗ посредством загрубления защиты приводит к существенному снижению ее чувствительности, как при устойчивых, так и при дуговых внутренних замыканиях, и ограничению области ее возможного применения по величине $I_{c\ собс}$*.

Недостатком направленных адмитансных защит, основанных на использовании составляющих тока и напряжения нулевой последовательности основной частоты, является возможность отказов функционирования за счет искажений фазных соотношений контролируемых величин в переходных режимах при дуговых ОЗЗ. Рассматриваемый подход не позволяет также получить эффектив-

ное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ для компенсированных сетей.

Можно полагать, что опыт эксплуатации адмитансных защит в реальных сетях в европейских и других странах показал необходимость совершенствования принципов их выполнения. Наиболее активные исследования в данном направлении проводятся в отделении ABB Финляндии (ABB Oy Medium Voltage Products, Finland) [53, 54, 141, 142].

Основное направление разработок ABB Oy Medium Voltage Products (Finland) в области адмитансных защит, направленное на получение комплексного решения для электрических сетей среднего напряжения, работающих с изолированной нейтралью, с высокоомным заземлением нейтрали или с компенсацией емкостных токов, отражено в патенте [53].

В предложенном в [53] способе выполнения адмитансной защиты от ОЗЗ определяют разность между нулевой последовательностью тока до замыкания на землю и нулевой последовательностью тока во время замыкания на землю; определяют разность между нулевой последовательностью напряжения до замыкания на землю и нулевой последовательностью напряжения во время замыкания на землю; определяют полную проводимость нейтрали или величину, ей соответствующую, на основе отношения между разностями нулевых последовательностей токов и разностями нулевых последовательностей напряжений и сравнивают определенную полную проводимость нейтрали или величину, ей соответствующую, с заранее заданной характеристикой срабатывания в комплексной плоскости $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$.

Комплексное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ для сетей с различными режимами заземления нейтрали обеспечивается применением различных характеристик срабатывания в комплексной плоскости $\underline{Y}_0 = G_0 + jB_0$, позволяющих получить как ненаправленную максимальную, так и направленные адмитансные защиты на основе контроля реактивной или активной составляющей проводимости нулевой последовательности (рис. 2.9).

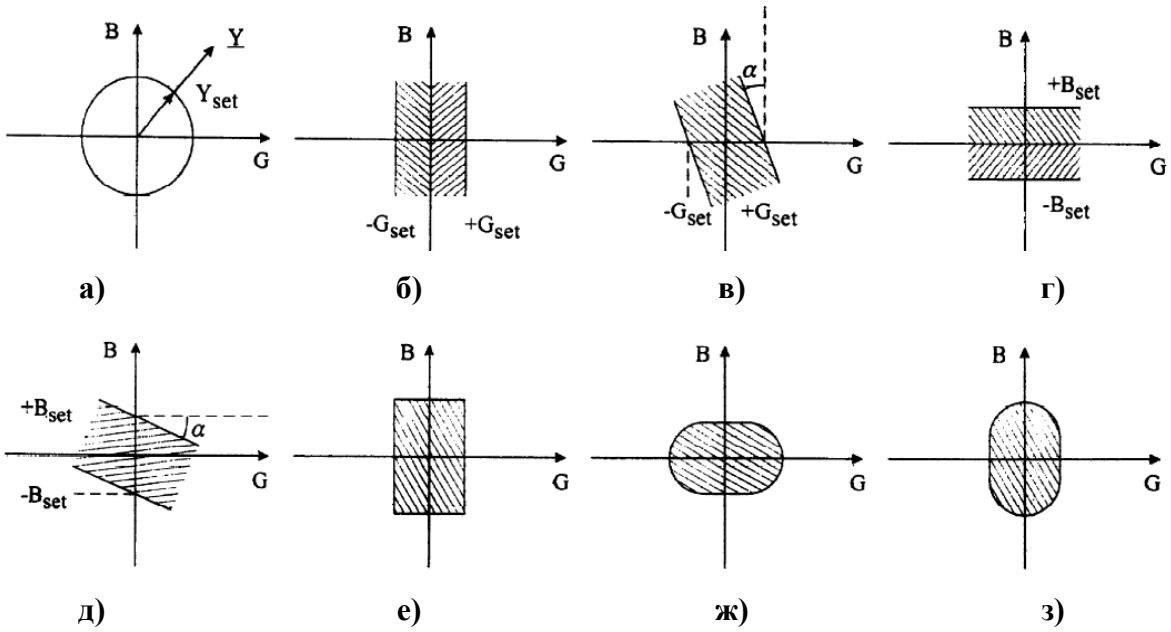


Рисунок 2.9 – Варианты характеристик срабатывания адмитансной защиты от ОЗЗ, разработанной ABB Oy Medium Voltage Products (Finland): а – полная проводимость; б – активная проводимость; в –активная проводимость с наклоном; г – реактивная проводимость; д – реактивная характеристика с наклоном; е, ж, з – комбинированные характеристики по реактивной и активной проводимости (варианты)

Заштрихованная область на характеристиках срабатывания рис. 2.9 является нерабочей областью, в которой защита не действует, оставшаяся часть комплексной плоскости $\underline{Y}_0$ представляет рабочую область, в которой защита срабатывает. Все модификации характеристик срабатывания реализуются в микропроцессорных исполнениях защиты в виде программных алгоритмов.

В отличие от рассмотренных выше традиционных исполнений защиты от ОЗЗ на основе контроля проводимости нулевой последовательности в данном способе в качестве воздействующей величины используется не отношение измеренных значений тока $3\underline{I}_0$ и напряжения $\underline{U}_0$, а отношение разности значений тока $3\underline{I}_0$ во время замыкания и в режиме, предшествующем ОЗЗ, к соответствующей разности напряжений $\underline{U}_0$, что позволяет повысить отстроенность от влияния смещения нейтрали сети и небалансов первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности и повысить чувствительность защиты. Особенностью рассматриваемой защиты является также применение пускового органа по напряжению нулевой последователь-

ности, реагирующего на разность значений тока $3\underline{U}_0$ во время замыкания и в режиме, предшествующем ОЗЗ, что обеспечивает повышение чувствительности защиты при требуемой отстроенности от режимов, не связанных с ОЗЗ (например, от коммутационных переключений в сети и др.).

В [53] не рассматриваются вопросы, связанные с обеспечением динамической устойчивости функционирования в условиях влияния на замер проводимости нулевой последовательности переходных процессов при дуговых ОЗЗ, что является наиболее важной проблемой для устройств защиты от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения. Следует также отметить, что в европейских странах компенсация емкостных токов с помощью ДГР, как правило, применяется в сочетании с заземляющим резистором, включаемым кратковременно параллельно реактору при возникновении ОЗЗ. Такое комбинированное заземление нейтрали через ДГР и резистор значительно увеличивает активную составляющую проводимости нулевой последовательности при внутренних замыкания на землю и существенно упрощает выполнение направленной адмитансной защиты. В России комбинированное заземление нейтрали через ДГР и параллельно включенный резистор получило до настоящего времени ограниченное применение, а в сетях с заземлением нейтрали только через ДГР применение направленных адмитансных защит, основанных на контроле знака активной составляющей проводимости нулевой последовательности неэффективно. В [53] также не рассматриваются методы обеспечения динамической устойчивости функционирования ненаправленных и направленных адмитансных защит с характеристиками срабатывания по рис. 2.9 в переходных режимах при дуговых ОЗЗ.

В целях повышения устойчивости функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ в ABB Oy Medium Voltage Products (Finland) разработана мультичастотная адмитансная защита [52, 54, 141, 142]. Новый способ выполнения направленной адмитансной защиты от ОЗЗ для распределительных сетей среднего напряжения основан на использовании двух подходов [141, 142]:

1) использования для контроля проводимости нулевой последовательности не только 1-й гармоники, но и высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности (названного авторами мультичастотным подходом к измерению проводимости нулевой последовательности);

2) использования кумулятивного (накопительного) метода вычислений проводимости нулевой последовательности, позволяющего более точно проводить измерения с существенными гармоническими составляющими при неустойчивом характере замыкания.

В соответствии с первым из указанных походов комплексная проводимость нулевой последовательности для защищаемого присоединения в сети с изолированной нейтралью определяется как сумма фазовых векторов (фазоров) проводимости нулевой последовательности для всех гармоник, включая составляющую основной частоты (1-ю гармонику):

$$\underline{Y}_0 = Re\left\{\underline{Y}_0^1\right\} + j\,Im\left\{\underline{Y}_0^1 + \sum_{k=2}^{n}\underline{Y}_0^k\right\}, \qquad (2.32)$$

где $\underline{Y}_0^1$ – вектор комплексной проводимости нулевой последовательности для 1-й гармоники тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$; $\underline{Y}_0^k$ – фазор комплексной проводимости нулевой последовательности для k-й гармоники тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$.

В соответствии с вторым подходом вычисление суммарной проводимости кумулятивным способом, т.е. геометрическим суммированием вычисленных по (2.31.) векторов проводимости $\underline{Y}_0$ за отдельные моменты времени по выражению:

$$\underline{Y}_{0sum_k} = \sum_{i(t_0)}^{n(t_к)} Re\left\{\underline{Y}_{0sum}(i)\right\} + j\sum_{i(t_0)}^{n(t_к)} Im\left\{\underline{Y}_{0sum}(i)\right\}, \qquad (2.33)$$

где $\underline{Y}_{0sum_k}$ – суммарная кумулятивная проводимость нулевой последовательности.

На рис. 2.10 приведена диаграмма, графически отображающая работу описываемого метода вычислений.

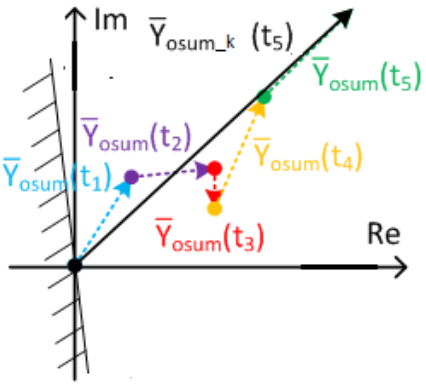


Рисунок 2.10 – Диаграмма вычисления кумулятивного вектора проводимости нулевой последовательности по способу [143, 144]

Оба указанных применяемых в защите подхода рассматриваются авторами как новые. Следует отметить, что мультичастотный подход используется и в других известных разработках защит от ОЗЗ для электрических сетей среднего напряжения, например, в предложенных ИГЭУ и НПП «ЭКРА» многопараметрических токовых защитах [23–25], а также в адаптивной токовой защите [143], принципы выполнения которой совершенствуются в данной работе.

Использование в сетях с изолированной нейтралью для замера реактивной составляющей проводимости нулевой последовательности, кроме 1-й (основной) гармоники, высших гармонических составляющих обеспечивает повышение динамической устойчивости функционирования адмитансной защиты в переходных режимах при замыканиях через перемежающуюся дугу и чувствительности при УОЗЗ. Кроме сетей с изолированной нейтралью, мультичастотная защита предназначена также для применения в сетях с высокоомным заземлением нейтрали и с резонансным заземлением нейтрали через ДГР. В описании защиты [141, 142], однако, не отмечается, что для обеспечения селективности и высокой устойчивости функционирования при УОЗЗ в сетях с резонансным заземлением нейтрали должна использоваться сумма векторов проводимости нулевой последовательности только для высших гармонических составляющих без активной и реактивной составляющих

для 1-й гармоники $Re\left\{\underline{Y}_0^1\right\}$ и $j\,Im\underline{Y}_0^1$. Последнее может означать, что разработанная в ABB Oy Medium Voltage Products (Finland) мультичастотная защита в основном ориентирована на применение в условиях широко используемого в европейских странах комбинированного режима заземления нейтрали, при котором параллельно ДГР (кратковременно или стационарно) подключается резистор, значительно увеличивающий активную составляющую проводимости по 1-й гармонике $Re\left\{\underline{Y}_0^1\right\}$. В России комбинированное заземление нейтрали через ДГР и резистор до настоящего времени получило ограниченное применение.

Недостатком мультичастотной адмитансной защиты является использование для замера проводимости $\underline{Y}_0$ на основе (2.31) и (2.32) дискретного спектра гармонических составляющих. Дискретный спектр высших гармоник имеет место только при устойчивых замыканиях, при этом в токе ОЗЗ преобладает ограниченное число высших гармоник, как правило, 5, 7, 11 и 13 порядков [23, 30–33, 144 и др.]. В переходных режимах при замыканиях через перемежающуюся дугу спектр высших гармонических составляющих тока ОЗЗ имеет сплошной характер, а частота и амплитуда преобладающих в нем высших гармонических составляющих зависит от множества факторов (параметров сети и поврежденной линии, удаленности места ОЗЗ от шин, переходного сопротивления в месте повреждения, условий гашения и повторного зажигания заземляющей дуги и др.), что при использовании для действия защиты дискретного спектра создает трудности с обеспечением высокой устойчивости ее функционирования.

Отметим также, что при больших частотах переходных токов $f_{св}$, превышающих несколько килогерц, на величину и знак проводимости нулевой последовательности существенное влияние начинают оказывать продольные индуктивные сопротивления кабельных и воздушных линий. За счет указанных высокочастотных составляющих в переходных режимах ОЗЗ возможны искажения знака реактивной составляющей проводимости нулевой последовательности, что, при отсутствии ограничения рабочего диапазона частот «сверху», может привести к неселективным действиям направ-

ленной адмитансной защиты, однако рабочий диапазон частот защиты в описаниях по [141, 142] ничем не ограничивается.

Рассмотренный мультичастотный способ позволяет выполнить только направленную защиту от ОЗЗ. В то же время известно, что в реальных условиях эксплуатации кабельных сетей 6–10 кВ в России достаточно часто встречаются отказы функционирования направленных защит от ОЗЗ (отказы срабатывания при внутренних и излишние срабатывания при внешних замыканиях) из-за ошибок в полярности подключения к защите вторичной обмотки кабельных ТТНП. Поэтому в эксплуатации предпочтение отдается ненаправленным защитам от ОЗЗ, а направленные защиты применяются только в тех случаях, когда использование ненаправленных защит не позволяет обеспечить селективность несрабатываний при внешних и требуемую чувствительность при внутренних замыканиях. С учетом этого, рассмотренную мультичастотную адмитансную защиту нельзя рассматривать как универсальное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях среднего напряжения с различными режимами заземления нейтрали.

2.4 Общая оценка эффективности применения известных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ

Основные результаты сравнительного анализа известных способов выполнения и исполнений адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ и общая оценка их эффективности по сформулированным в разделе 2.1 критериям приведена в табл. 2.1.

Анализ данных, приведенных в табл. 2.1, позволяет сделать вывод о том, что из известных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ по совокупности критериев наиболее эффективной представляется мультичастотная защита, основанная на использовании электрических величин как переходного процесса, так и установившегося режима замыкания.

Таблица 2.1 – Общая оценка эффективности известных способов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от ОЗЗ

Наименование защиты и источник с описанием способа действия	**Основные свойства**								**Общая оценка эффективности**
	Условие применимости по величине $I_{c\ собс}$*	**Область применения по режимам заземления нейтрали сети**	**Род используемых для действия защиты электрических величин**	**Направленная / ненаправленная**	**Фиксируемые защитой разновидности ОЗЗ**	**Непрерывность действия при УОЗЗ**	**Динамическая устойчивость функционирования**	**Чувствительность к ОЗЗ через большое переходное сопротивление**	
1. Адаптивная токовая [49]	**(2.15)**	**И[1)], R_N**	**Ток $3I_0$ и напр. U_0 УОЗЗ**	**Ненаправленная**	**УОЗЗ**	**Да**	**Низкая**	**Да**	**Низкая**
2. Адаптивная токовая [50]	**(2.15)**	**И, R_N**	**Ток $3I_0$ и напр. U_0 УОЗЗ**	**Ненаправленная**	**УОЗЗ**	**Да**	**Низкая**	**Да**	**Низкая**
3. Адмитансные защиты на классических принципах [139, 140 и др.]	**Для ненаправленных (2.15), для направленных без ограничений**	**И, R_N**	**Ток $3I_0$ и напр. U_0 УОЗЗ**	**Ненаправленная, направленная**	**УОЗЗ**	**Да**	**Низкая**	**Да**	**Средняя**
4. Многофункциональная адмитансная защита [53]	**Для ненаправленных (2.15), для направленных без ограничений**	**И, R_N, L_N**	**Ток $3I_0$ и напр. U_0 УОЗЗ**	**Ненаправленная, направленная**	**УОЗЗ**	**Да**	**Низкая**	**Да**	**Средняя**

Окончание таблицы 2.1

Наименование защиты и источник с описанием способа действия	Основные свойства								Общая оценка эффективности
	Условие применимости по величине $I_{c\ собс}$*	Область применения по режимам заземления нейтрали сети	Род используемых для действия защиты электрических величин	Направленная / ненаправленная	Фиксируемые защитой разновидности ОЗЗ	Непрерывность действия при УОЗЗ	Динамическая устойчивость функционирования	Чувствительность к ОЗЗ через большое переходное сопротивление	
5. Мультичастотная адмитанасная защита [141, 142]	**Без ограничений**	**И, R_N, L_N**	**Сумма 1-й гармоники и ВГ переходного и установившегося режима ОЗЗ**	**Направленная**	**УОЗЗ, ДПОЗЗ**	**Да**	**Высокая**	**Высокая**	**Высокая**

Примечание: И – изолированная нейтраль; R_N – заземление нейтрали через высокоомный резистор; L_N – заземление нейтрали через индуктивное сопротивление ДГР.

2.5 Выводы по главе 2

2.5.1 Сформулированы критерии для сравнения общей эффективности защит от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ.

2.5.2 На основе сравнительного анализа показано, что известные способы и выполнения адаптивных токовых защит от ОЗЗ обеспечивают адаптивность только к влиянию на чувствительность больших переходных сопротивлений в месте повреждения, но не позволяют обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ и имеют область применения, ограниченную сетями с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали.

2.5.3 Применение классического адмитансного способа выполнения адмитансных защит от ОЗЗ, основанный на использовании составляющих основной частоты токов и напряжения нулевой последовательности, позволяет получить как ненаправленные максимальные, так и направленные защиты от ОЗЗ для сетей с различными режимами заземления нейтрали, но не обеспечивает высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ и не всегда эффективен в компенсированных сетях с резонасным заземлением нейтрали.

2.5.4 Наиболее эффективное решение позволяет получить мультичастотный способ выполнения адмитансной защиты, предложенный ABB Oy Medium Voltage Products (Finland) и основанный на использовании как составляющих основной частоты, так и высших гармонических составляющих переходного и установившегося режима ОЗЗ. Недостатком данного мультичастотного способа является возможность выполнения на его основе только направленной защиты ОЗЗ.

Глава 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

3.1 Адаптивная токовая защита, основанная на использовании составляющих основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности

3.1.1 **Способ действия адаптивной токовой защиты от ОЗЗ на основе составляющих основной частоты тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$.** Из комплексной схемы замещения по методу симметричных составляющих для кабельной сети 6–10 кВ, работающей с изолированной нейтралью (рис. 2.1), пренебрегая незначительными активными потерями в изоляции фаз сети на землю (т.е. влиянием проводимости $G_{0\Sigma}$, рис. 2.1), для мгновенных значений составляющих основной частоты 50 Гц тока нулевой последовательности в месте ОЗЗ и напряжения нулевой последовательности на шинах источника питания можно получить следующее соотношение

$$3i_{0\,50}(t) \approx 3C_{0\Sigma}\frac{du_{0\,50}(t)}{dt} = 3C_{0\Sigma}\omega U_{0m\,50}\cos(\omega t + \varphi_{0\,50}) = -3I_{0m\,50}\sin(\omega t + \varphi_{0\,50}), \quad (3.1)$$

где $U_{0m\,50}$ – амплитуда составляющей основной частоты напряжения $u_0(t)$; $3\varphi_{0\,50}$ – начальная фаза составляющей основной частоты напряжения $3u_0$; $I_{0m\,50}$ – амплитуда составляющей основной частоты тока $i_0(t)$.

В установившемся режиме ОЗЗ $U_{0m\,50}$ зависит только от амплитуды фазного напряжения $U_{ф.m}$ в режиме, предшествующем замыканию, и переходного сопротивления $R_П$ в месте повреждения. В спектре переходного тока $3i_0$ и переходного напряжения $3u_0$ при дуговых ОЗЗ также содержится составляющая с частотой 50 Гц. Так как на частоте 50 Гц проводимость нулевой последовательности КЛ имеет практически чисто емкостный характер, то соотно-

шение (3.1) справедливо не только для установившегося, но и для переходных режимов ОЗЗ, но амплитуда переходной составляющей $U_{0m\,50}$ при замыканиях через перемежающуюся дугу зависит не только от $U_{0m\,50}$ и величины $R_П$, но и множества других факторов: параметров сети, поврежденной линии, условий гашения и повторного зажигания заземляющей дуги и др.

Из (3.1) следует, что в любых режимах ОЗЗ текущее среднеквадратичное значение основной составляющей тока нулевой последовательности в месте замыкания связано с текущим среднеквадратичным значением основной составляющей напряжения нулевой последовательности соотношением

$$3I_{0\,50}(t) \approx 3C_{0\Sigma}\omega U_{0\,50}(t). \qquad (3.2)$$

С учетом (3.2) при внешних (рис. 2.5, т. $K_{з1}^{(1)}$) и внутренних (рис. 2.5, т. $K_{з2}^{(1)}$) замыканиях для среднеквадратичных значений основной составляющей токов нулевой последовательности в неповрежденном и поврежденном присоединениях, используемых в цифровых токовых защитах в качестве воздействующей величины, будем иметь:

$$3I_{0\,50\,неп}(t) \approx 3C_{0собс}\omega U_{0\,50}(t); \qquad (3.3)$$

$$3I_{0\,50\,пов}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0собс})\omega U_{0\,50}(t). \qquad (3.4)$$

Введем понятие текущего значения коэффициента полноты замыкания на землю по составляющей основной частоты напряжения нулевой последовательности

$$b_{50}(t) = \frac{U_{0\,50}(t)}{U_ф}. \qquad (3.5)$$

С учетом (3.5) из (3.3) и (3.4) получим

$$3I_{0\,50\,неп}(t) \approx 3C_{0собс}\omega b_{50}(t)U_ф = b_{50}(t)I_{с\,собс}; \qquad (3.6)$$

$$3I_{0\,50\,пов}(t) \approx 3(C_{0\Sigma} - C_{0собс})\omega b_{50}(t)U_ф = b_{50}(t)(I_{с\Sigma} - I_{с\,собс}). \qquad (3.7)$$

На основе соотношений (3.6) и (3.7) можно построить максимальную токовую защиту от ОЗЗ, обеспечивающую адаптивность не только к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения $R_П$, но и переходных токов при замыканиях через перемежающуюся дугу.

Для обеспечения несрабатываний при внешних устойчивых и дуговых ОЗЗ текущее значение уставки по току срабатывания предлагаемой адаптивной ТЗНП должно удовлетворять соотношению

$$I_{0\,уст}(t) \geq K_{отс} b_{50}(t) I_{с\,собс}, \qquad (3.8)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности функционирования защиты (погрешности первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, схемы формирования сравниваемых величин, расчета $I_{о\,собс}$, оценки коэффициента полноты замыкания на основе (3.5) и др.).

Очевидно, что для адаптивной защиты значение $K_{отс}$ должно быть несколько больше, чем для классической ТЗНП ($K_{отс}$ = 1,3 [17–22]) из-за необходимости учитывать дополнительно погрешности первичного преобразователя напряжения и оценки коэффициента полноты замыкания на основе (3.5). С учетом указанных дополнительных погрешностей для адаптивной ТЗНП в (3.8), на наш взгляд, следует принимать $K_{отс} \approx 1{,}5$.

Чувствительность адаптивной ТЗНП на рассматриваемом принципе оценивается соотношением

$$K_ч = \frac{3I_{0\,50\,пов}}{I_{0\,с.з}} = \frac{b_{50}(t)(I_{c\Sigma} - I_{с\,собс})}{b_{50}(t) K_{отс} I_{с\,собс}} = \frac{(I_{c\Sigma} - I_{с\,собс})}{K_{отс} I_{с\,собс}} \geq K_{ч.мин}, \qquad (3.9)$$

где $K_{ч.мин}$ – минимальный коэффициент чувствительности для токовых защит от ОЗЗ, основанных на использовании полных токов нулевой последовательности или их оставляющих основной частоты.

Из (3.9) можно сделать два важных для оценки эффективности функционирования предлагаемой адаптивной токовой защиты вывода:

1) коэффициент чувствительности защиты не зависит от полноты замыкания на землю по (3.5), потому значение $K_{ч.мин}$ для адаптивной ТЗНП может быть принято таким же, как и для классической ТЗНП ($K_{ч.мин}$ = 1,25 [4]);

2) чувствительность защиты остается постоянной как при УОЗЗ, так и в динамических режимах функционирования при дуговых ОЗЗ.

Из (3.8) и (3.9) можно получить условие применимости предлагаемой адаптивной ТЗНП по относительной величине собственного емкостного тока защищаемого присоединения

$$I_{c\,собс*} = \frac{I_{c\,собс}}{I_{c\Sigma}} \le \frac{1}{1 + K_{отс} K_{ч.мин}}. \qquad (3.10)$$

Из (3.10) при $K_{отс}$ = 1,5 и $K_{ч.мин}$ = 1,25 получим

$$I_{c\,собс*} \le \frac{1}{1 + 1{,}5 \cdot 1{,}25} \approx 0{,}35.$$

Для классических ТЗНП аналогичный показатель имеет значения порядка $I_{c\,собс*}$ = 0,15–0,2 [например, 18, 29], что значительно ограничивает область возможного применения защиты данного типа. По данным [23, 25, 29, 34] условию $I_{c\,собс*} \le 0{,}35$ на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ удовлетворяет более 90% всех присоединений, на РП и ТП – 100% присоединений.

Предлагаемая адаптивная ТЗНП может эффективно применяться и в кабельных сетях 6–10 кВ с заземлением нейтрали через высокоомный резистор. В сетях с данным режимом заземления нейтрали при внешних ОЗЗ, как и в сетях с изолированной нейтралью, ток $3I_{0\,50}$ в неповрежденных присоединениях определяется собственным емкостным током $I_{c\,собс}$, т.е. выражением (3.6). В поврежденном присоединении, кроме суммы емкостных токов всех неповрежденных присоединений, протекает также активный ток I_R, создаваемый заземляющим резистором R_N, подключенным к нейтрали (рис. 2.5). С учетом этого ток $3I_{0\,50}$ в поврежденном присоединении определяется выражением

$$3I_{0\,50\,пов}(t) \approx b_{50}(t)\sqrt{(I_{c\Sigma} - I_{c\,собс})^2 + I_R^2} = b_{50}(t)\sqrt{(I_{c\Sigma} - I_{c\,собс})^2 + (U_ф / R_N)^2}. \qquad (3.11)$$

Таким образом, активная составляющая тока ОЗЗ, создаваемая заземляющим резистором R_N, не влияет на выбор уставки по току срабатывания по условию отстройки от внешних ОЗЗ, но увеличивает чувствительность адаптивной токовой защиты при внутренних замыканиях.

3.1.2 **Структурно-функциональная схема адаптивной токовой защиты от ОЗЗ на основе составляющих основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности.** С учетом описанного в п. 3.1.1 способа действия упрощенную структурно-функциональную схему адаптивной ТЗНП, основанной на использовании составляющих основной частоты тока $3i_0$ и напряжения u_0 можно представить в виде, показанном на рис. 3.1.

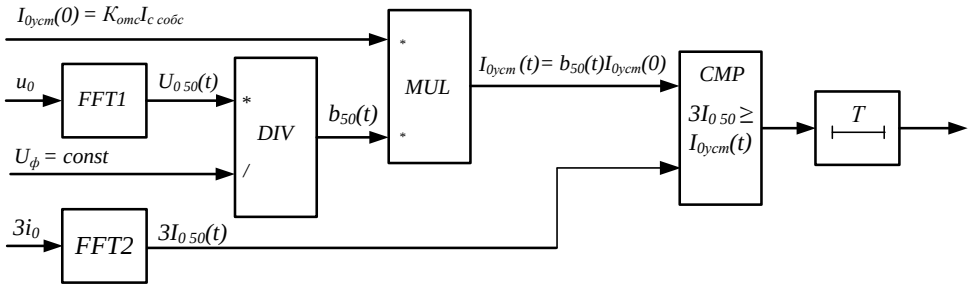
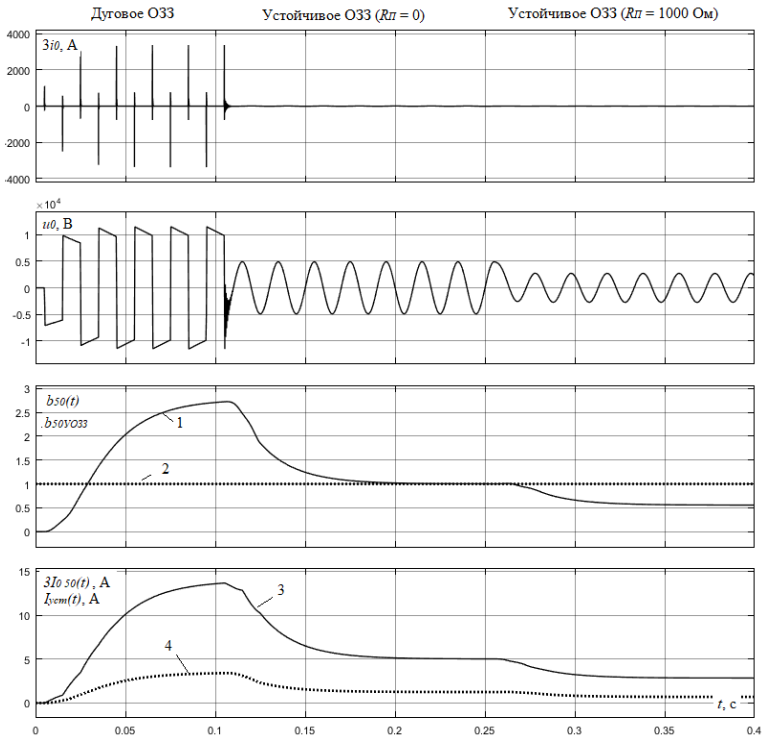


Рисунок 3.1 – Структурно-функциональная схема адаптивной ТЗНП на основе составляющих основной частоты тока $3i_0$ и напряжения u_0

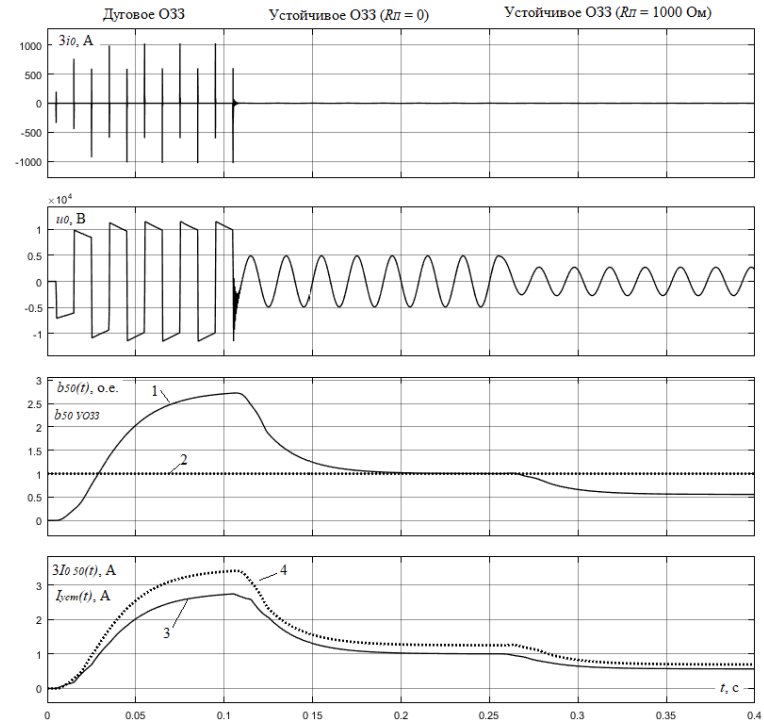
В схеме по рис. 3.1: *FFT1, FFT2* – блоки быстрого преобразования Фурье, обеспечивающие выделение из входных величин $3i_0$ и u_0 составляющих основной частоты 50 Гц и формирование их текущих среднеквадратичных значений $3I_{0\,50}(t)$ и $U_{0\,50}(t)$; *DIV* – блок деления, формирующий на выходе текущее значение коэффициента полноты замыкания в соответствии с (3.5); *MUL* – блок умножения, формирующий на выходе текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0\,уст}(t)$ в соответствии с (3.8); *CMP* – схема сравнения текущего значения тока $3I_{0\,50}(t)$ с текущим значением уставки $I_{0\,уст}(t)$; *T* – элемент задержки на срабатывание; $U_ф$ – фазное напряжение сети.

3.1.3 **Анализ функционирования адаптивной ТЗНП при различных видах ОЗЗ**. На рис. 3.2 и 3.3 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы входных величин $3i_0$ и u_0 и сигналов на выходах блоков структурно-функциональной схемы защиты при внешнем и внутреннем ОЗЗ, иллюстрирующие принцип ее действия. Осциллограммы на рис. 3.2 получены на имитационной модели кабельной сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 А при собственном емкостном токе неповрежденного присоединения $I_{с\ собс}$ = 0,2$I_{c\Sigma}$, осциллограммы на рис. 3.3 – на имитационной модели кабельной сети с теми же параметрами, но с высокоомным заземлением нейтрали. На всех осциллограм-

мах дуговое ОЗЗ (по теории W Petersen) переходит сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П = 0$), а затем в УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П = 1000$ Ом).

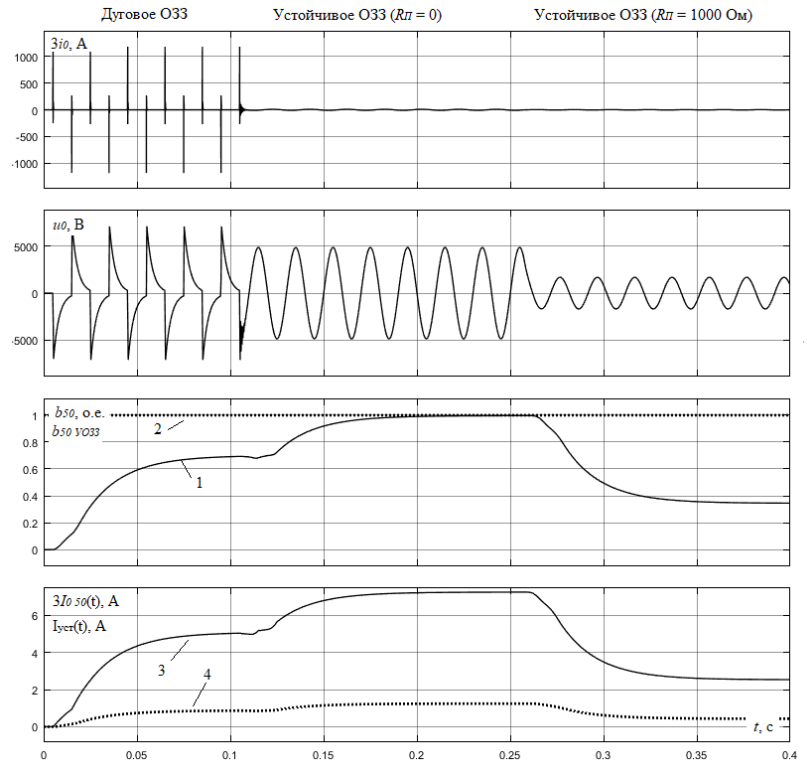


а)

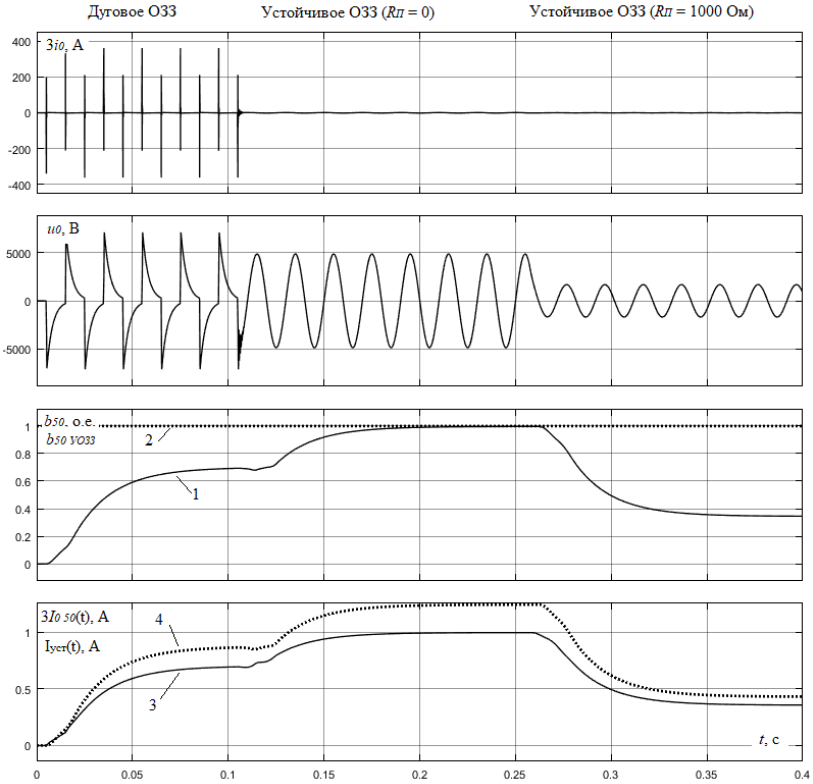


б)

Рисунок 3.2 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу адаптивной ТЗНП на основе составляющих основной частоты 50 Гц тока $3i_0$ и напряжения u_0 при внутреннем (а) и при внешнем (б) ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью: 1 – $b_{50}(t)$ по (3.5); 2 – коэффициент b_{50} в режиме УОЗЗ; 3 – $3I_{0\ 50}(t)$; 4 – $I_{0\ уст}(t)$



а)



б)

Рисунок 3.3 — Осциллограммы, иллюстрирующие работу адаптивной ТЗНП на основе составляющих основной частоты 50 Гц тока $3i_0$ и напряжения u_0 при внутреннем (а) и при внешнем (б) ОЗЗ в сети с высокоомным заземлением нейтрали: 1 – 4 – то же самое, что и на рис. 3.2

Из осциллограмм, приведенных на рис. 3.2 и 3.3, можно видеть, что при любых изменениях воздействующей величины – среднеквадратичного значения основной составляющей тока нулевой последовательности $3I_{0\,50}$, обусловленных как влиянием переходного сопротивления в режиме УОЗЗ, так и влиянием переходных токов при замыканиях через перемежающуюся дугу, автоматически обеспечивается как требуемый уровень отстроенности защиты от внешних ОЗЗ ($I_{уст}(t)/3I_{0\,50}(t) \geq K_{отс}$, кривые 3 и 4 на рис. 3.2, б, 3.3, б), так и требуемый уровень чувствительности при внутренних ОЗЗ ($3I_{0\,50}(t)\,/I_{уст}(t) \geq K_{ч.мин}$, кривые 3 и 4 на рис. 3.2, а, 3.3, а).

Исследования, выполненные на имитационных моделях, подтвердили работоспособность адаптивной ТЗНП на основе предложенного способа и в кабельных сетях 6–10 кВ с высокоомным заземлением нейтрали.

Основным недостатком рассмотренной адаптивной ТЗНП является возможность ее применения только в некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, что ограничивает область ее возможного применения. Защита на основе составляющих основной частоты 50 Гц тока $3i_0$ и напряжения u_0 по принципу действия не позволяет также фиксировать самоустраняющиеся КрОЗЗ, например, однократные пробои изоляции, для использования информации о них в целях диагностирования состояния изоляции элементов контролируемой кабельной сети. Возможность фиксации КрОЗЗ обеспечивают только защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса. К таким защитам относятся, в частности, упомянутые выше мультичастотные защиты от ОЗЗ.

3.2 Мультичастотная адаптивная токовая защита для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью

3.2.1 **Способ действия мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью.** В первой главе было показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих с

изолированной нейтралью, ток нулевой последовательности в месте ОЗЗ $3i_{0з}$ и напряжение нулевой последовательности на шинах источника питания u_0 связаны соотношением (1.4), т.е. как для принужденной составляющей основной частоты, так и для разрядной и зарядной высоко- и среднечастотных составляющих справедливо приближенное уравнение

$$3i_{0з} \approx 3C_{0\Sigma}\frac{du_0}{dt}. \qquad (3.12)$$

В [33] показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ соотношение (3.12) выполняется для ВГ тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ в диапазоне частот до 650 Гц, используемом в защитах от ОЗЗ на основе высших гармоник. В [47, 51] установлено, что (3.12) справедливо также для разрядной и зарядной составляющих переходного тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Практически (3.12) будет выполняться для высших гармонических составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$, как в установившемся, так и в переходных режимах ОЗЗ в диапазоне частот, в пределах которого входное сопротивление нулевой последовательности КЛ 6–10 кВ имеет емкостный характер. В [23, 145] на основе расчетов и исследований на имитационных моделях показано, что при параметрах КЛ, характерных для кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения (длинах, сечениях, удельных продольных и поперечных параметрах, см. раздел 1.1), входное сопротивление нулевой последовательности даже для самых протяженных линий сохраняет практически чисто емкостный характер в диапазоне частот до 2 кГц и более. С учетом этого примем в дальнейшем, что в кабельных сетях 6–10 кВ соотношение (3.12) справедливо для высших гармонических составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$, как в установившемся, так и в переходных режимах ОЗЗ, в диапазоне частот $f \leq 2$ кГц.

В указанном диапазоне частот ток $3i_{0з}$ в месте ОЗЗ распределяется в неповрежденных присоединениях пропорционально их собственным емкостям фаз на землю $3C_{0\,собс}$, т.е. с учетом (3.12) определяется выражением

$$3i_{0неп} = 3C_{0\,собс}\frac{du_0}{dt}, \qquad (3.13)$$

а ток в поврежденном присоединении $3i_{0\,пов}$ в сети с изолированной нейтралью равен взятой с обратным знаком сумме токов $3i_{0\,неп}$ всех неповрежденных присоединений, т.е. с учетом (3.12) равен

$$3i_{0пов} = -\sum_{k=1}^{n-1} 3i_{0\,неп} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\frac{du_0}{dt}, \qquad (3.14)$$

где n – общее число присоединений на защищаемом объекте.

Из (3.13) и (3.14) для текущих среднеквадратичных значений токов $3i_{0\,неп}$ и $3i_{0\,пов}$ на интервале времени наблюдения $T_н$ получим:

$$3I_{0неп}(t) = 3C_{0\,собс}\sqrt{\frac{1}{T_н}\int_{t_0}^{t_0+T_н}\left[u_0'(t)\right]^2 dt} = 3C_{0\,собс}U_0'(t); \qquad (3.15)$$

$$3I_{0\,пов}(t) = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\sqrt{\frac{1}{T_н}\int_{t_0}^{t_0+T_н}\left[u_0'(t)\right]^2 dt} = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})U_0'(t). \qquad (3.16)$$

На основе соотношений (3.15) и (3.16) можно выполнить адаптивную ТЗНП. Для обеспечения несрабатываний адаптивной ТЗНП при внешних устойчивых и дуговых ОЗЗ текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0\,уст}(t)$ должно регулироваться в соответствии с условием

$$I_{0\,уст}(t) \geq K_{отс}3C_{0\,собс}U_0'(t), \qquad (3.17)$$

где $K_{отс}$ – коэффициент отстройки, учитывающий погрешности функционирования мультичастотной адаптивной токовой защиты (можно принять $K_{отс} \approx 1{,}5$).

При внутренних устойчивых и дуговых ОЗЗ срабатывания защиты обеспечиваются, если выполняется соотношение:

$$3I_{0\,пов}(t) = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})U_0'(t) \geq K_{ч.мин}I_{0\,уст}(t), \qquad (3.18)$$

где $K_{ч.мин}$ – минимальный коэффициент чувствительности.

Так как рассматриваемая защита основана на использовании не только составляющих основной частоты, но и высших гармонических составляющих тока $3i_0$, требования к ее чувствительности можно принять такими же, как и для токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ ($K_{ч.мин}$ = 1,5 [4]).

Из (3.15) и (3.16) можно получить условие применимости мультичастотной адаптивной ТЗНП в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью по относительной величине $I_{c\,собс*}$ защищаемого присоединения:

$$3C_{0\,собс*} = \frac{3C_{0\,собс}}{3C_{0\Sigma}} = I_{c\,собс*} \le \frac{1}{1 + K_{отс}K_{ч.мин}}. \qquad (3.19)$$

Из (3.17) при $K_{отс}$ = 1,5 и $K_{ч.мин}$ = 1,5 получим

$$I_{c\,собс*} \le \frac{1}{1 + 1{,}5 \cdot 1{,}5} \approx 0{,}31.$$

Таким образом, область возможного применения мультичастотной адаптивной ТЗНП по величине $I_{c\,собс*}$ несколько меньше, чем рассмотренной в разделе 3.1 адаптивной ТЗНП на основе составляющих основной частоты тока и напряжения нулевой последовательности (для последней $I_{c\,собс*} \le$ 0,35). Однако существенными преимуществами мультичастотной адаптивной ТЗНП является более высокая устойчивость функционирования, в частности, более высокая чувствительность, при замыканиях через перемежающуюся дугу, а также возможность фиксации КрОЗЗ, обусловленные использованием в составе воздействующей величины не только составляющей 50 Гц, но и высокочастотных составляющих тока переходного процесса при ОЗЗ.

В кабельных сетях 6–10 кВ с заземлением нейтрали через высокоомный резистор токи $3i_{0\,неп}$ и $3I_{0\,неп}(t)$ при внешних ОЗЗ, как и в сети с изолированной нейтралью, определяются соотношениями (3.13) и (3.15), а условия несрабатывания адаптивной защиты – соответственно соотношением (3.17). При внутренних ОЗЗ ток $3i_{0\,пов}$ в поврежденном присоединении равен:

$$3i_{0пов} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\frac{du_0}{dt} - \frac{u_0}{R_N}, \qquad (3.20)$$

Текущее среднеквадратичное значение тока нулевой последовательности в поврежденном присоединении:

$$3I_{0пов}(t) = \sqrt{\left[3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})U_0'(t)\right]^2 + \frac{U_0(t)^2}{R_N^2}}, \qquad (3.21)$$

где $U_0(t)$ – текущее среднеквадратичное значение напряжения $u_0(t)$.

Из сравнения (3.16) и (3.21) можно видеть, что заземление нейтрали кабельной сети 6–10 кВ через высокоомный резистор, не влияя на токи в неповрежденных присоединениях, увеличивает среднеквадратичное значение тока в поврежденном присоединении и, следовательно, чувствительность защиты по сравнению с сетями, работающими с изолированной нейтралью. Следует отметить, что влияние заземляющего резистора R_N на чувствительность мультичастотной адаптивной ТЗНП проявляется в основном в установившемся режиме ОЗЗ. В переходных режимах высокочастотные емкостные токи значительно больше активной составляющей тока ОЗЗ u_0/R_N, и последняя не оказывает существенного влияния на среднеквадратичное значение тока $3I_{0\,пов}(t)$.

3.2.2 **Структурно-функциональная схема мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ.** В соответствии с описанным п. 3.2.1 способом действия упрощенную структурно-функциональную схему мультичастотной адаптивной можно представить в виде, показанном на рис. 3.4.

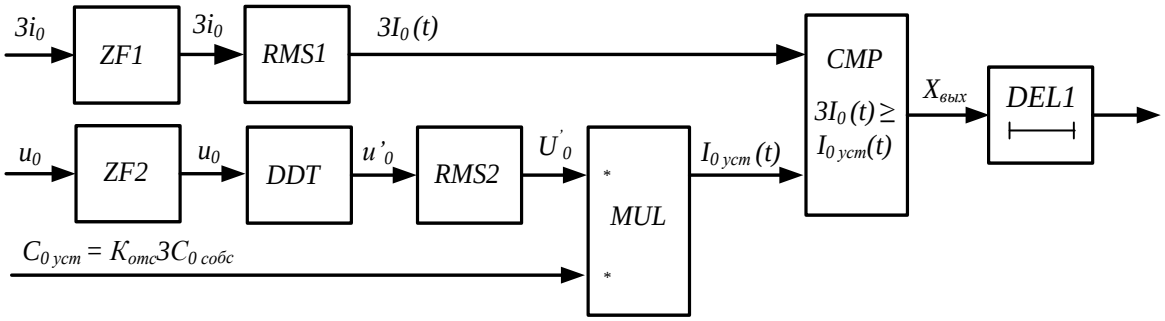


Рисунок 3.4 – Структурно-функциональная схема мультичастотной адаптивной ТЗНП

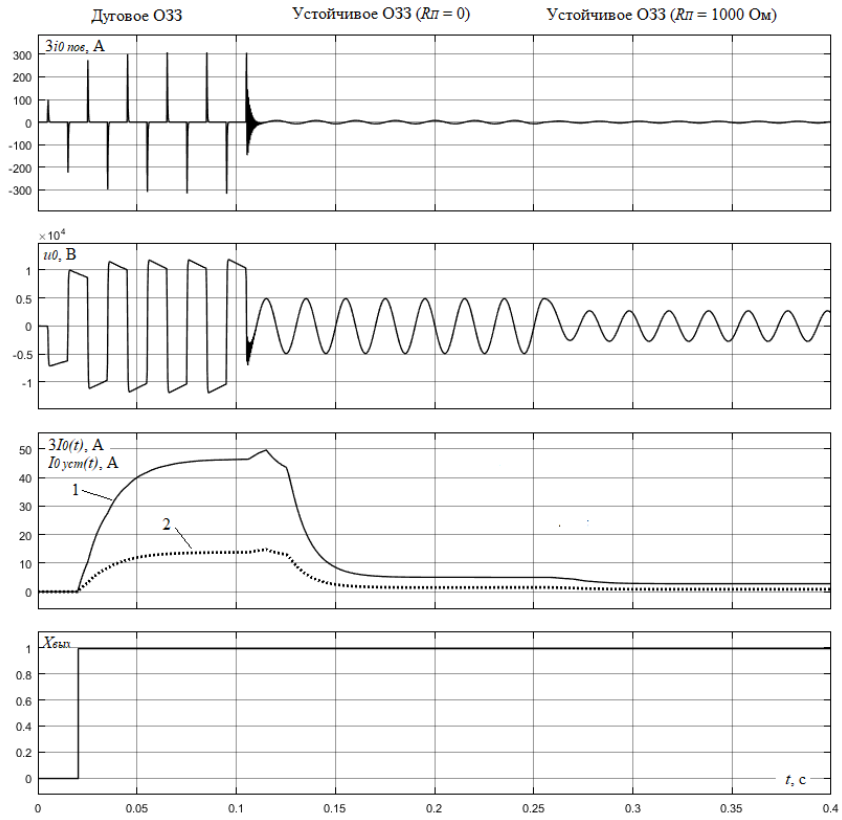
В схеме по рис. 3.4: *ZF1*, *ZF2* – фильтры низших частот (ФНЧ), обеспечивающие подавление во входных величинах $3i_0$ и u_0 высокочастотных составляющих с частотой $f > 2$ кГц; *D/DT* – дифференциатор; *RMS1*, *RMS2* – блоки формирования текущих среднеквадратичных значений $3I_0(t)$ и $U_0^{'}(t)$; *MUL* – блок умножения, формирующий на выходе текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0\,уст}(t)$ в соответствии с (3.17); *CMP* – схема сравнения текущего значения тока $3I_0(t)$ с текущим значением уставки $I_{0\,уст}(t)$; *DEL1* – элемент временной задержки на срабатывание.

3.2.3 **Анализ функционирования мультичастотной адаптивной ТЗНП при различных видах ОЗЗ на имитационных моделях кабельных сетей**. Исследования проводились на имитационных моделях кабельных сетей 6 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ = 5÷30 А и режимами заземления нейтрали (изолированная нейтраль и заземленная через высокоомный резистор). Имитировались дуговые ОЗЗ по теории W. Petersen и I.E. Peters, J. Slepian, а также сложные дуговые ОЗЗ, переходящие в УОЗЗ с различными значениями переходного сопротивления $R_П$ в месте повреждения.

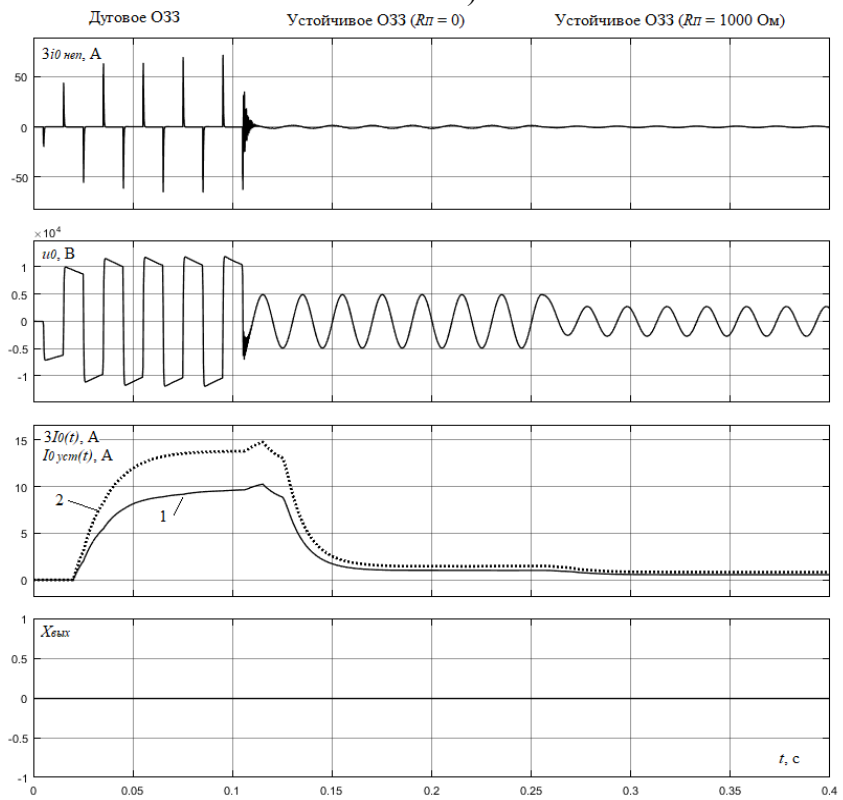
На рис. 3.5 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы тока $3i_0$ и напряжения u_0 на выходах фильтров *ZF1* и *ZF2*, текущего значения воздействующей величины $3I_0(t)$ на выходе блока *RMS1* и текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0уст}(t)$ на выходе блока перемножения *MUL* и сигнала на выходе схемы сравнения *CMP* (рис. 3.4) в сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 при дуговом ОЗЗ по теории W Petersen, переходящем сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0), а затем в УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ = 1000 Ом). Осциллограммы на рис. 3.6 иллюстрируют работу защиты в сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в УОЗЗ.

Результаты вычислительных экспериментов на имитационных моделях кабельных сетей с $U_{ном}$ = 6 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ подтвердили эффективность функционирования мультичастотной адаптивной токовой защиты как при изолированной нейтрали сети, так и при заземлении нейтрали через высокомный резистор. При всех разновидностях дуговых и устойчивых ОЗЗ защита обеспечивала заданный уровень отстроенности по воздействующей величине, определяемый значением коэффициента отстройки $K_{отс}$ в (3.17), и требуемую чувствительность ($K_ч \geq K_{ч.мин}$) при выполнении условия применимости (3.19).

Преимуществом рассмотренного мультичастотного подхода является, как показано ниже, возможность построения на основе схемы по рис. 3.4 мультичастотной адаптивной токовой защиты для компенсированных кабельных сетей.

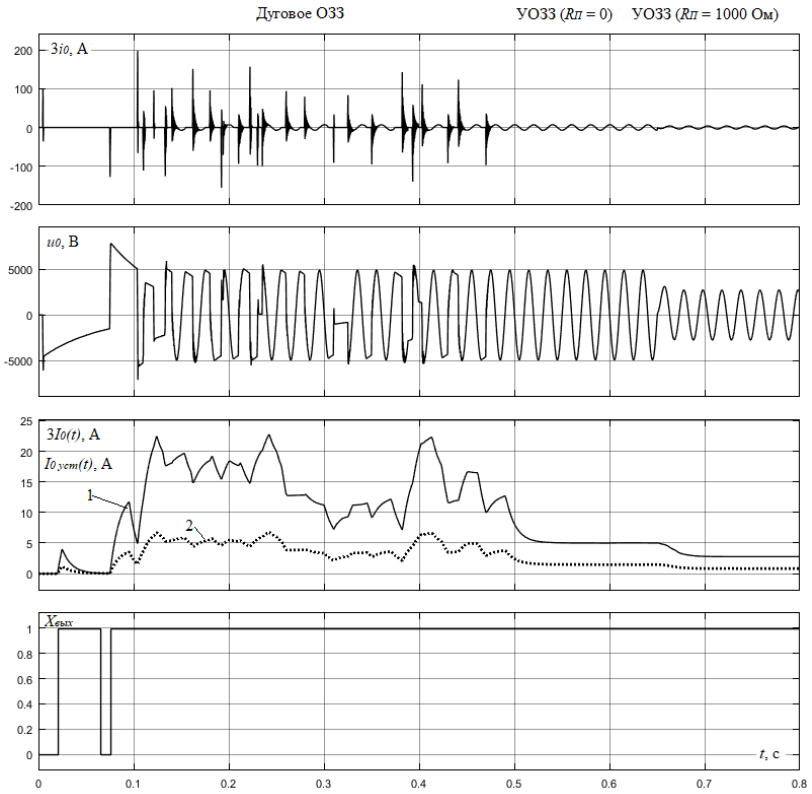


а)

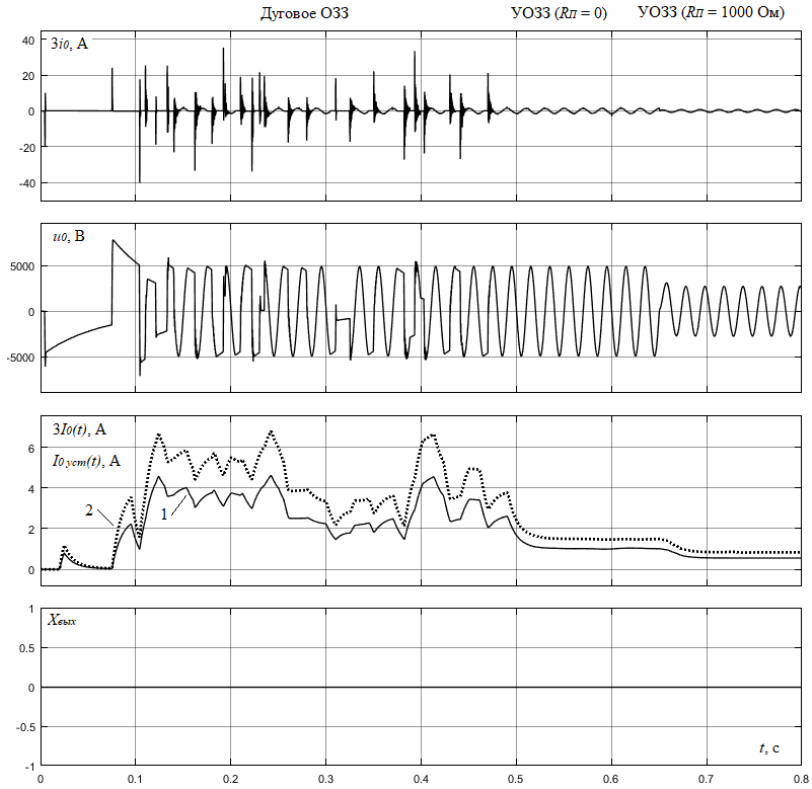


б)

Рисунок 3.5 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адаптивной ТЗНП при внутреннем (а) и при внешнем (б) ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью: 1 – $3I_0\,(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$ по (3.17)



а)



б)

Рисунок 3.6 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адаптивной ТЗНП при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем в УОЗЗ, в сети с изолированной нейтралью: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; 1 – $3I_0(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$ по (3.17)

3.3 Мультичастотная адаптивная токовая защита для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

3.3.1 **Способ действия мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью.** Как известно, в компенсированных кабельных сетях среднего напряжения при резонансной или близкой к ней настройке ДГР емкостные (реактивные) составляющие основной частоты тока нулевой последовательности не могут быть использованы для выполнения селективной защиты от ОЗЗ. Потому в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, как отмечалось выше, основное применение для защиты от ОЗЗ получили крайне неэффективные, прежде всего, на присоединениях ЦП и РП, максимальные токовые защиты нулевой последовательности на основе ВГ (ТЗНПВГ) [30–32]. Невысокое техническое совершенство (селективность и устойчивость функционирования) ТЗНПВГ обусловлено прежде всего нестабильностью общего уровня высших гармоник в токе ОЗЗ компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ [23, 34]. В [33] рекомендуется применять токовые защиты абсолютного замера ВГ на присоединениях, собственный емкостный ток которых не превышает $0{,}1I_{c\Sigma}$. Указанная оценка условий применимости ТЗНПВГ получена в [33] при допущении, что кратность колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ в зависимости от режимов работы сети и основных источников высших гармоник у потребителей не превышает 2,5–3. В [23, 34] показано, что в кабельных сетях 6–10 кВ систем электроснабжения современных промышленных предприятий кратность колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗЗ может достигать значений 5–6 и более. Такая степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗЗ, а также отсутствие достоверных данных для выбора уставок по току срабатывания ТЗНПВГ ограничивает область применения защит указанного типа присоединениями, имеющими $I_{c\,собс*} <$ 0,05–0,07 [23, 34]. При указанных ограничениях достаточно эффективное применение ТЗНПВГ возможно только на присоединениях ТП распределительных кабельных сетей 6–10 кВ промышленного электроснабжения.

Кроме того, известные исполнения ТЗНПВГ, например, серийно выпускаемое ЧЭАЗ устройство защиты типа УСЗ-2/2 [30–32], а также его микропроцессорные аналоги, не приспособлены для действия при ОЗЗ через перемежающуюся дугу. В то же время известно, что в реальных условиях эксплуатации при больших расстройках компенсации в кабельных сетях с заземлением нейтрали через ДГР возможно возникновение дуговых прерывистых ОЗЗ, сопровождающихся опасными перенапряжениями [8].

Применение адаптивного принципа позволяет увеличить техническое совершенство токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ и обеспечить возможность их эффективного применения не только на ТП, но и РП и ЦП кабельных сетей 6–10 кВ промышленного и городского электроснабжения.

В разделе 3.2 было показано, что для кабельных сетей 6–10 кВ соотношение (3.12) справедливо не только для составляющих основной частоты, но и для высших гармонических составляющих в диапазоне частот до 2 кГц. С учетом этого в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью для высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности в указанном диапазоне частот справедливы следующие соотношения:

$$3i_{0\,ВГ\,неп} = 3C_{0\,собс}\frac{du_{0\,ВГ}}{dt}; \qquad (3.22)$$

$$3i_{0\,ВГ\,пов} = -\sum_{k=1}^{n-1} 3i_{0\,ВГ\,неп} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\frac{du_{0\,ВГ}}{dt}. \qquad (3.23)$$

Так как ДГР практически не влияет на распределение высших гармонических составляющих в неповрежденных КЛ, то соотношения (3.22) и (3.23) с достаточной точностью выполняются и в компенсированных кабельных сетях.

Из (3.22) и (3.23) получим:

$$3I_{0\,ВГ\,неп}(t) = 3C_{0\,собс}\sqrt{\frac{1}{T_н}\int_{t_0}^{t_0+T_н}\left[u'_{0\,ВГ}\right]^2 dt} = 3C_{0\,собс}U'_{0\,ВГ}(t); \qquad (3.24)$$

$$3I_{0\,ВГ\,пов}(t)=3(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс})\sqrt{\frac{1}{T_н}\int_{t_0}^{t_0+T_н}\left[u'_{0\,ВГ}\right]^2 dt}=3(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс})U'_{0\,ВГ}(t). \quad (3.25)$$

На основе соотношений (3.24) и (3.25) можно выполнить мультичастотную адаптивную ТЗНПВГ на принципе, аналогичном рассмотренному в разделе 3.2. Для обеспечения несрабатываний адаптивной ТЗНПВГ при внешних, как устойчивых, так и возможных в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ ОЗЗ через перемежающуюся дугу текущее значение уставки по току срабатывания $I_{0\,уст}(t)$ должно регулироваться в соответствии с условием, аналогичном условию (3.17):

$$I_{0\,уст}(t)\geq K_{отс}3C_{0\,собс}U'_{0\,ВГ}(t). \quad (3.26)$$

При внутренних устойчивых и дуговых ОЗЗ срабатывания защиты обеспечиваются, если выполняется соотношение:

$$3I_{0\,ВГ\,пов}(t)=3(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс})U'_{0\,ВГ}(t)\geq K_{ч.мин}I_{0\,уст}(t), \quad (3.27)$$

где $K_{ч.мин}$ – минимальный коэффициент чувствительности.

Из (3.25) и (3.26) получим условие применимости мультичастотной адаптивной ТЗНПВГ:

$$3C_{0\,собс*}=\frac{3C_{0\,собс}}{3C_{0\Sigma}}=I_{с\,собс*}\leq\frac{1}{1+K_{отс}K_{ч.мин}}. \quad (3.28)$$

Из (3.28) при $K_{отс}$ = 1,5 и $K_{ч.мин}$ = 1,5 получим

$$I_{с\,собс*}\leq\frac{1}{1+1{,}5\cdot1{,}5}\approx0{,}31,$$

что значительно больше, чем для традиционных исполнений ТЗНПВГ ($I_{с\,собс*}\leq$ 0,05–0,07 [23, 33, 34]).

В отличие от традиционной ТЗНПВГ мультичастотная адаптивная защита способна обеспечить также селективность и устойчивость функционирования не только при УОЗЗ, но и при ОЗЗ через перемежающуюся дугу.

3.3.2 **Структурно-функциональная схема мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ на основе ВГ для компенсированных кабельных сетей.** Из сравнения способов действия адаптивной ТЗНПВГ для

компенсированных кабельных сетей (п. 3.3.1) и мультичастотной адаптивной ТЗНП для кабельных сетей с изолированной нейтралью (п. 3.2.1) нетрудно прийти к выводу, что адаптивная ТЗНПВГ будет иметь структурно-функциональную схему, полностью аналогичную схеме, приведенной на рис. 3.4. Отличия схем мультичастотной адаптивной ТЗНП и адаптивной ТЗНПВГ будут заключаться только в настройке фильтров *ZF1*, *ZF2*. В адаптивной ТЗНПВГ для компенсированных кабельных сетей должны применяться полосовые фильтры, обеспечивающие подавление во входных величинах $3i_0$ и u_0 не только составляющих с частотами $f > 2$ кГц, но и составляющей основной частоты 50 Гц.

Для обеспечения непрерывности действия адаптивной токовой защитой при опасных ДПОЗЗ важную роль играет выбор величины «окна наблюдения» $T_н$ при вычислении текущего среднеквадратичного значения тока нулевой последовательности по (3.15), (3.16) в сети с изолированной нейтралью или его высших гармонических составляющих по (3.24) и (3.25) в компенсированной сети. Опасность дуговых ОЗЗ для сети и ее элементов определяется прежде всего кратностью сопровождающих замыкания перенапряжений на неповрежденных фазах. В [23, 146, 147] показано, что кратность перенапряжений при дуговых ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью в основном определяется величиной интервалов времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги и достигает опасных значений порядка ~2,7 [8, 23] при $\Delta t \leq 50$–60 мс. Для устойчивой фиксации таких ДПОЗЗ величина «окна наблюдения» $T_н$ при вычислении среднеквадратичных значений входных величин в блоках *RMS1* и *RMS2* схемы защиты для сетей с изолированной нейтралью (рис. 3.4) должна быть не меньше 60 мс.

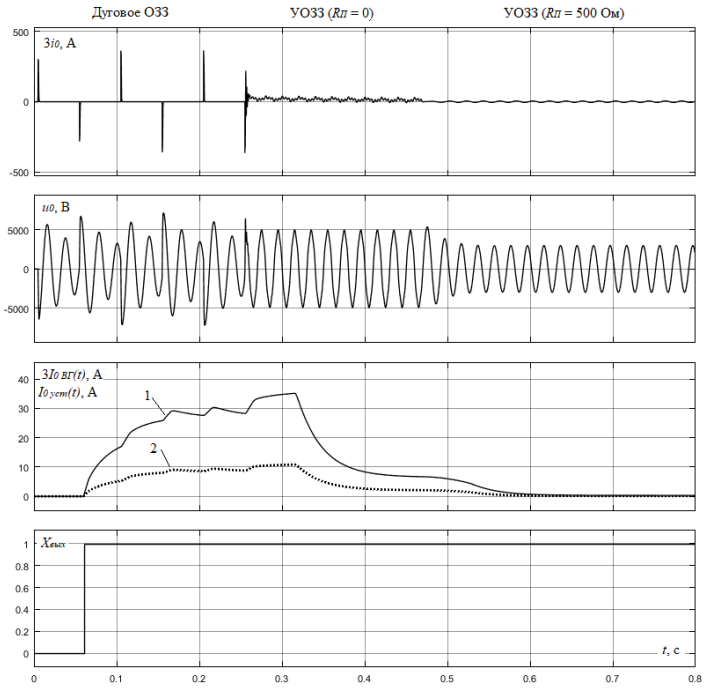
В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ при резонансной или близкой к ней настройке ДГР (±5% [5]) интервалы времени Δt между повторными зажиганиями заземляющей дуги обычно составляют 5÷15 периодов рабочей частоты [7, 8, 35, 135, 137]. Такие дуговые прерывистые ОЗЗ не представляют прямой опасности для изоляции элементов кабельных сетей 6–10 кВ, и их фиксация с помощь устройств селективной сигнализации по

существующим требованиям не является обязательной [4]. В [23] показано, что при возможных в реальных условиях эксплуатации компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ расстройках компенсации в пределах ±20% [5] возможны повторные зажигания заземляющей дуги через относительно небольшие интервалы времени Δt порядка 30–50 мс, сопровождающиеся опасными перенапряжениями с кратностью порядка ~2,7–2,8. Следовательно, в компенсированных кабельных сетях также возникает необходимость в устойчивой фиксации защитой дуговых ОЗЗ, характеризуемых интервалами времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t < 50$ мс. Поэтому величина «окна наблюдения» $T_н$ (время усреднения) при вычислении среднеквадратичных значений входных величин в блоках *RMS1* и *RMS2* в схеме адаптивной ТЗНПВГ для компенсированных сетей может быть принята такой же, как и в схеме адаптивной ТЗНП для сетей с изолированной нейтралью, т.е. порядка ~60 мс.

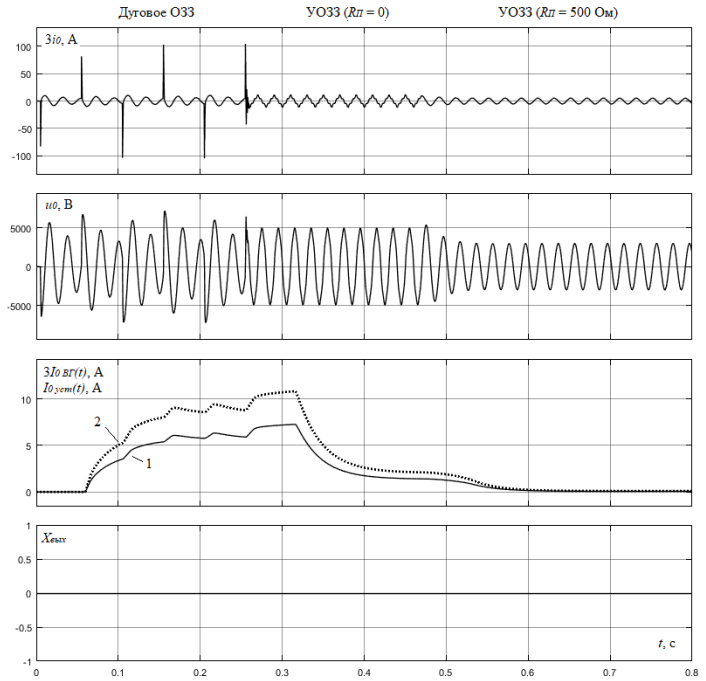
Изложенное позволяет сделать вывод, что за исключением частотных характеристик фильтров *ZF1* и *ZF2*, структурно-функциональная схема адаптивной ТЗНПВГ, включая методику выбора уставок, не будет иметь отличий от схемы мультичастотной адаптивной ТЗНП для кабельных сетей с изолированной нейтралью. Отметим, что указанное свойство рассмотренных мультичастотных адаптивных защит позволяет получить универсальное решение в части селективной защиты от ОЗЗ для некомпенсированных и компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, в котором для применения предлагаемой защиты в сетях с различными режимами заземления нейтрали достаточно осуществить переключения в схемах входных фильтров *ZF1*, *ZF2* или изменить их настройки.

3.3.3 **Анализ функционирования адаптивной ТЗНПВГ на имитационной модели компенсированной кабельной сети**. Исследования проводились на имитационной модели кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma} = 30$ А и заземлением нейтрали через ДГР. При исследованиях было принято, что расстройка ДГР может изменяться в пределах до ±20% [5].

На рис. 3.7 и 3.8 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы входных тока $3i_0$ и напряжения u_0 и текущих значений величин на выходах функциональных блоков *RMS1*, *MUL* и *CMP* (схема на рис. 3.4).

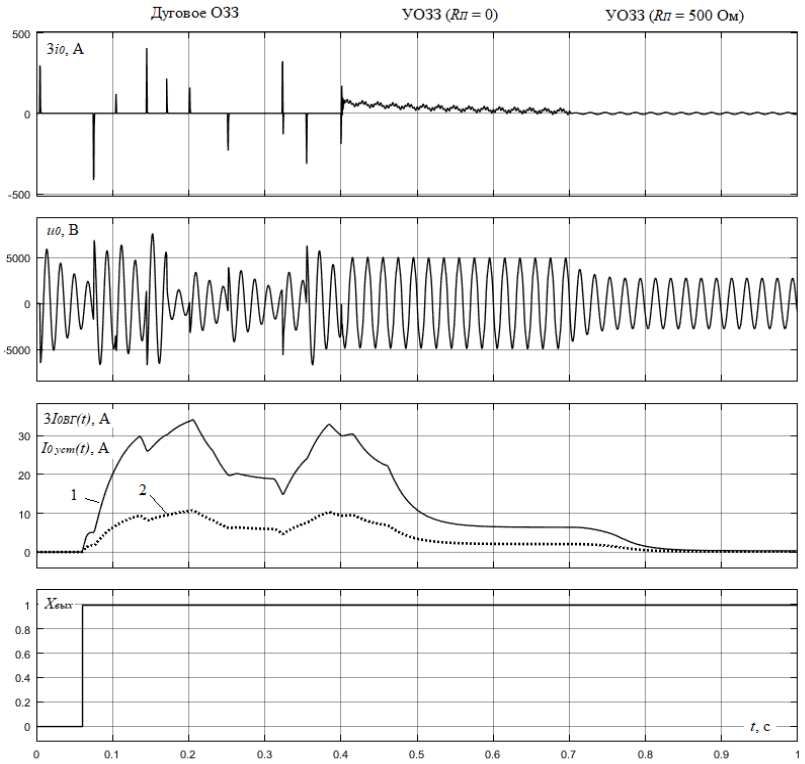


а)

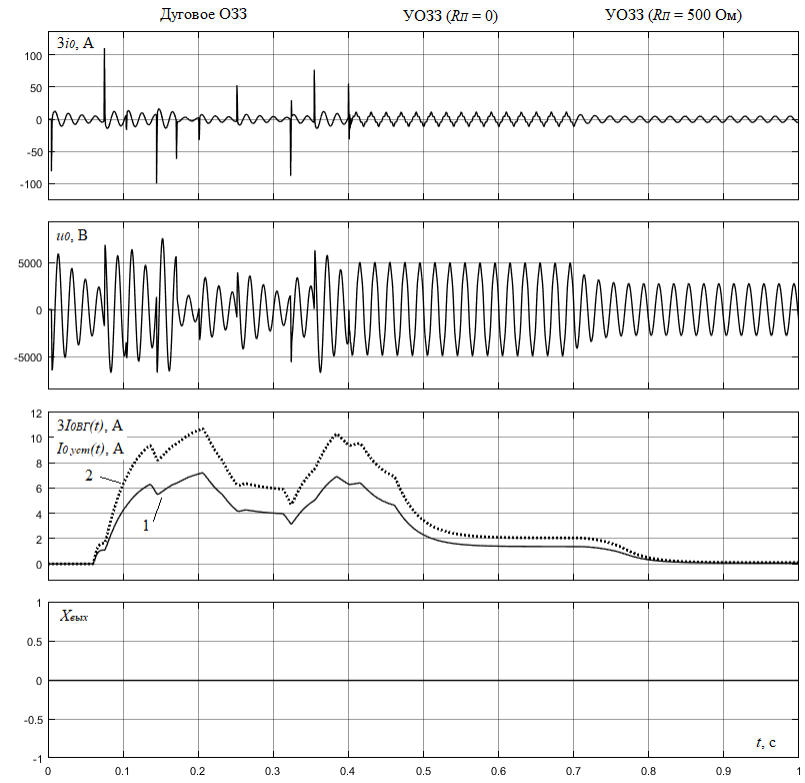


б)

Рисунок 3.7 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу адаптивной ТЗНПВГ при дуговом ОЗЗ, переходящем в УОЗЗ, в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30, работающей с перекомпенсацией 20%: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; 1 – $3I_{0\,ВГ}(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$ по (3.25)



а)



б)

Рисунок 3.8 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу адаптивной ТЗНПВГ при дуговом ОЗЗ, переходящем в УОЗЗ, в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30, работающей с недокомпенсацией 20%: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; 1 – $3I_{0\,ВГ}(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$ по (3.25)

Осциллограммы на рис. 3.7 иллюстрируют функционирование адаптивной ТЗНПВГ в компенсированной кабельной сети 6 кВ в режиме перекомпенсации 20% при дуговом ОЗЗ с интервалами между повторными зажиганиями заземляющей дуги Δt = 50 мс, переходящем сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0), а затем в УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ = 500 Ом), на рис. 3.7, б – при внешнем замыкании. Осциллограммы на рис. 3.8 иллюстрируют функционирование ТЗНПВГ в компенсированной кабельной сети 6 кВ в режиме недокомпенсации 20% при более сложном характере дугового ОЗЗ.

Результаты вычислительных экспериментов, выполненных на имитационной модели кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ с заземлением нейтрали через ДГР, подтвердили работоспособность адаптивной ТЗНПВГ в различных условиях ее функционирования (расстройках компенсации, разновидностях дуговых и устойчивых ОЗЗ, значениях $R_П$ в месте повреждения).

3.4 Фиксация кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции с использованием мультичастотных адаптивных токовых защит

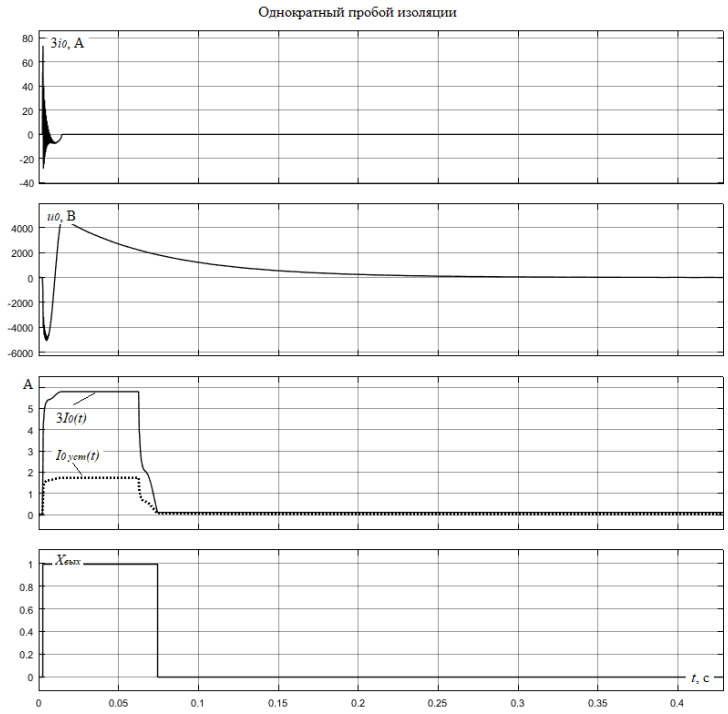
3.4.1 **Задача фиксации КрОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и принципы ее реализации с применением мультичастотной адаптивной токовой защиты.** Как уже отмечалось выше, повреждения изоляции при КрОЗЗ в КЛ с БПИ после гашения заземляющей дуги полностью не устраняются, за исключением немногих случаев ОЗЗ в кабельных муфтах, и, возникнув, впоследствии неуклонно развиваются до полного пробоя (УОЗЗ, ДПОЗЗ или междуфазного КЗ) [45, 46]. Потому селективную сигнализацию КрОЗЗ можно использовать в целях диагностирования состояния изоляции элементов кабельных сетей 6–10 кВ и предотвращения аварийного отключения присоединений релейной защитой от КЗ. Отсутствие селективной сигнализации КрОЗЗ приводит к накоплению в сети мест с ослабленной изоляцией и сни-

жению ее эксплуатационной надежности. Особенно опасный характер носит кумулятивное накопление мест с ослабленной изоляцией в кабельных сетях с резонансным заземлением нейтрали через ДГР: по данным специалистов, проводивших экспериментальные исследования дуговых ОЗЗ, в кабельных сетях с таким режимом нейтрали в отличие от сетей с изолированной нейтралью заземляющие дуги с высокой вероятностью гаснут после 2–4 повторных пробоев изоляции [7, 135, 137]. По данным [18, 45–47] фиксацией КрОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ и использованием информации о них для проведения высоковольтных испытаний поврежденного элемента сети можно предотвратить до 50% внезапных отключений КЛ и более 30% внезапных отключений электродвигателей. Таким образом, селективная сигнализация КрОЗЗ и использование информации о них для проведения внеплановых профилактических испытаний изоляции поврежденного участка КЛ или ЭД можно отнести к важным мероприятиям, направленным на повышение эксплуатационной надежности контролируемой сети.

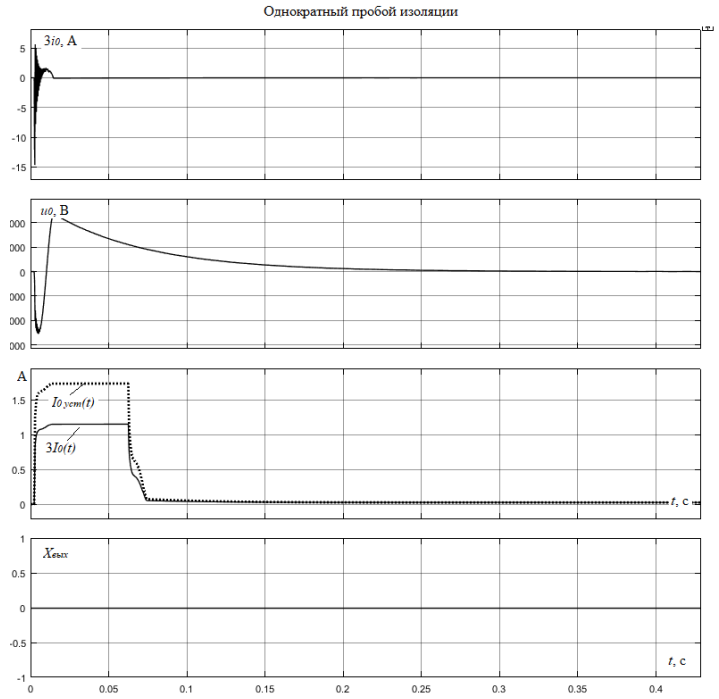
Известно, что наиболее эффективным средством селективной фиксации КрОЗЗ является применение направленных импульсных защит от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса [18, 26, 47, 105, 111, 114, 118 и др.]. Однако применение дополнительной функции импульсной направленной защиты в составе мультичастотной адаптивной ТЗНП или ТЗНПВГ привело бы к значительному усложнению последних.

Исследования особенностей переходных процессов при ОЗЗ показали, что для решения задачи фиксации КрОЗЗ, включая однократные пробои изоляции фазы сети на землю, также может быть использован рассмотренный выше принцип мультичастотной адаптивной ТЗНП или ТЗНПВГ. Такая возможность обусловлена тем, что рассмотренные выше соотношения между текущими интегральными (среднеквадратичными) значениями $3I_0(t)$ и уставки $I_{0\,уст}(t)$ (например, рис. 3.5 – 3.8), задаваемые условием выбора последней в соответствии с (3.17) или (3.26), соблюдаются для поврежденного ($3I_0(t) > I_{0\,уст}(t)$) и неповрежденного ($3I_0(t) < I_{0\,уст}(t)$) присоединений не толь-

ко на стадии дугового ОЗЗ или УОЗЗ, но и для каждого отдельно взятого пробоя изоляции (например, рис. 3.9).



а)



б)

Рисунок 3.9 – Осциллограммы величин $3i_0$, u_0, $3I_0(t)$, $I_{0\,уст}(t)$ и $X_{вых}$ при однократном пробое изоляции в сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$= 5 А:
а – внутреннее КрОЗЗ; б – внешнее КрОЗЗ

3.4.2 **Структурно-функциональная схема мультичастотной адаптивной защиты для фиксации всех разновидностей ОЗЗ.** Схема мультичастотной адаптивной ТЗНП для кабельных сетей с изолированной нейтралью (рис. 3.4), дополненная функциональными блоками и элементами для фиксации КрОЗЗ (выделены заливкой), приведена на рис. 3.10. Для компенсированных кабельных сетей схема защиты, как было показано выше, аналогична схеме на рис. 3.10 и отличается только настройками частотных фильтров *ZF1* и *ZF2*.

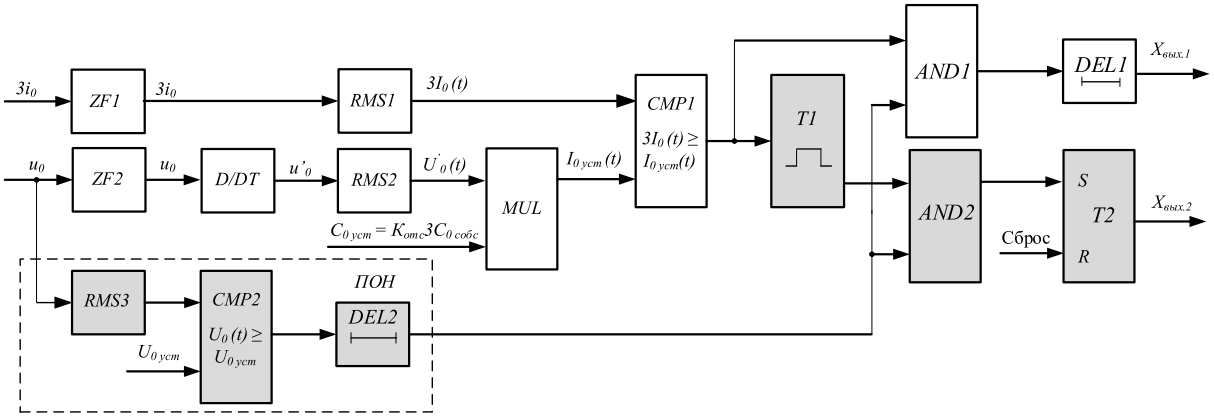


Рисунок 3.10 – Структурно-функциональная схема адаптивной ТЗНП для фиксации всех разновидностей ОЗЗ

В схему по рис. 3.4 дополнительно введены следующие функциональные блоки и элементы: ПОН – пусковой орган максимального напряжения нулевой последовательности, включающий блок вычисления среднеквадратичного значения входного сигнала *RMS3*, схему сравнения (реле максимального напряжения) *CMP2* и элемент временной задержки на срабатывание *DEL2*; элемент оперативной *T1* (например, одновибратор); элемент долговременной памяти на *RS*-триггере *T2* и логический элемент «И».

Пусковой орган по напряжению нулевой последовательности предназначен для отстройки защиты от кратковременных и длительных режимов, сопровождающихся появлением напряжения и тока нулевой последовательности и не связанных с ОЗЗ. К таким режимам относятся прежде всего коммутационные переключения в сети, сопровождаемые значительными бросками переходного тока $3i_0$ и кратковременным появлением напряжения $3u_0$

[например, 18]. Применение пускового органа по напряжению нулевой последовательности является наиболее простым и эффективным способом отстройки быстродействующих защит от ОЗЗ от коммутационных переключений в защищаемой сети, широко используемым в устройствах защиты от ОЗЗ на основе переходных процессов [например, 18, 26, 110–123 и др.]. Появление сигнала на выходе схемы сравнения *CMP1* фиксируется в элементе кратковременной оперативной памяти – одновибратор без перезапуска *T1*. Передача информации из элемента оперативной памяти в элемент долговременной памяти, выполненном на *RS*-триггере *T2,* осуществляется только при срабатывании пускового органа ПОН. Потому длительность импульса на выходе одновибратора *T1* должна превышать максимальное время срабатывания ПОН (примерно 15-20 мс). Автоматический возврат одновибратора *T1* исключает возможность ложных срабатываний защиты по выходу $X_{вых.2}$ за счет информации, записанной в элемент оперативной памяти при предшествующих коммутационных переключениях на защищаемой линии. Стирание информации с элемента долговременной памяти *T2* осуществляется вручную или автоматически командой «Сброс».

3.4.3 **Способ повышения чувствительности мультичастотной адаптивной ТЗНП при однократных пробоях изоляции.** Рассмотренные в разделах 3.2 и 3.3 принципы выполнения адаптивных мультичастотных ТЗНП и ТЗНПВГ и параметры настройки основных функциональных блоков в схемах защиты по рис. 3.4 и 3.10 ориентированы прежде всего на обеспечение требуемой отстроенности при внешних и высокой устойчивости функционирования при внутренних опасных дуговых ОЗЗ с интервалами времени Δt между повторными пробоями до ~60 мс. Для этого вычисление текущих среднеквадратичных значений воздействующей величины $3I_0(t)$ по (3.15) или (3.16) в сети с изолированной нейтралью или $3I_{0\,BI}(t)$ по (3.24) или (3.25) в компенсированной сети в блоках *RMS1* и *RMS2* (рис. 3.4, 3.10) выполняется с временем усреднения интегральных (среднеквадратичных) значений сравниваемых величин $T_н \geq \Delta t$ = 60 мс, что ограничивает быстродействие измери-

тельной части адаптивных ТЗНП и ТЗНПВГ при дуговых ОЗЗ и УОЗЗ и уменьшает чувствительность защиты при однократных пробоях изоляции.

Известно, что в кабельных сетях 6–10 кВ затухание свободных составляющих переходного процесса при ОЗЗ происходит за 3–5 мс [7], а повторное зажигание заземляющей дуги, как правило, происходит не раньше, чем через 10 мс (теория W. Petersen [13]). Учитывая изложенное, для фиксации КрОЗЗ можно применить отдельные блоки *RMS* с временем усреднения интегрального значения входного сигнала, равным 10 мс. Уменьшение времени усреднения (окна наблюдения) $T_н$ с 60 до 10 мс позволяет в несколько раз увеличить текущее интегральное значение тока $3I_0(t)$ при первом пробое изоляции и чувствительность адаптивной защиты к КрОЗЗ (например, рис. 3.11).

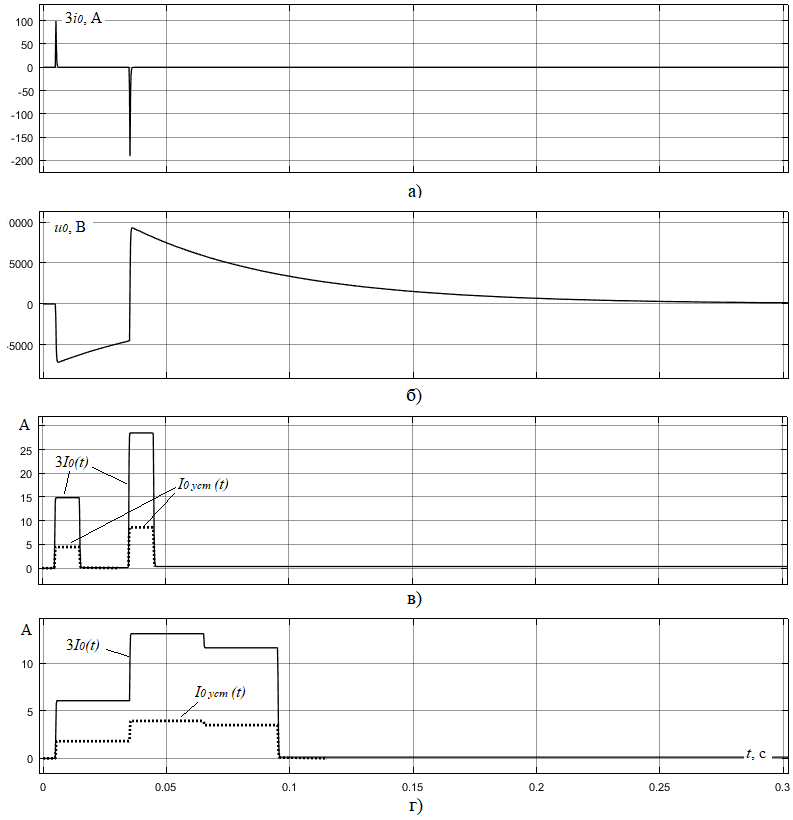


Рисунок 3.11 – Среднеквадратичные значения величин $3I_0(t)$ и $I_{0\ уст}(t)$ при КрОЗЗ (два зажигания заземляющей дуги) в сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$= 5 А: а – $3i_0(t)$; б – $u_0(t)$; в – $3I_0(t)$ и $I_{0уст}(t)$ при применении для фиксации КрОЗЗ блоков *RMS* с временем усреднения сигнала 10 мс; г – $3I_0(t)$ и $I_{0уст}(t)$ при применении для фиксации КрОЗЗ блоков *RMS* с временем усреднения сигнала 60 мс

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволяет существенно увеличить чувствительность адаптивной токовой защиты при КрОЗЗ,

прежде всего, при однократных пробоях изоляции, однако приводит к усложнению ее измерительной и логической частей.

3.5 Универсальная мультичастотная адаптивная токовая защита от однофазных замыканий на землю для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

3.5.1 **Структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.** Разработанные в разделах 3.2, 3.3 и 3.4 принципы выполнения мультичастотной адаптивной ТЗНП позволяют получить универсальное техническое решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ, работающих различными режимами заземления нейтрали.

Во введении отмечалось, что диссертационные исследования проводятся автором при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ПНИЭР по теме «Разработка комплекса научно-технических решений по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ» (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215). В соответствии с условиями Соглашения с Минобрнауки РФ Индустриальным партнером по данной ПНИЭР является НПП «ЭКРА», разрабатывающее макетные образцы, а при положительных результатах испытаний последних – экспериментальные образцы устройств защиты от ОЗЗ на основе результатов НИР, выполненных в ИГЭУ. С учетом сказанного разрабатываемая в данном разделе структурно-функциональная схема универсальной мультичастотной адаптивной защиты от ОЗЗ должна соответствовать дополнительным требованиям Индустриаль-

ного партнера, необходимым для выполнения макетного образца. К ним относятся:

– выполнение макетного образца защиты на цифровой базе;

– применение в защите от ОЗЗ АЦП, используемых в микропроцессорных терминалах РЗА НПП «ЭКРА» (с заданными частотой дискретизации и разрядностью);

– применение в защите вторичных (промежуточных) преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, используемых в защитах аналогичного назначения разрабатываемых НПП «ЭКРА» микропроцессорных терминалов новой серии для защиты линий 6–35 кВ.

Необходимость учета приведенных дополнительных требований обусловлена тем, что рассмотренные в разделах 3.2 и 3.3 основные достоинства и недостатки мультичастотных адаптивных ТЗНП для кабельных сетей с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов не учитывают влияние на устойчивость их функционирования ряда дополнительных факторов, к основным из которых относятся:

1) погрешности измерений электрических величин переходного процесса при ОЗЗ, вносимые ограниченным частотой дискретизации АЦП, применяемых в современных микропроцессорных устройствах РЗА (как правило, частота дискретизации $f_д$ = 4 кГц, т.е. 80 выборок на период рабочей частоты 50 Гц);

2) угловые и амплитудные погрешности вторичных преобразователей тока и напряжения в переходных режимах ОЗЗ.

Отметим также, что существенное влияние на устойчивость функционирования разрабатываемой универсальной мультичастотной адаптивной защиты от ОЗЗ могут оказывать также амплитудные и угловые погрешности первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, прежде всего, кабельных ТТНП, характеристики которых на частотах выше 50 Гц не нормируются. Потому при исследованиях и комплексной оценке устойчивости функционирования универсальной мультичастотной адаптивной

ТЗНП должно учитываться также влияние электромагнитных кабельных ТТНП и ТННП.

Разработанная с учетом указанных выше дополнительных требований структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП приведена на рис. 3.12.

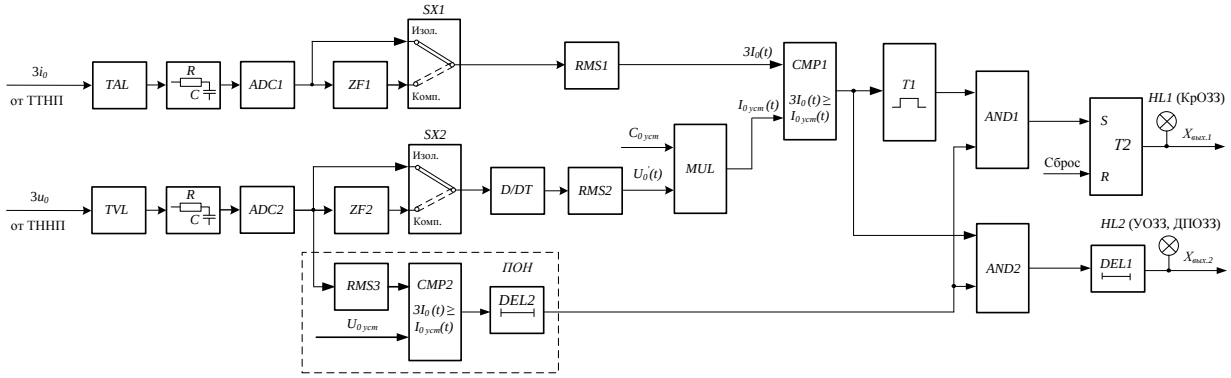


Рисунок 3.12 – Структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП

Схема включает следующие функциональные узлы и элементы: *TLA* – вторичный преобразователь тока нулевой последовательности; *TLV* – вторичный преобразователь напряжения нулевой последовательности; *RC* – входные *RC*-фильтры 1-го порядка, обеспечивающие подавление высокочастотных составляющих переходных токов и напряжений до ~2 кГц; *ADC*1, *ADC2* – АЦП, обеспечивающие формирование цифровых отсчетов тока и напряжения нулевой последовательности; *ZF1*, *ZF2* – цифровые фильтры, обеспечивающие подавление составляющей основной частоты (используются только при работе устройства защиты в компенсированных сетях); *SX1*, *SX2* – переключатели режима заземления нейтрали защищаемой сети; *D*/*DT* – цифровой дифференциатор; *RMS1*, *RMS2*, *RMS3* – блоки вычисления среднеквадратичных значений входных величин на заданном интервале времени («окне») усреднения; *MUL* – блок перемножения; *CMP1*, *CMP2* – схемы сравнения абсолютных значений двух величин; *T1* – одновибратор, выполняющий функцию оперативной (кратковременной) памяти; *T2* – *RS*-триггер, выполняющий функцию долговременной памяти

(с ручным или автоматическим возвратом по команде «Сброс»); *AND1, AND2* – логические элементы «И»; *DEL1, DEL2* – элементы временной задержки на срабатывание; ПОН – пусковой орган по напряжению нулевой последовательности; $C_{0\,уст}$ – уставка защиты по воздействующей величине; $U_{0\,уст}$ – уставка ПОН по напряжению нулевой последовательности.

В имитационной модели макетного образца адаптивной ТЗНП по схеме рис. 3.12 использовались входные *RC*-фильтры с частотой среза f_c до 1000 Гц, и АЦП с частотой дискретизации $f_д$ = 4 кГц и разрядностью $N_{АЦП}$ = 16. Модели вторичных преобразователей тока *TLA* и напряжения *TLV* выполнялись на основе реальных характеристик и параметров промежуточных трансформаторов тока и напряжения, используемых в функциях защиты от ОЗЗ разрабатываемой НПП «ЭКРА» новой серии микропроцессорных терминалов РЗА линий электропередачи среднего напряжения.

Время усреднения («окно» наблюдения $T_н$) в блоках *RMS1–RMS3* для обеспечения устойчивости и непрерывности функционирования измерительно части защиты при опасных для сети ДПОЗЗ (интервалы времени между повторными пробоями изоляции Δt < 50–60 мс) принято равным 60 мс (3 периода рабочей частоты T_{50} = 20 мс). С учетом принятого значения $T_н$ для исключения неустойчивой фиксации дуговых прерывистых ОЗЗ с Δt > 60 мс уставка по времени срабатывания элемента временной задержки *DEL1* должна выбираться из условия

$$t_{ср.\,DEL1} > T_H = 60 \text{ мс}. \qquad (3.29)$$

В модели защиты по рис. 3.12 принято $t_{ср.DEL1}$ = 100 мс.

Уставка по величине $C_{0\,уст}$ в имитационной модели защиты в соответствии с (3.17) и (3.26) выбиралась из условия

$$C_{0\,уст} \geq K_{отс} 3C_{0\,собс}, \qquad (3.30)$$

где $K_{отс}$ = 1,5 – коэффициент отстройки ; $C_{0\,собс}$ – емкость фазы на землю защищаемого присоединения.

Уставка по напряжению срабатывания ПОН выбирается так же, как и уставка устройств контроля изоляции в сетях с малыми токами замыкания на землю

$$U_{0\,уст} \approx 0{,}15 U_{ф.ном}, \tag{3.31}$$

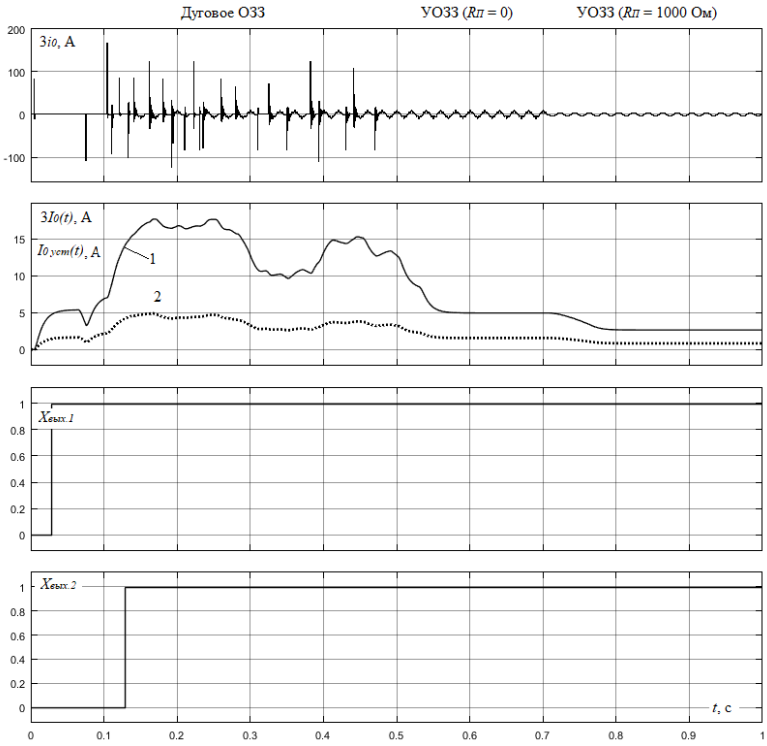
по времени срабатывания

$$t_{ср.\,DEL2} \approx 15 - 20\,\text{мс}. \tag{3.32}$$

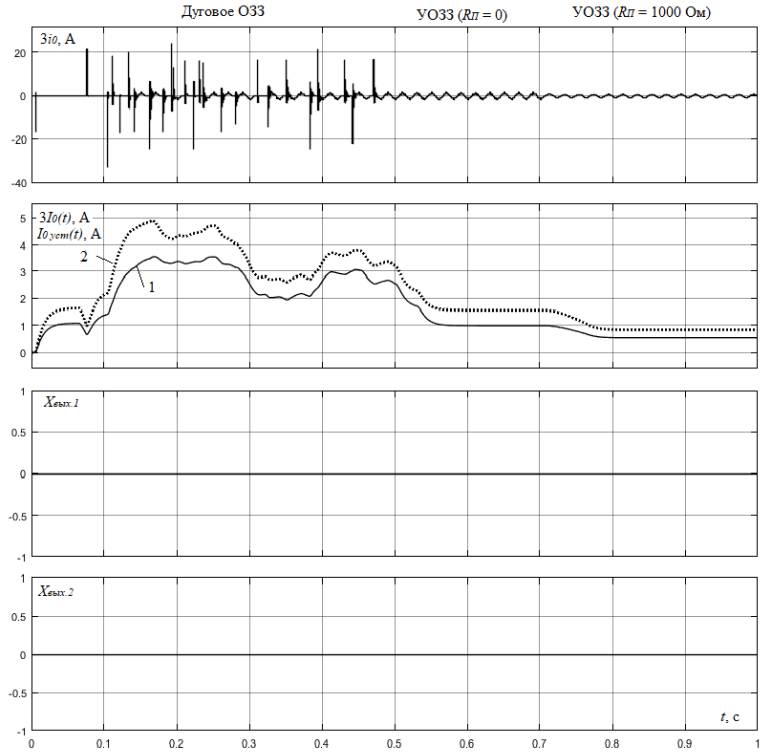
3.5.2 **Испытания модели макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.** Комплексная оценка эффективности функционирования универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП проводилась на моделях кабельных сетей напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью ($I_{c\Sigma}$ = 5 и 30 А), с заземлением нейтрали через высокоомный резистор ($I_{c\Sigma}$ = 5 А) и с заземлением нейтрали через ДГР ($I_{c\Sigma}$ = 30 А). В компенсированной сети имитировалась работа с резонансной настройкой ДГР и с расстройками компенсации в пределах ±20%. Имитировались дуговые ОЗЗ с различными условиями гашения и повторного зажигания заземляющей дуги (в соответствии с теориями W. Petersen и I.E. Peters и J. Slepian [13, 14]) и различными интервалами между повторными пробоями изоляции Δt = 10–200 мс, переходящие в металлические УОЗЗ ($R_П$ = 0) или УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ > 0). Для подключения модели макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП к защищаемому присоединению использовались модели кабельного ТТНП типа ТЗЛМ и электромагнитного ТННП типа НТМИ-66, разработанные в [148, 149].

На рис. 3.13–3.16 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы входных величин $3i_0$ и u_0 и сигналов на выходах функциональных блоков защиты по рис. 3.11 при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0) и затем в УОЗЗ через большое переходное сопротивление, полученные на имитационных моделях кабельной сети 6 кВ с различными

режимами нейтрали (на осциллограммах токи и напряжения приведены к первичной стороне).

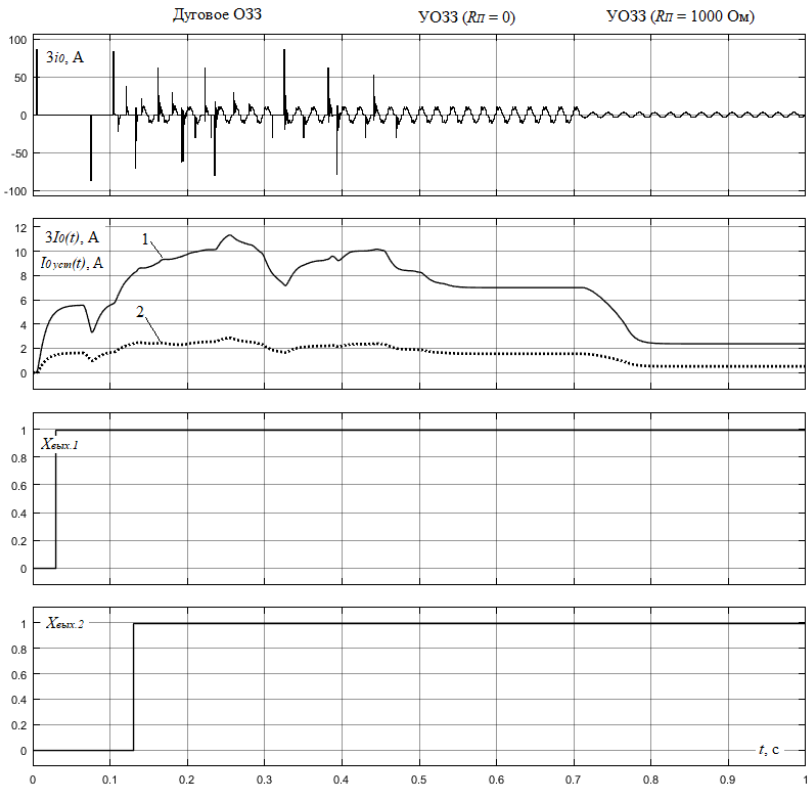


а)

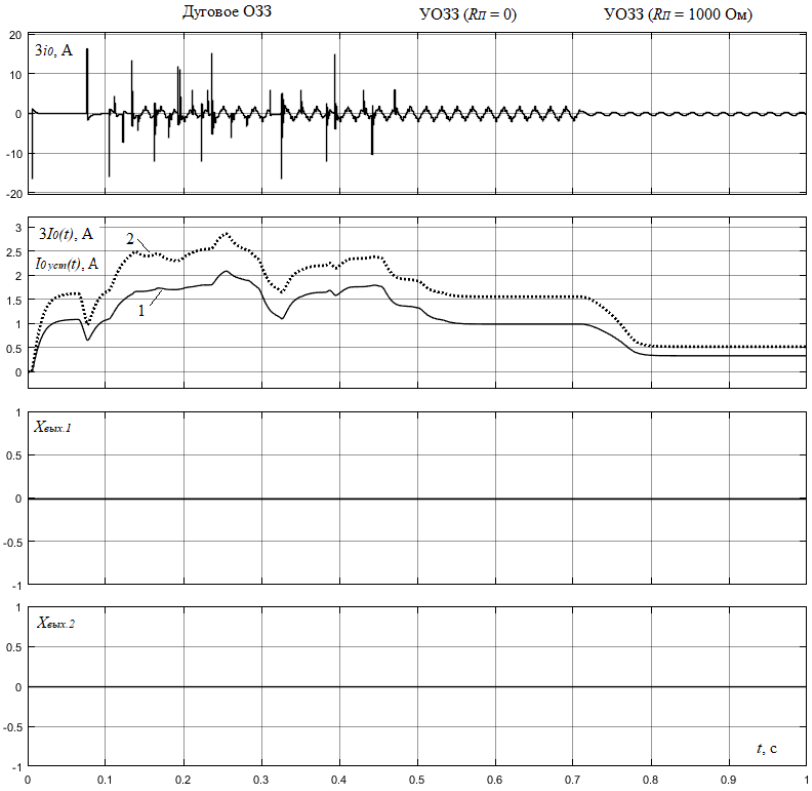


б)

Рисунок 3.13 – Осциллограммы величин $3i_0$, $3I_0(t)$, $I_{0\,уст}(t)$, $X_{вых.1}$ и $X_{вых.2}$ при ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью (переключатели SX1 и SX2 в положении «Изол», рис. 3.12) с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$= 5 А: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; 1 – $3I_0(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$

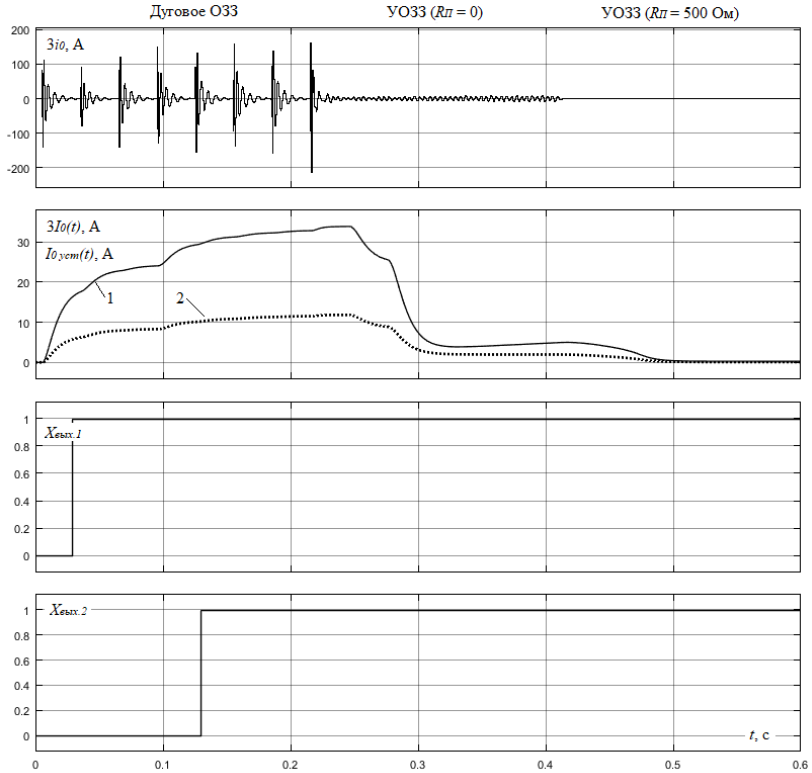


а)

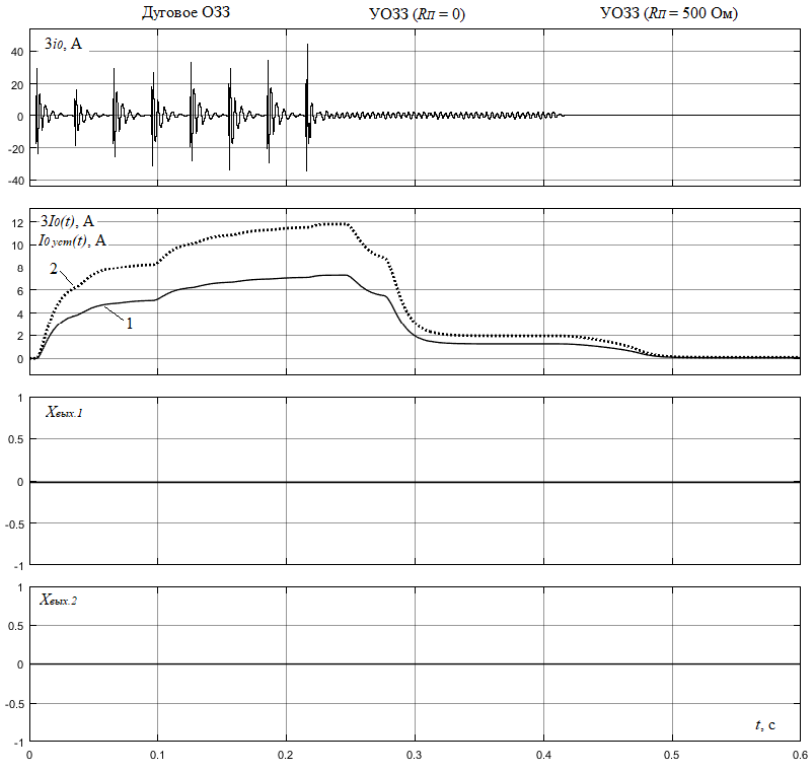


б)

Рисунок 3.14 – Осциллограммы величин $3i_0$, $3I_0(t)$, $I_{0\,уст}(t)$, $X_{вых.1}$ и $X_{вых.2}$ при ОЗЗ в сети с высокоомным заземлением нейтрали (переключатели SX1 и SX2 в положении «Изол») с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$= 5 А: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; 1 – $3I_0(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$

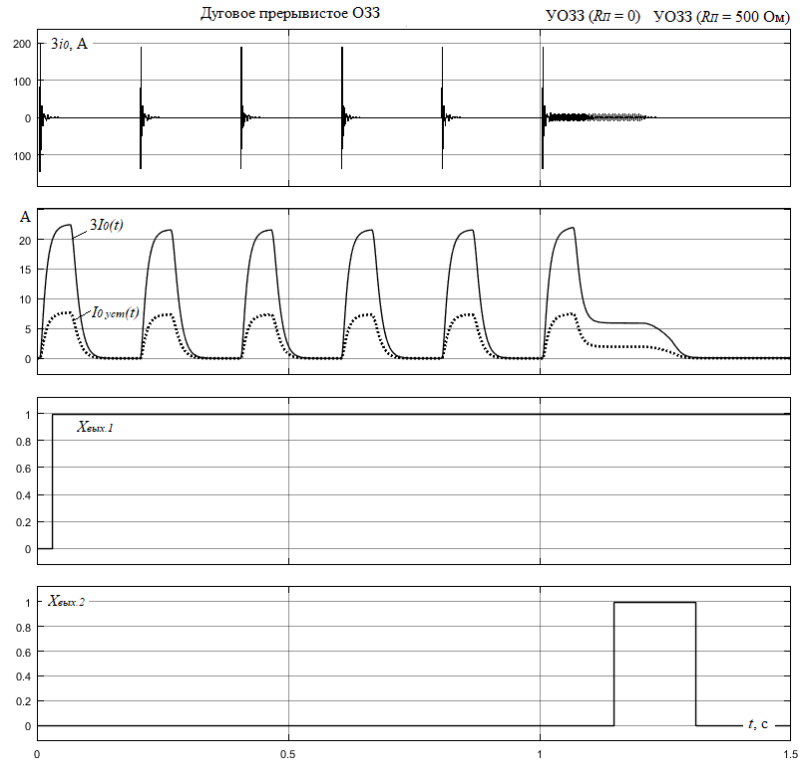


а)

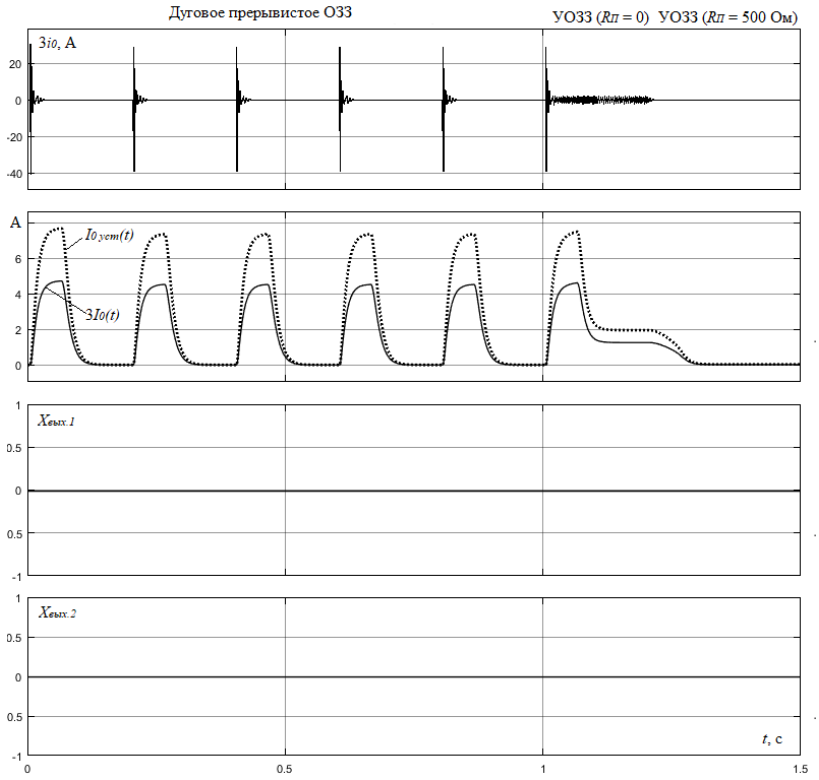


б)

Рисунок 3.15 – Осциллограммы величин $3i_0$, $3I_0(t)$, $I_{0\,уст}(t)$, $X_{вых.1}$ и $X_{вых.2}$ при ОЗЗ в компенсированной сети (переключатели SX1 и SX2 в положении «Комп») с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$= 30 А, работающей с перекомпенсацией 20%: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ; 1 – $3I_0(t)$; 2 – $I_{0\,уст}(t)$



а)



б)

Рисунок 3.16 – Осциллограммы величин $3i_0$, $3I_0(t)$, $I_{0\,уст}(t)$, $X_{вых.1}$ и $X_{вых.2}$ при ОЗЗ в компенсированной сети (переключатели SX1 и SX2 в положении «Комп») с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$= 30 А, работающей с резонансной настройкой а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ

Анализ результатов вычислительных экспериментов, выполненных на комплексных имитационных моделях «Кабельная сеть 6 кВ – макетный образец универсальной адаптивной ТЗНП», позволяет сделать следующие выводы:

1) разработанные принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой ТЗНП при цифровой реализации обеспечивают селективность и устойчивость функционирования во всех режимах заземления нейтрали защищаемой сети и при всех разновидностях ОЗЗ;

2) обоснованное выше значение коэффициента отстройки $K_{отс}$ = 1,5, используемое при выборе уставки срабатывания $C_{0\,уст}$ по (3.30), обеспечивает требуемую отстроенность при всех разновидностях внешних ОЗЗ с учетом дополнительных погрешностей, вносимых ограниченной частотой дискретизации АЦП, первичными и вторичными преобразователями тока и напряжения нулевой последовательности;

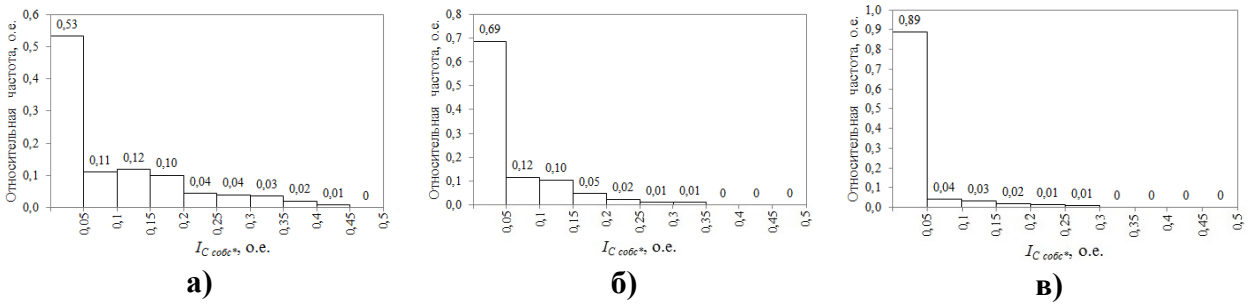
3) принятая схема макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП (рис. 3.12) не во всех случаях обеспечивает фиксацию первого пробоя изоляции при возникновении ОЗЗ из-за недостаточной чувствительности, обусловленной медленным нарастанием среднеквадратичного значения на выходе блока *RMS1* при принятом времени усреднения $T_н$ = 60 мс; в целях повышения чувствительности для четкой фиксации КрОЗЗ целесообразно выполнение в составе защиты отдельной быстродействующей ступени с блоками *RMS*, имеющими $T_н$ = 10 мс (см. п. 3.4.3).

3.5.3 **Общая оценка универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП.** В отличие от применяемых в настоящее время защит от ОЗЗ различного назначения – для сетей с изолированной нейтралью (например, традиционные ТЗНП и ТНЗНП) и для компенсированных сетей (например, ТЗНПВГ), разработанная мультичастотная адаптивная ТЗНП позволяет получить на идентичных принципах универсальное решение проблемы селективной защиты от всех разновидностей ОЗЗ, включая дуговые замыкания и «мгновенные» земли, как для некомпенсированных, так и для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ. Отметим, что универсальное решение позволяют также получить направленные защиты, основанные на использова-

нии электрических величин переходного процесса, однако такие защиты не обладают важным свойством непрерывности действия в установившемся режиме ОЗЗ.

Существенным преимуществом разработанной мультичастотной адаптивной ТЗНП по сравнению с традиционными токовыми защитами от ОЗЗ является одинаковая методика выбора уставки срабатывания по воздействующей величине независимо от режима заземления нейтрали сети. Уставка срабатывания в предложенной защите определяется только величиной собственной емкости фаз на землю защищаемого присоединения $3C_{0\,собс}$.

Область возможного применения разработанной адаптивной защиты, как в сетях с изолированной нейтралью, так и в компенсированных сетях, определяется соотношением (3.19), т.е. относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{c\,собс*}$. Выше было показано, что применение разработанной мультичастотной адаптивной ТЗНП возможно на присоединениях с $I_{c\,собс*} \leq\sim 0{,}31$, в то время как традиционной ТЗНП в сетях с изолированной нейтралью – при $I_{c\,собс*} \leq 0{,}15-0{,}2$, а традиционной ТЗНПВГ – при $I_{c\,собс*} \leq 0{,}05-0{,}1$. Наиболее значимо значительное расширение области применения токовых защит от ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, доля которых в общем числе кабельных сетей указанного напряжения составляет около 90%. В [23, 34] приведены полученные на основе анализа статистических данных по кабельным сетям 6–10 кВ распределения присоединений ЦП и РП по величине $I_{c\,собс*}$ (рис. 3.17).



а) **б)** **в)**

Рисунок 3.17 – Относительная частота значений собственного емкостного тока $I_{c\,собс*}$ для присоединений различных объектов кабельных сетей 6–10 кВ: а – ГПП; б – ГРУ ТЭЦ; в – РП [34]

Доля присоединений, для которых выполняется условие устойчивости несрабатываний при внешних и чувствительности, т.е. устойчивости срабатываний, при внутренних ОЗЗ, характеризует свойство защиты рассматриваемого типа эффективно выполнять указанные функции в заданных условиях функционирования и может быть названа *защитоспособностью на объектах определенного типа* (ГПП, ГРУ ТЭЦ, РП). Усредненную оценку защитоспособности в указанном выше определении можно получить на основе условия применимости защиты рассматриваемого типа по величине $I_{c\ собс*}$ и распределений присоединений ЦП и РП по величине $I_{c\ собс*}$, приведенных на рис. 3.17. В табл. 3.1 приведены полученные указанным способом усредненные оценки защитоспособности для традиционных ТЗНП, ТЗНПВГ и универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП.

Таблица 3.1 – Усредненные оценки защитоспособности традиционных ТЗНП, ТЗНПВГ и универсальной мультичастотной адаптивной ТЗНП на ЦП и РП кабельных сетей 6–10 кВ

Тип защиты	Условие применимости	Защитоспособность на объектах кабельных сетей 6–10 кВ, %		
		ГПП	ГРУ ТЭЦ	РП (РТП)
ТЗНП	$I_{c\ собс*} \le 0{,}15-0{,}2$	64–76	81–86	96–98
ТЗНПВГ	$I_{c\ собс*} \le 0{,}05-0{,}1$	53–69	69–71	89–93
Адаптивная мультичастотная ТЗНП	$I_{c\ собс*} \le\sim 0{,}3$	~94	~99	100

Из данных табл. 3.1 можно видеть, что применение универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты обеспечивает 100%-ю защитоспособность присоединений на объектах типа РП (РТП), практически 100%-ю защитоспособность присоединений на ГРУ ТЭЦ и значительное, в ~1,5–1,8 раза, повышение защитоспособности присоединений на объектах типа ГПП по сравнению с традиционными ТЗНП и ТЗНПВГ.

3.6 Выводы по главе 3

3.6.1 Разработана адаптивная максимальная токовая защита от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанная на использовании соотношений мгновенных значений для составляющих основной частоты тока и производной напряжения нулевой последовательности, что позволяет не только увеличить чувствительность к повреждениям через большое переходное сопротивление, но и обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования при внешних и внутренних замыканиях через перемежающуюся дугу.

3.6.2 Разработана мультичастотная адаптивная токовая защита нулевой последовательности от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанная на использовании соотношений мгновенных значений суммы составляющей основной частоты и высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц установившегося и переходных режимов ОЗЗ, обеспечивающая адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при замыканиях через перемежающуюся дугу.

3.6.3 Разработана мультичастотная адаптивная токовая защита нулевой последовательности от ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанная на использовании соотношений мгновенных значений высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц установившегося и переходных режимов замыканий на землю, обеспечивающая не только повышение чувствительности к повреждениям через переходное сопротивление, но и возможность устойчивой фиксации дуговых перемежающихся ОЗЗ, возможных при больших расстройках компенсации.

3.6.4 Показано, что для фиксации «мгновенных» ОЗЗ, включая однократные пробои изоляции, в компенсированных и некомпенсированных ка-

бельных сетях могут быть применены не только защиты, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, как правило, импульсные направленные, но и защиты на основе принципов выполнения адаптивной мультичастотной ТЗНП по пп. 3.6.2 и 3.6.3.

3.6.5 На основе принципов выполнения адаптивной токовой защиты по пп. 3.6.2 и 3.6.3 разработана структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адаптивной защиты от ОЗЗ, предназначенной для применения как в некомпенсированных, так и компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

3.6.6 Результаты исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали показали, что разработанные технические решения обеспечивают высокую эффективность функционирования адаптивной токовой защиты при всех разновидностях ОЗЗ и расширение области ее возможного применения.

Результаты исследований, изложенных в главе 3, опубликованы в работах [76].

Глава 4 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ВЫПОЛНЕНИЯ АДМИТАНСНЫХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В КАБЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

4.1 Мультичастотная ненаправленная адмитансная защита для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью

4.1.1 **Способ действия мультичастотной ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ с изолированной нейтралью.** В главе 3 было показано, что для кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, в установившемся и переходных режимах ОЗЗ справедливы следующие соотношения между токами $3i_0$ и производной напряжения u_0:

$$3i_{0з} \approx 3C_{0\Sigma}\frac{du_0}{dt}; \tag{4.1}$$

$$3i_{0неп} = 3C_{0\,собс}\frac{du_0}{dt}; \tag{4.2}$$

$$3i_{0пов} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\frac{du_0}{dt}. \tag{4.3}$$

В переходных режимах ОЗЗ соотношения (4.1)–(4.3), как уже отмечалось выше, с достаточной точностью выполняются не только для оставляющей основной частоты 50 Гц, но и для высокочастотных составляющих токов $3i_0$ и напряжения u_0 в диапазоне частот до ~2 кГц [23]. Из (4.2) и (4.3) можно видеть, что в указанном диапазоне частот отношение мгновенных значений тока $3i_0$ к мгновенным значениям производной напряжения u_0' при внешних и при внутренних ОЗЗ соответственно равно:

$$\frac{3i_{0неп}}{u_0'} = 3C_{0\,собс}; \tag{4.4}$$

$$\frac{3i_{0пов}}{u_0^{'}} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}). \qquad (4.5)$$

На основе соотношений (4.4) и (4.5) в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью можно осуществить максимальную защиту, контролирующую величину емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения как в установившемся, так и в переходных режимах ОЗЗ. Однако непосредственный контроль величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения на основе соотношений мгновенных значений тока $3i_0$ и мгновенных значений производной напряжения u_0' (4.4) и (4.5) практически осуществить трудно из-за возможных в процессе измерений временных сдвигов кривых $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$, обусловленных угловыми погрешностями первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности, дифференцирования напряжения $u_0(t)$, частотных фильтров для подавления составляющих с частотами f > 2,0 кГц и других элементов схемы формирования сравниваемых величин. Наиболее просто компенсацию влияния указанных угловых погрешностей можно выполнить, используя для сравнения не мгновенные, а средние интегральные значения величин $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$, например, среднеквадратичные.

Из (4.4) и (4.5) для отношений текущих среднеквадратичных значений величин $3i_0(t)$ и $u_0'(t)$ для неповрежденного и поврежденного присоединений получим:

$$C_{0\,нен}(t) = \frac{3I_{0нен}(t}{U_0^{'}(t)} = 3C_{0\,собс}; \qquad (4.6)$$

$$C_{0\,пов}(t) = \frac{3I_{0\,пов}(t)}{U_0^{'}(t)} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}). \qquad (4.7)$$

В отличие от рассмотренной в главе 2 традиционной максимальной адмитансной защиты, основанной на контроле полной проводимости нулевой последовательности защищаемого присоединения Y_0 или ее реактивной (емкостной) составляющей B_0, текущее значение воздействующей величины на

зажимах предлагаемой защиты $C_0(t) = 3I_0(t)/U_0'(t)$ определяется только величиной емкостей фаз на землю защищаемого присоединения (при внешних ОЗЗ) и внешней сети (при внутренних ОЗЗ), не зависящей от частоты, что позволяет обеспечить высокую устойчивость функционирования как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ.

Для обеспечения устойчивости несрабатываний при внешних устойчивых и дуговых ОЗЗ предлагаемой максимальной защиты, реагирующей на отношение $3I_0(t)/U_0'(t) = C_0(t)$, уставка срабатывания должна выбираться из условия отстройки от собственной емкости фаз на землю защищаемого присоединения

$$C_{0\,уст} \geq K_{отс} 3C_{0\,собс}, \tag{4.8}$$

где значение коэффициента отстройки $K_{отс}$, как и для мультичастотной адаптивной токовой защиты (раздел 3.2), можно принять равным 1,5.

При внутренних ОЗЗ устойчивые срабатывания защиты будут обеспечиваться, если замер защиты удовлетворяет соотношению

$$K_ч = \frac{C_{0\,пов}}{C_{0\,уст}} = \frac{(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})}{K_{отс} 3C_{0\,собс}} \geq K_{ч.мин}, \tag{4.9}$$

где $K_{ч.мин}$ – минимальный коэффициент чувствительности.

Так как рассматриваемая адмитансная защита, как и мультичастотная адаптивная ТЗНП (раздел 3.2), основана на использовании не только составляющих основной частоты, но и высших гармонических составляющих тока $3i_0$, требования к ее чувствительности можно принять такими же, как и для токовых защит от ОЗЗ на основе ВГ ($K_{ч.мин}$ = 1,5 [4]).

Из (4.8) и (4.9) получим, что условие применимости ненаправленной мультичастотной адмитансной защиты, как и мультичастотной адаптивной ТЗНП, определяются только относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{с\,собс*}$:

$$3C_{0\,собс*} = \frac{3C_{0\,собс}}{3C_{0\Sigma}} = I_{с\,собс*} \leq \frac{1}{1 + K_{отс} K_{ч.мин}}, \tag{4.10}$$

откуда при $K_{отс}$ = 1,5 и $K_{ч.мин}$ = 1,5 получим

$$I_{c\,собс*} \le \frac{1}{1+1{,}5\cdot 1{,}5} \approx 0{,}31.$$

Таким образом, применение в кабельных сетях 6–10 кВ мультичастотной адмитансной защиты позволяет обеспечить примерно такую же защитоспособность присоединений на объектах типа ГПП, ГРУ ТЭЦ и РП (РТП), как и применение мультичастотной адаптивной ТЗНП (табл. 3.1). Преимуществами адмитансной защиты по сравнению с мультичастотной адаптивной ТЗНП являются стабильность замера по воздействующей величине $C_0 = 3I_0 / U_0'$, как в установившемся, так и в переходных режимах ОЗЗ, обеспечивающая высокую динамическую устойчивость функционирования при внешних и внутренних дуговых замыканиях, и более высокая чувствительность к замыканиям через переходное сопротивление $R_П$, обеспечиваемая независимостью замера $C_0 = 3I_0 / U_0'$, как можно видеть из схемы замещения на рис. 2.1, от величины последнего.

В сетях, работающих с заземлением нейтрали через высокоомный резистор (R_N, рис. 2.5), ток $3i_0$ в защищаемом присоединении при внешних ОЗЗ (т. $K_{з1}^{(1)}$, рис. 2.5), как и в сети с изолированной нейтралью, определяется выражением (4.2). Соответственно замер защиты при внешних ОЗЗ для мгновенных значений тока и напряжения нулевой последовательности, как и в сети с изолированной нейтралью, определяется выражением (4.4), а для среднеквадратичных значений – соотношением (4.6).

При внутреннем ОЗЗ (т. $K_{з2}^{(1)}$, рис. 2.5) с учетом тока i_R в резисторе R_N, протекающего только через место повреждения и в поврежденном присоединении, ток $3i_0$ в защищаемом присоединении равен

$$3i_{0\,пов} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\frac{du_0}{dt} - \frac{u_N}{R_N} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс})\frac{du_0}{dt} - \frac{u_0}{R_N}. \qquad (4.11)$$

Из (4.11) для отношения текущих среднеквадратичных значений электрических величин $3I_0(t)$ и $U_0^{'}(t)$ получим

$$C_{0\,пов}(t)=\frac{3I_{0\,пов}(t)}{U_0'(t)}=3(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс})\sqrt{1+\frac{C_{0\Sigma}^2}{\left(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс}\right)^2}}\,. \qquad (4.12)$$

Из (4.12) можно видеть, что активная составляющая i_R тока $3i_0$ защищаемого присоединения, обусловленная заземляющим резистором R_N, при внутренних ОЗЗ увеличивает замер защиты, т.е. ее чувствительность, однако влияние активной составляющей тока ОЗЗ на замер защиты в установившемся и переходных режимах ОЗЗ будет различным. Как известно (например, [8]), при высокоомном заземлении нейтрали оптимальным считается сопротивление резистора $R_N = 1/3\omega C_{0\Sigma}$. При указанном сопротивлении заземляющего резистора R_N в установившемся режиме ОЗЗ реактивная (емкостная) составляющая тока замыкания равна активной, т.е $I_R = I_{C\Sigma}$, а полный ток ОЗЗ равен $I_з^{(1)}=\sqrt{I_{C\Sigma}^2+I_R^2}\approx\sqrt{2}I_{C\Sigma}$. При этом ток $3I_{0\,пов}$ и, соответственно, значение воздействующей величины $C_{0\,пов}$ на зажимах защиты увеличивается в $\sqrt{1+C_{0\Sigma}^2/(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс})^2}$ раз. В переходных режимах при дуговых ОЗЗ в токе $3i_{0\,пов}$ активная составляющая тока ОЗЗ и, соответственно, тока $3i_{0\,пов}$ значительно меньше емкостной и не оказывает существенного влияния на замер защиты, который в этих режимах определяется выражением (4.7). Таким образом, заземление нейтрали сети через высокоомный резистор R_N не влияет на условия селективности мультичастотной адмитансной защиты по сравнению с изолированной нейтралью, увеличивает замер и, соответственно, чувствительность защиты в установившемся режиме ОЗЗ и обеспечивает такую же чувствительность в переходных режимах при дуговых ОЗЗ, как и в сети с изолированной нейтралью.

4.1.2 **Структурно-функциональная схема мультичастотной ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ.** В соответствии с описанным п. 4.1.1 способом действия упрощенную структурно-функциональную схему мультичастотной адаптивной можно представить в виде, показанном на рис. 4.1.

В схеме по рис. 4.1: *ZF1*, *ZF2* – фильтры низших частот (ФНЧ), обеспечивающие подавление во входных величинах $3i_0$ и u_0 высокочастотных со-

ставляющих с частотой f > 2 кГц; *D/DT* – дифференциатор; *RMS1*, *RMS2* – блоки формирования текущих среднеквадратичных значений $3I_0(t)$ и $U_0'(t)$; *DIV* – блок деления, формирующий на выходе текущее значение воздействующей величины $C_0(t) = 3I_0(t)/U_0'(t)$); *CMP* – схема сравнения текущего значения $C_0(t)$ с уставкой $C_{0\,уст}$; *DEL* – элемент временной задержки на срабатывание.

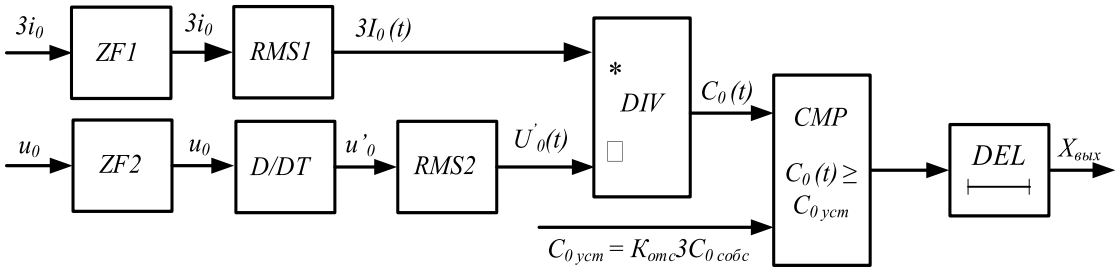
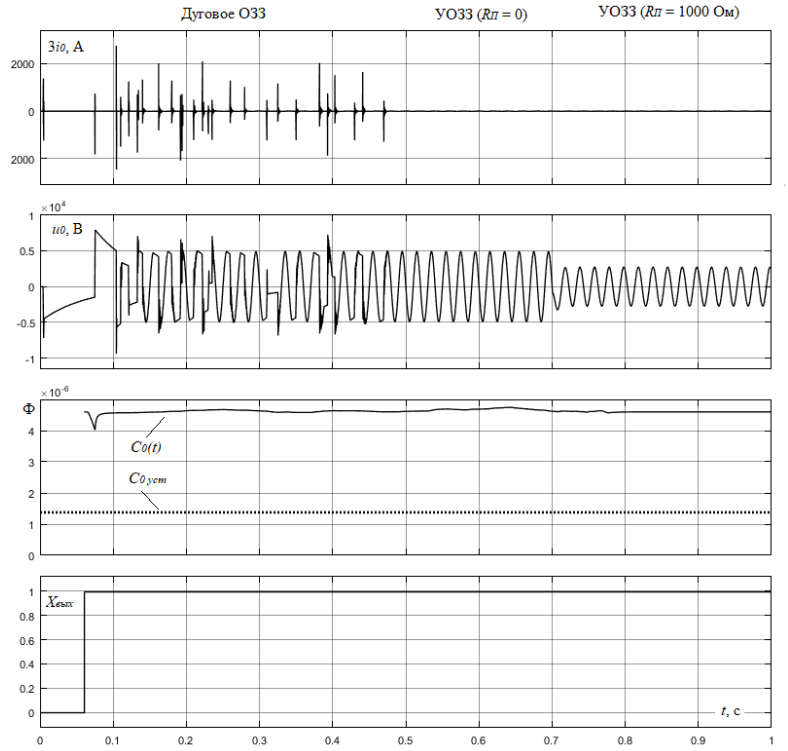


Рисунок 4.1 – Структурно-функциональная схема мультичастотной ненаправленной адмитансной защиты

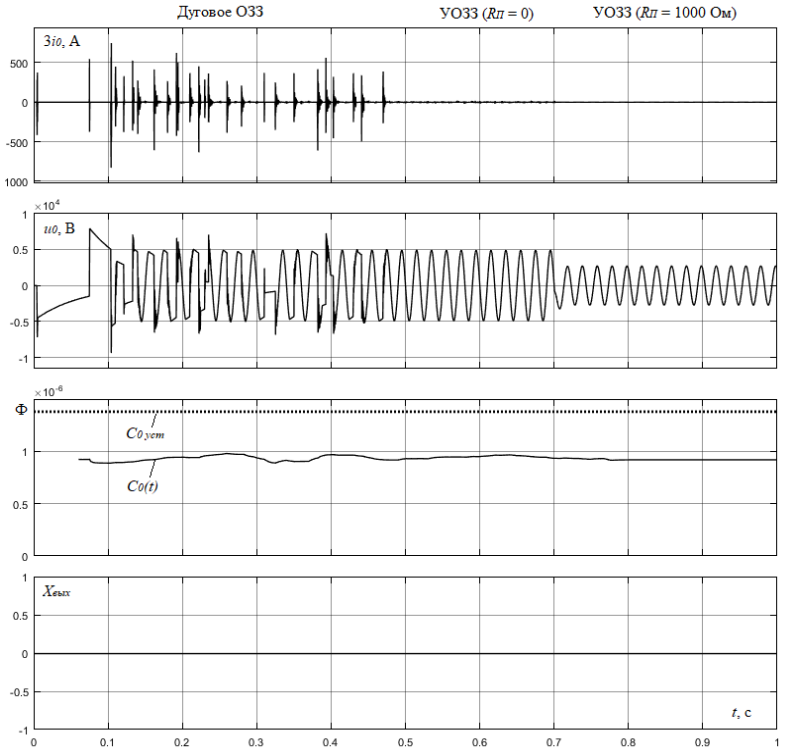
4.1.3 **Анализ функционирования мультичастотной адмитансной защиты на имитационных моделях кабельных сетей**. Исследования проводились на имитационных моделях кабельных сетей 6 кВ с различными значениями суммарного емкостного тока $I_{c\Sigma}$ = 5 и 30 А и различными режимами заземления нейтрали (изолированная нейтраль и заземленная через высокоомный резистор). Имитировались дуговые ОЗЗ по теории W. Petersen и I.E. Peters, J. Slepian, а также сложные дуговые ОЗЗ, переходящие в УОЗЗ с различными значениями переходного сопротивления $R_П$ в месте повреждения.

На рис. 4.2 и 4.3 в качестве примера приведены расчетные осциллограммы входного тока $3i_0$ и входного напряжения u_0, текущего значения воздействующей величины $C_0(t) = 3I_0(t)/U_0'(t)$ на выходе блока *DIV*, величины уставки $C_{0\,уст}$, выбранной по (4.8), и сигнала на выходе схемы сравнения *CMP*. Осциллограммы на рис. 4.2 иллюстрируют работу защиты в сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 А при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0), а затем в УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ = 1000 Ом). Осциллограммы на рис. 4.3 иллюстрируют работу защиты в сети с высокоомным заземле-

нием нейтрали с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 А при тех же условиях, что и в сети с изолированной нейтралью.

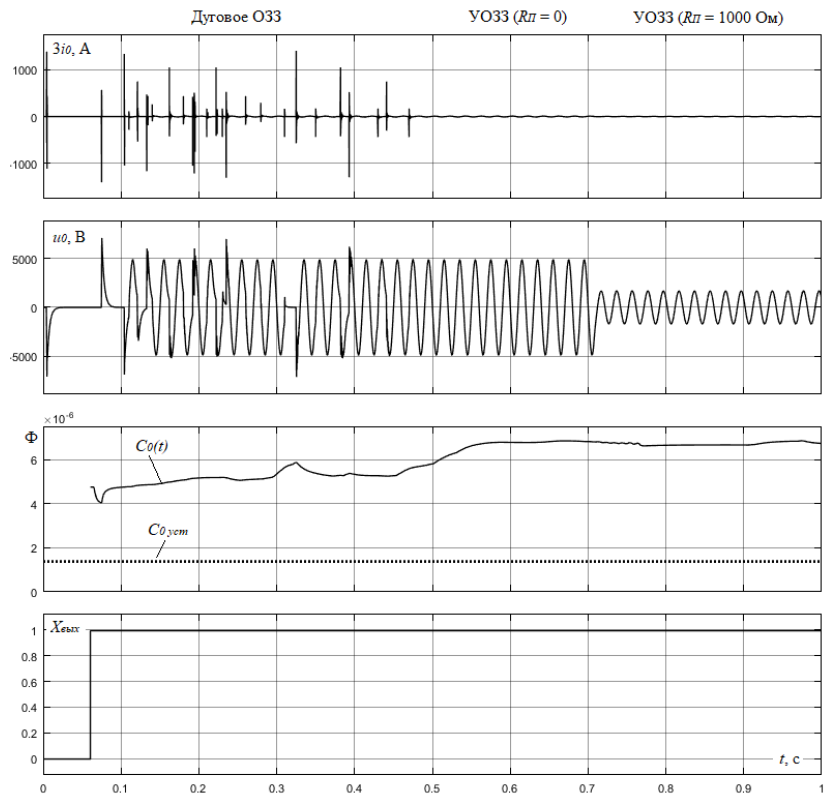


а)

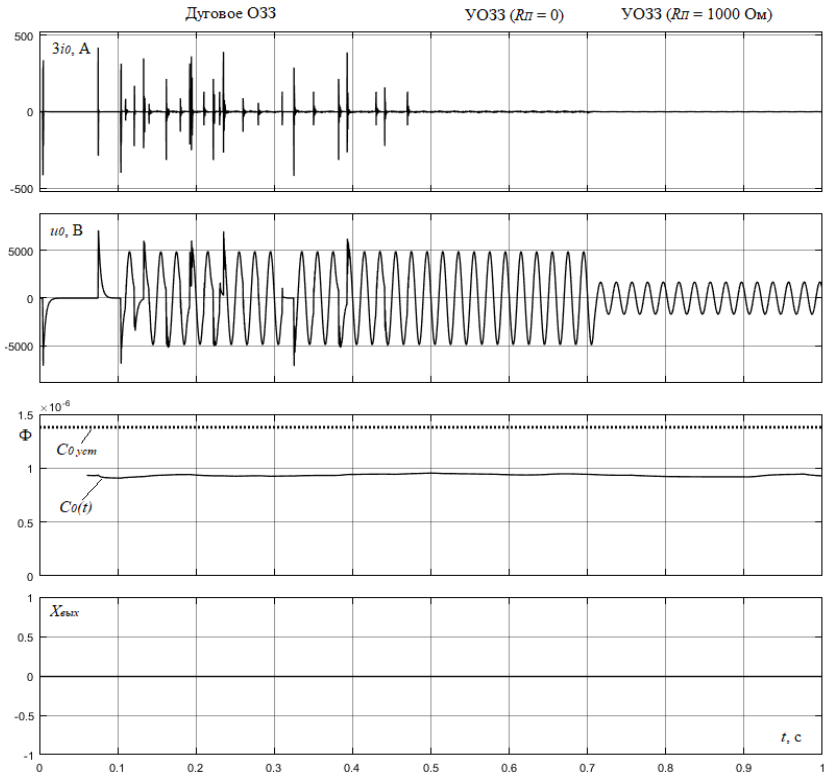


б)

Рисунок 4.2 –Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) ОЗЗ в кабельной сети с изолированной нейтралью с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 А



а)



б)

Рисунок 4.3 –Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) ОЗЗ в кабельной сети с высокоомным заземлением нейтрали с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 А

Исследования на имитационных моделях подтверждают работоспособность изложенных в п. 4.1.2 принципов функционирования предлагаемой мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с заземлением нейтрали через высокоомный резистор. Обращает на себя внимание определенная нестабильность замера адмитансной защиты $C_0(t) = 3I_0(t) / U_0'(t)$ в переходных режимах на дуговой стадии ОЗЗ (рис. 4.2, 4.3), что объясняется, на наш взгляд, собственными переходными процессами в элементах схемы формирования сравниваемых величин и схеме сравнения защиты. Следует отметить, однако, что степень нестабильности замера при внешних и внутренних дуговых ОЗЗ с достаточным запасом учитывается в обоснованных выше значениях коэффициента отстройки $K_{отс}$ = 1,5 и коэффициента чувствительности $K_{ч.мин}$ = 1,5. В режимах УОЗЗ, как металлических, так и через переходное сопротивление, стабильность замера $C_0(t) = 3I_0(t) / U_0'(t)$, как и следовало ожидать, возрастает. Осциллограммы на рис. 4.3, а иллюстрируют также влияние высокоомного заземления нейтрали на чувствительность мультичастотной максимальной адмитансной защиты: как и было показано в п. 4.1.1, она увеличивается только в режимах УОЗЗ, а на дуговой стадии замыкания определяется только высокочастотными составляющими и остается такой же, как и в сети с изолированной нейтралью.

4.2 Мультичастотная ненаправленная адмитансная защита для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

4.2.1 **Способ действия мультичастотной ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.** В компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, как было показано в главе 3, для высших гармонических составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ выполняются соотношения (3.24) и (3.25), из которых можно получить:

$$C_{0\,неп} = \frac{3I_{0\,ВГ\,неп}(t)}{U'_{0\,ВГ}(t)} = 3C_{0\,собс}; \qquad (4.13)$$

$$C_{0\,пов} = \frac{3I_{0\,ВГ\,пов}(t)}{U'_{0\,ВГ}(t)} = 3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}), \qquad (4.14)$$

где $3I_{0\,ВГ\,неп}(t)$ и $3I_{0\,ВГ\,пов}(t)$ – соответственно текущие среднеквадратичные значения высших гармонических составляющих тока нулевой последовательности в неповрежденном и поврежденном присоединениях; $U'_{0\,ВГ}(t)$ – текущее среднеквадратичное значение высших гармонических составляющих производной напряжения нулевой последовательности.

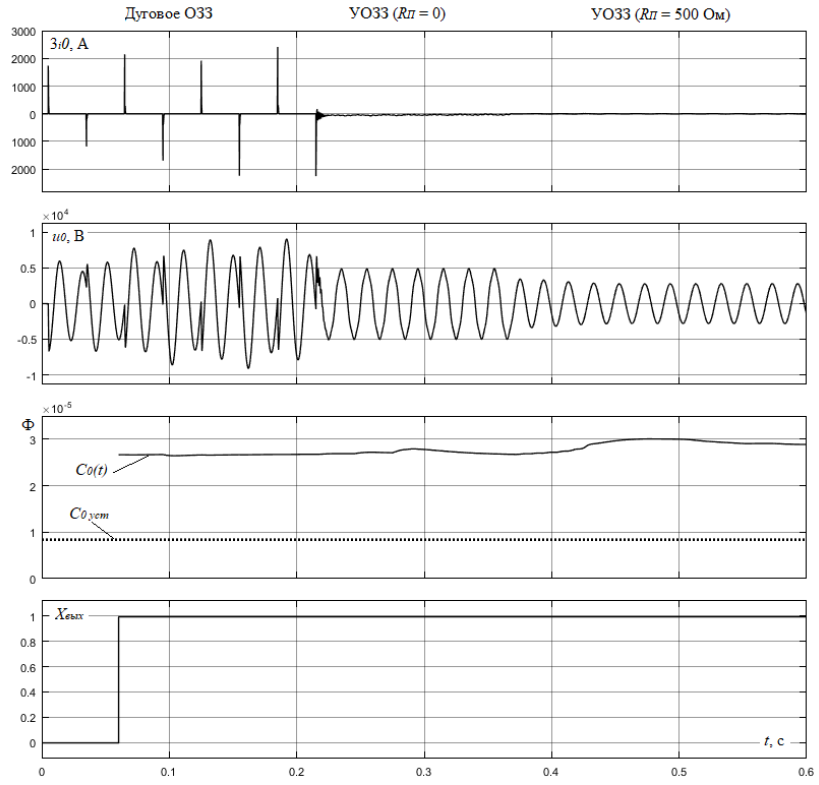
Сравнивая (4.13) и (4.14) с выражениями (4.5) и (4.6), можно сделать вывод, что в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ можно выполнить максимальную адмитансную защиту от ОЗЗ на основе рассмотренного в разделе 4.1 способа, используя для ее действия только высокочастотные составляющие в диапазоне частот до ~2 кГц. Структурно-функциональная схема мультичастотной максимальной адмитансной защиты для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ аналогична схеме для сетей с изолированной нейтралью (рис. 4.1) с той лишь разницей, что частотные фильтры *ZF1, ZF2* должны обеспечивать подавление во входных величинах $3i_0$ и u_0 не только высокочастотных составляющих с частотой $f > 2$ кГц, но и составляющей основной частоты. Уставка срабатывания мультичастотной адмитансной защиты для компенсированных кабельных сетей, как и для сетей с изолированной нейтралью, выбирается по условию (4.6), а условия применимости определяются выражением (4.10).

4.2.2 **Анализ функционирования мультичастотной адмитансной защиты на имитационной модели компенсированной кабельной сети**. Исследования проводились на имитационных модели кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma} = 30$ А при резонансной настройке ДГР и расстройках компенсации в пределах ±20%. При расстройках компенсации имитировались дуговые ОЗЗ по теории W. Petersen с интервалами между повторными зажиганиями заземляющей дуги Δt =30–50 мс (такие ОЗЗ, как уже отмечалось выше, могут со-

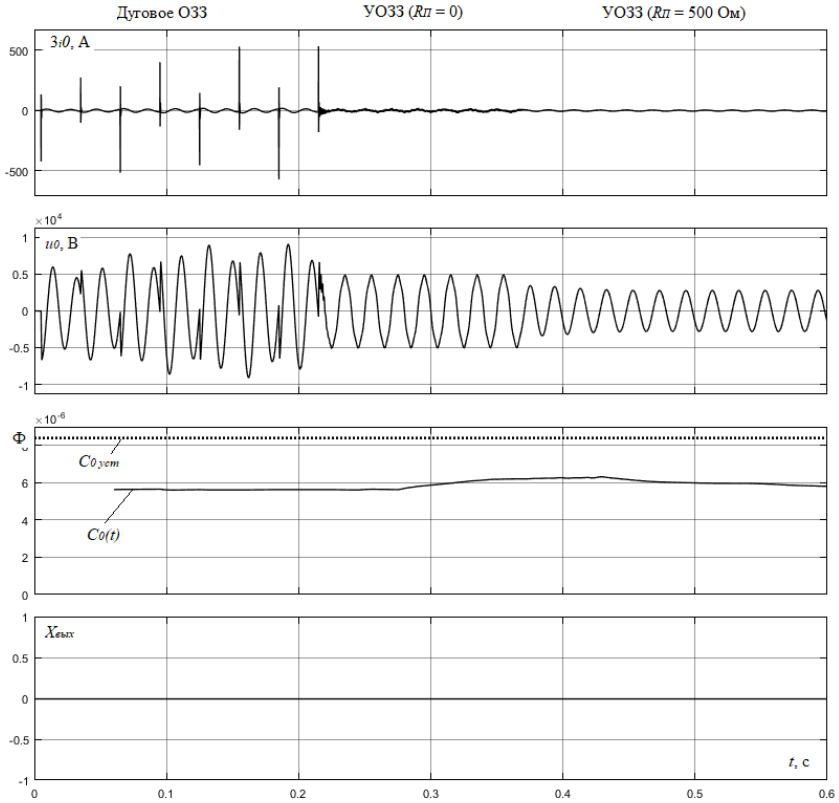
провождаться опасными перенапряжениями в сети), переходящие в УОЗЗ с различными значениями переходного сопротивления $R_П$ в месте повреждения.

На рис. 4.4 и 4.5 в качестве примера приведены полученные на имитационных модели осциллограммы входного тока $3i_0$ и входного напряжения u_0, текущего значения воздействующей величины $C_0(t) = 3I_0(t) / U'_0(t)$ на выходе блока *DIV*, величины уставки $C_{0\,уст}$, выбранной по (4.8), и сигнала на выходе схемы сравнения *СМР* при ОЗЗ в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30 А. Осциллограммы на рис. 4.4 иллюстрируют работу защиты при работе сети в режиме перекомпенсации 20% при дуговом ОЗЗ с Δt = 30 мс, переходящем сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0), а затем в УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ = 500 Ом). Осциллограммы на рис. 4.5 иллюстрируют работу при работе сети в режиме недокомпенсации 20% при дуговом ОЗЗ с Δt = 50 мс, переходящем в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0), а затем в УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ = 500 Ом).

Осциллограммы на рис. 4.6 иллюстрируют работу адмитансной защиты в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30 А с резонансной настройкой ДГР при дуговом прерывистом ОЗЗ с большими интервалами времени между повторными зажиганиями заземляющей дуги (Δt = 300 мс). При таких ОЗЗ сигнал на выходе блока деления *DIV* будет иметь прерывистый характер, а сигнал на выходе элемента временной задержки *DEL* при $t_{ср} < \Delta t$. Дуговые прерывистые ОЗЗ с большими интервалами времени между повторными пробоями изоляции не представляют особой опасности для сети, т.к. не сопровождаются опасными перенапряжениями. Таким образом, элемент временной задержки *DEL* при рекомендованной выше уставке по времени срабатывания ($t_{ср} \approx$ 100 мс) по существу выполняет «расфильтровку» опасных и неопасных для сети дуговых ОЗЗ. Неопасные дуговые прерывистые ОЗЗ более целесообразно фиксировать как КрОЗЗ с использованием специального быстродействующего измерительного органа и элементов оперативной и долговременной памяти.

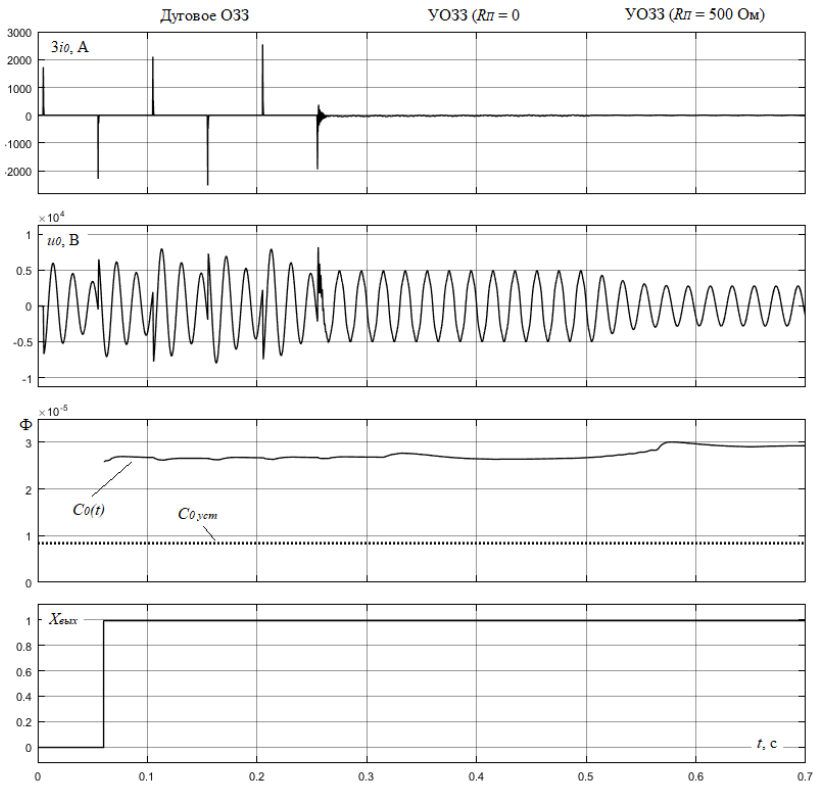


а)

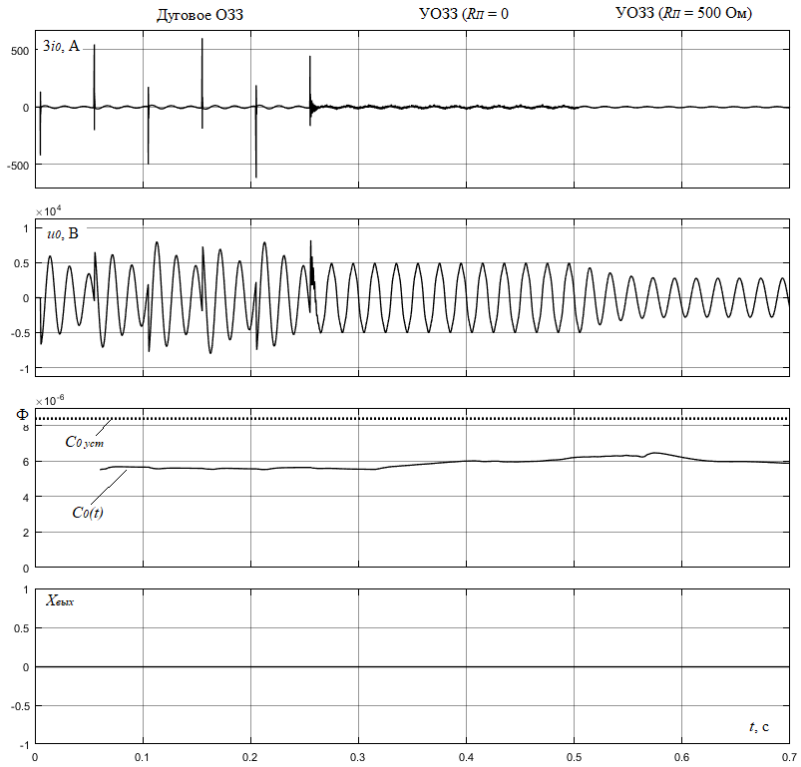


б)

Рисунок 4.4 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) ОЗЗ в компенсированной кабельной сети (перекомпенсация 20%) с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30 А

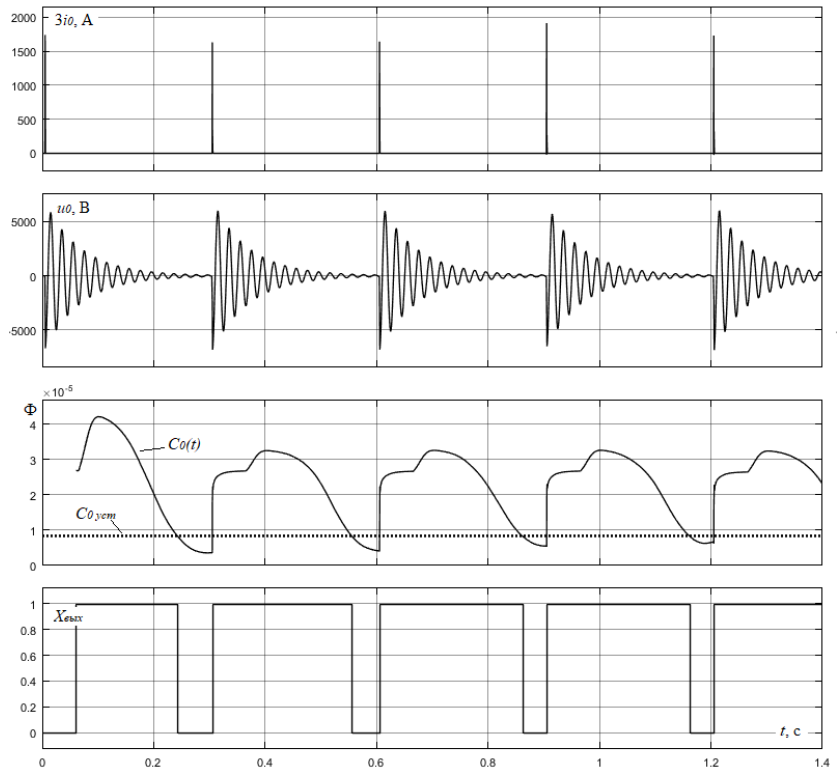


а)

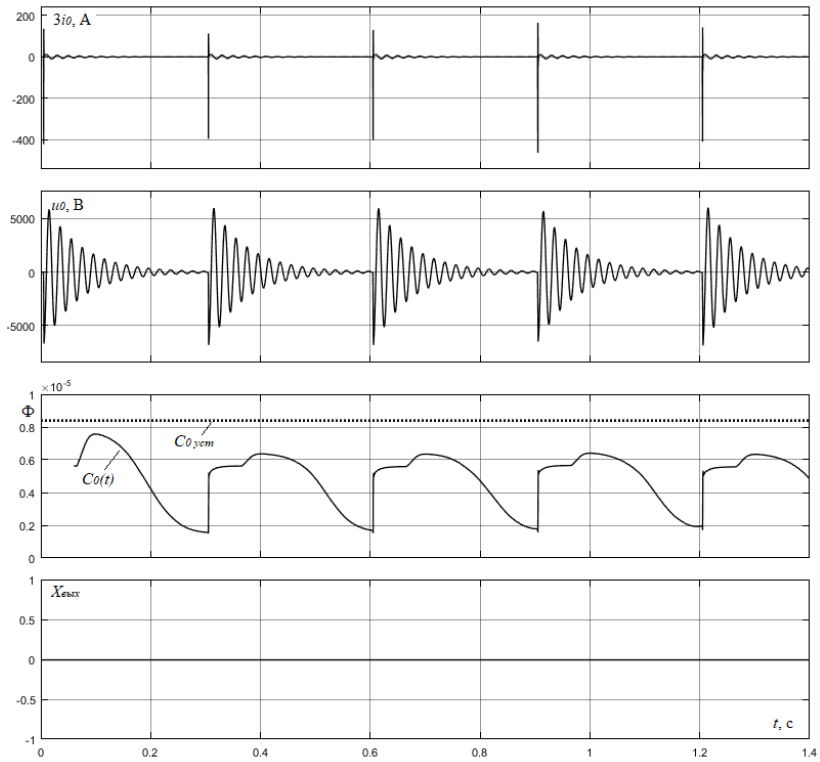


б)

Рисунок 4.5 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) ОЗЗ в компенсированной кабельной сети (недокомпенсация 20%) с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30 А



а)



б)

Рисунок 4.6 – Осциллограммы, иллюстрирующие работу мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) дуговом прерывистом ОЗЗ в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30 А с резонансной настройкой ДГР

Проведенные на имитационной модели компенсированной кабельной сети исследования в целом подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого способа выполнения адмитансной защиты на основе контроля емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения.

Область возможного применения мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ, как и рассмотренной в разделе 4.1 аналогичной защиты для кабельных сетей с изолированной нейтралью, ограничивается относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{c\,собс*} < \sim 0{,}3$. При указанном ограничении защитоспособность ненаправленных адмитансных защит на рассмотренных принципах выполнения, как и рассмотренных в главе 3 мультичастотных адаптивных токовых защит, на объектах типа ГПП и ГРУ ТЭЦ не достигает 100% (раздел 3.5). На присоединениях, для которых не выполняется условие с $I_{c\,собс*} < \sim 0{,}3$, должны применяться направленные защиты. Преимуществом адмитансных защит по сравнению с адаптивными токовыми является то, что они могут быть выполнены как ненаправленными, так и направленными. Ниже рассматривается способ выполнения направленной мультичастотной защиты от ОЗЗ для некомпенсированных и компенсированных кабельных сетей, основанный на контроле знака емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения.

4.3 Мультичастотная направленная адмитансная защита для некомпенсированных и компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

4.3.1 **Принципы выполнения мультичастотной направленной адмитансной защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.** Из (4.2) и (4.3) для неповрежденного и поврежденного присоединений получим соответственно:

$$\frac{3i_{0\,неп}(t)}{u_0^{'}(t)} = C_{о\,неп} = 3C_{0\,собс}\,; \tag{4.15}$$

$$\frac{3i_{0\,пов}(t)}{u_0^{'}(t)} = C_{0\,пов} = -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс.пов})\,. \tag{4.16}$$

В кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью соотношения (4.15) и (4.16) справедливы для суммы основной и высших гармонических составляющих в диапазоне до ~2 кГц, в компенсированных кабельных сетях – только для ВГ-составляющих. Из (4.15) и (4.16) можно видеть, что в указанном выше диапазоне частот гармонических составляющих для неповрежденного присоединения (при внешнем ОЗЗ) емкость нулевой последовательности $C_{0\,неп}$ определяется собственной емкостью фаз на землю $3C_{0\,собс}$ защищаемого присоединения и всегда положительна, для поврежденного присоединения (при внутреннем ОЗЗ) емкость нулевой последовательности $C_{0\,пов}$ определяется емкостью фаз на землю внешней сети $3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс.пов})$ и всегда отрицательна. Таким образом, используя в качестве воздействующей величины знак отношение $C_0 = 3i_0(t)/u_0^{'}(t)$, можно выполнить направленную защиту от ОЗЗ, селективность которой в диапазоне частот входного тока и напряжения нулевой последовательности до ~2 кГц автоматически будет обеспечиваться как в установившихся, так и в переходных режимах ОЗЗ.

Однако непосредственное определение емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения C_0 на основе соотношений мгновенных значений тока $3i_{0\,неп}(t)$ и производной напряжения $u_0^{'}(t)$ нулевой последовательности (4.15) и (4.16) практически невозможно из-за влияния на знак и величину замера угловых погрешностей первичных преобразователей тока и напряжения нулевой последовательности и элементов схемы формирования сравниваемых величин (например, вторичных преобразователей тока и напряжения, частотных фильтров и др.), существенно возрастающих в переходных режимах ОЗЗ. Исключить влияние указанных погрешностей можно, используя в (4.15) и (4.16) вместо отношения мгновенных значений сравниваемых величин $3i_{0\,неп}(t)/u_0^{'}(t)$ отношение взаимной корреляционной функ-

ции сигналов $3i_{0\,неп}(t)$ и $u_0^{'}(t)$ к собственной корреляционной функции сигнала $u_0^{'}(t)$ на заданном интервале времени наблюдения $T_н$ за процессом ОЗЗ:

$$C_0 = \frac{\int_0^{T_н} 3i_{0\,неп}(t)\cdot u_0^{'}(t)}{\int_0^{T_н} u_0^{'}(t)\cdot u_0^{'}(t)}. \qquad (4.17)$$

При внешних ОЗЗ отношение (4.17) равно усредненному на интервале времени наблюдения значению $C_{0\,неп}$

$$C_{0\,неп} = \frac{\int_0^{T_н} 3i_{0\,неп}(t)\cdot u_0^{'}(t)}{\int_0^{T_н} u_0^{'}(t)\cdot u_0^{'}(t)} \approx 3C_{0\,собс}, \qquad (4.18)$$

а при внутренних ОЗЗ – усредненному на интервале времени наблюдения значению $C_{0\,пов}$

$$C_{0\,пов} = \frac{\int_0^{T_н} 3i_{0\,пов}(t)\cdot u_0^{'}(t)}{\int_0^{T_н} u_0^{'}(t)\cdot u_0^{'}(t)} \approx -3(C_{0\Sigma} - C_{0\,собс}). \qquad (4.19)$$

4.3.2 **Структурно-функциональная схема мультичастотной направленной адмитансной защиты от ОЗЗ.** Упрощенно структурно-функциональную схему направленной мультичастотной адмитансной защиты можно представить в виде, показанном на рис. 4.7. Схема включает следующие основные функциональные узлы и элементы: *ZF1* и *ZF3* – ФНЧ, обеспечивающие подавление высокочастотных составляющих тока $3i_0$ и напряжения u_0 при $f > 2$ кГц; *ZF2* и *ZF4* – режекторные фильтры 50 Гц (используются только при работе устройства защиты в компенсированной сети); *SX1* и *SX2* – переключатели режима заземления нейтрали сети; *Kor1* и *Kor2* – корреляторы; *DIV* – блок деления; *CMP* – схема сравнения; *DEL* – элемент временной задержки на срабатывание. Коррелятор *Kor1* вычисляет взаимную корреляционную функцию сигналов тока $3i_0(t)$ и производной напряжения, коррелятор *Kor2* – собственную корреляционную функцию сигнала $u_0^{'}(t)$. Схема сравнения *CMP* формирует на выходе логический сигнал «1» в соответствии с (4.19) при $C_0(t) < 0$.

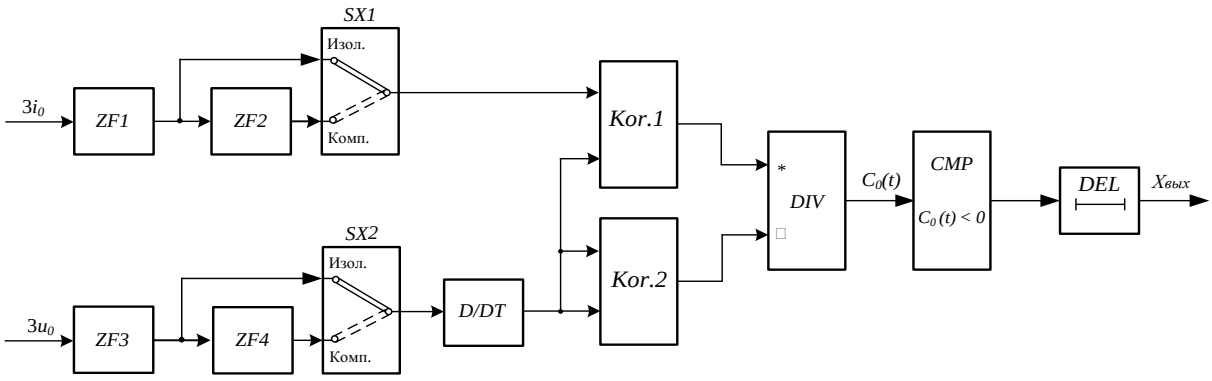
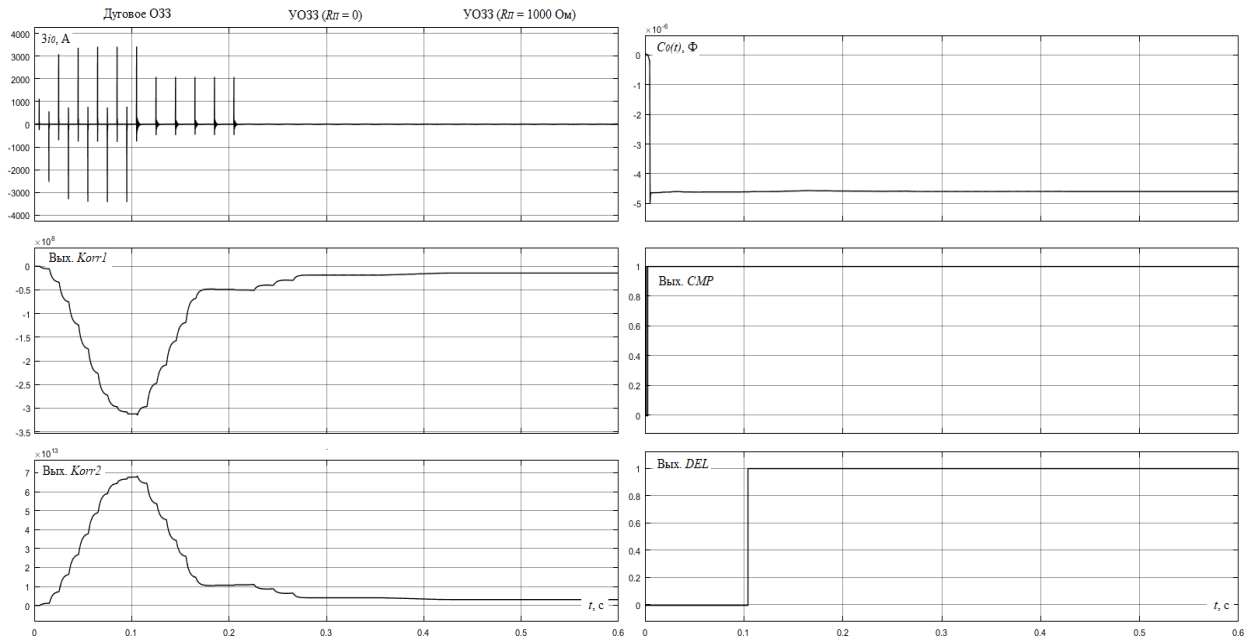


Рисунок 4.7 – Упрощенная структурно-функциональна схема направленной мультичастотной адмитансной защиты для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

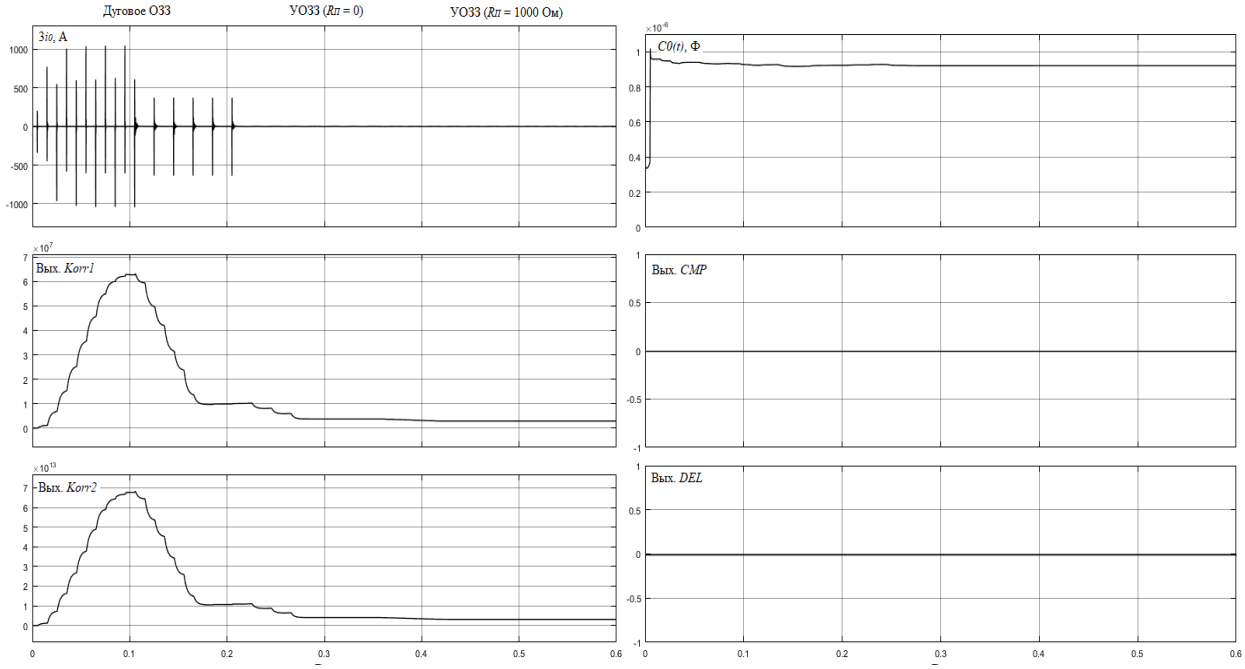
Для формирования на выходе блока деления *DIV* непрерывного сигнала $C_0(t)$ при опасных ДПОЗЗ (Δt < 60 мс) время усреднения выходных сигналов корреляторов также принимается равным 60 мс. С помощью элемента временной задержки на срабатывание можно осуществить распознавание опасных (Δt < 60 мс) и неопасных (Δt > 60 мс) дуговых ОЗЗ.

Осциллограммы на рис. 4.8 иллюстрируют работу предложенной направленной адмитансной защиты при внутреннем и внешнем ОЗЗ в кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 5 А. На осциллограммах дуговое ОЗЗ по модели W. Petersen (Δt = 10 мс) переходит сначала в ДПОЗЗ по модели I.E. Peters, J. Slepian (Δt = 20 мс), в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0) и УОЗЗ через большое переходное сопротивление ($R_П$ = 1000 Ом). На всех стадиях развития ОЗЗ измерительная часть защиты четко фиксирует отрицательный знак воздействующей величины $C_0(t)$ < 0 на поврежденном присоединении и срабатывает (рис. 4.8, а) и положительный знак $C_0(t)$ > 0 на неповрежденном присоединении и не срабатывает (рис. 4.8, б).

Анализ на имитационных моделях показал, что заземление нейтрали через высокоомный резистор не оказывает влияния на замер защиты при внешнем ОЗЗ, как на дуговой стадии замыкания, так и на стадии УОЗЗ (рис. 4.9, б). При внутреннем ОЗЗ высокоомное заземление нейтрали не изменяет знак замера емкости нулевой последовательности $C_0(t)$, но уменьшает его величину, т.е. и чувствительность защиты, на стадии УОЗЗ (рис. 4.9, а).



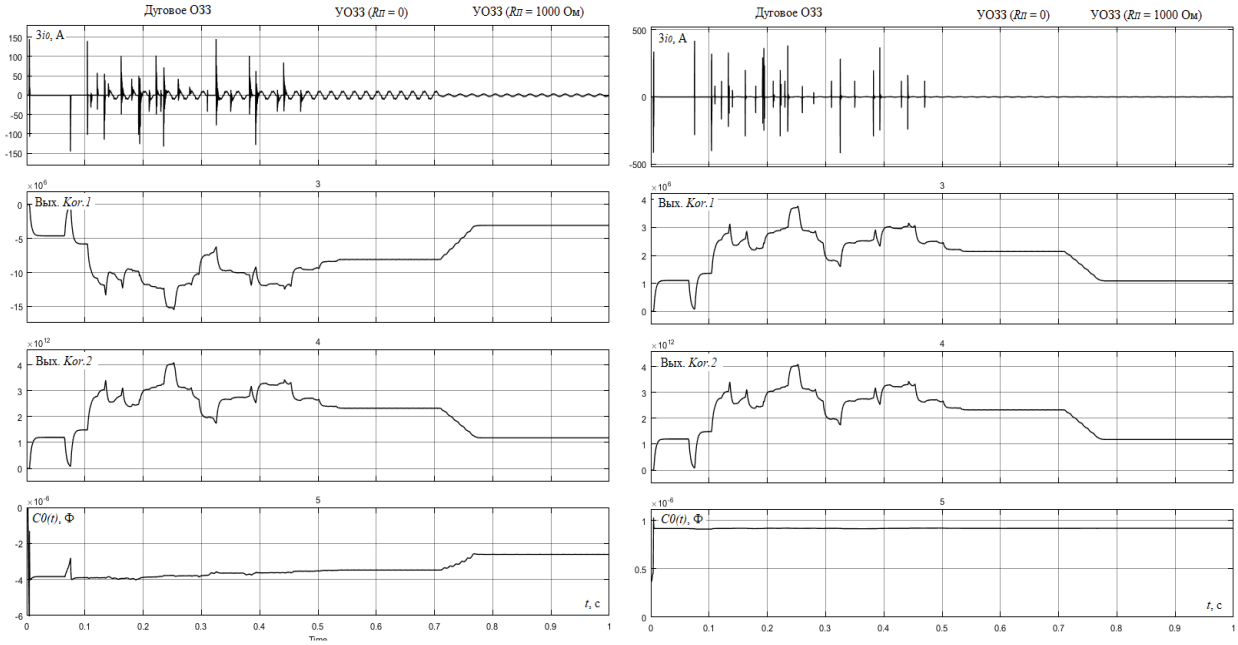
а)



б)

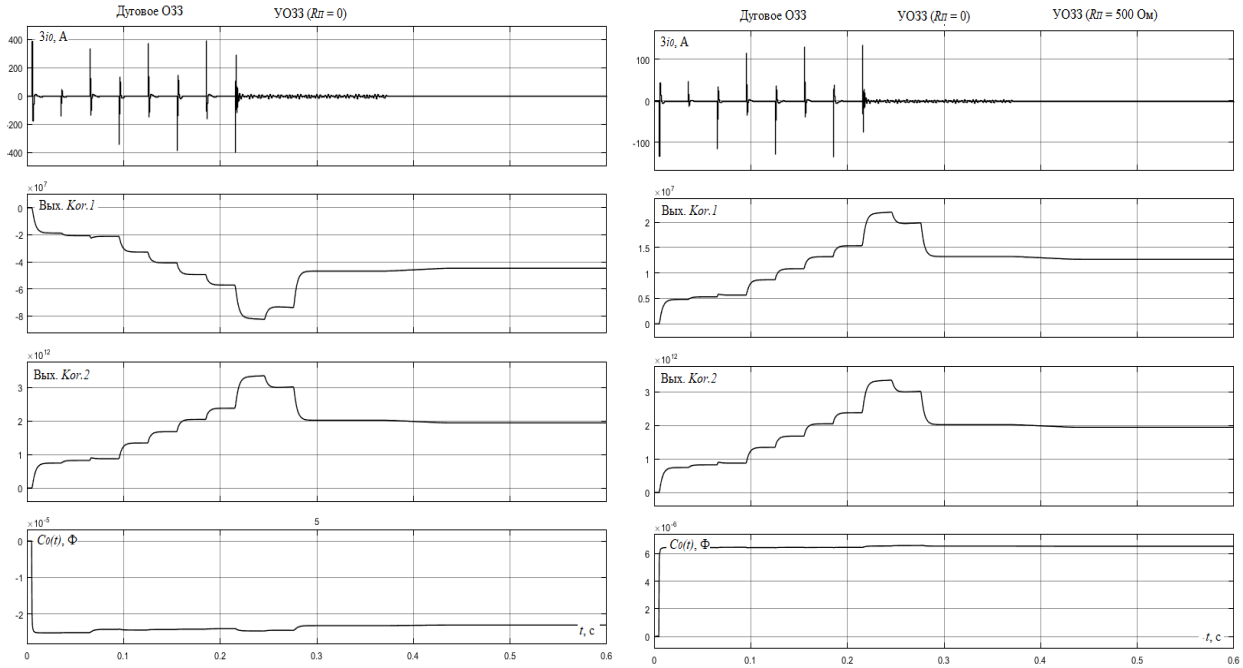
Рисунок 4.8 – Осциллограммы работы направленной мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) сложном ОЗЗ в кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 5 А, работающей с изолированной нейтралью

Осциллограммы на рис. 4.10 иллюстрируют работу направленной адмитансной защиты при внутреннем и внешнем ОЗЗ в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ и $I_{c\Sigma}$ = 30 А при работе последней с недокомпенсацией 20%.



а) **б)**

Рисунок 4.9 – Осциллограммы работы измерительной части направленной мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) сложном ОЗЗ в кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 5 А, работающей с высокоомным заземлением нейтрали



а) **б)**

Рисунок 4.10 – Осциллограммы работы измерительной части направленной мультичастотной адмитансной защиты при внутреннем (а) и внешнем (б) сложном ОЗЗ в компенсированной кабельной сети с $U_{ном}$ = 6 кВ, $I_{c\Sigma}$ = 30 А, работающей с недокомпенсацией 20%

Из осциллограмм рис. 4.10 можно видеть, что как на стадии дугового ОЗЗ, так и в установившемся режиме замыкания при различных значениях переходного сопротивления в месте повреждения, измерительная часть защиты четко фиксирует отрицательный знак воздействующей величины $C_0(t) < 0$ на поврежденном присоединении и срабатывает (рис. 4.8, а) и положительный знак $C_0(t) > 0$ на неповрежденном присоединении и не срабатывает (рис. 4.8, б).

Таким образом, на основе предложенного способа выполнения направленной адмитансной защиты можно получить универсальное решение, как для компенсированных, так и для некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.

С использованием предложенного способа можно выполнить также ненаправленную мультичастотную максимальную адмитансную защиту. Для выполнения ненаправленной максимальной защиты в качестве воздействующей величины используется не знак, а модуль емкости нулевой последовательности $C_0(t)$, формируемый на выходе блока деления *DIV* (рис. 4.7).

4.4 Разработка и исследование функционально-структурной схемы макетного образца универсальной адмитансной защиты от замыканий на землю для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ

4.4.1 **Дополнительные требования к выполнению макетного образца универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.** Разработанные в разделе 4.3 принципы выполнения мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ позволяют получить универсальное техническое решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ, работающих различными режимами заземления ней-

трали. Как и при разработке функционально-структурной схемы универсальной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ, учитывались требования Индустриального партнера по теме ПНИЭР – ООО НПП «ЭКРА», а именно:

– макетный образец адмитансной защиты должен выполняться на цифровой микропроцессорной базе;

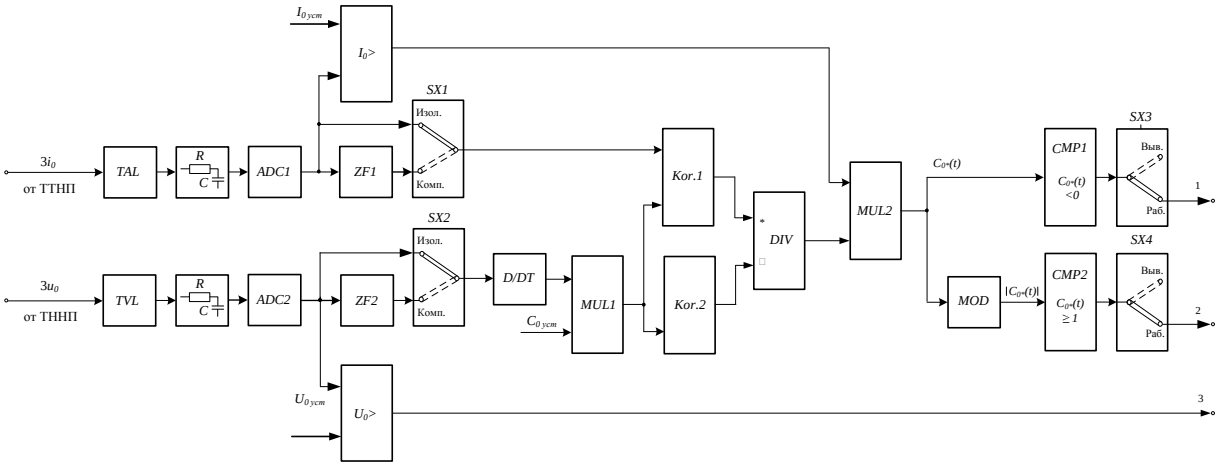
– в защите должны использоваться АЦП, применяемые в серийных микропроцессорных терминалах РЗА НПП «ЭКРА» (разрядность $N_{АЦП}$ = 16, частота дискретизации $f_д$ = 4 кГц);

– в макетном образце защиты должны использоваться вторичные преобразователи тока и напряжения нулевой последовательности, применяемые в защитах от ОЗЗ микропроцессорных терминалов НПП «ЭКРА» для защиты линий 6–35 кВ.

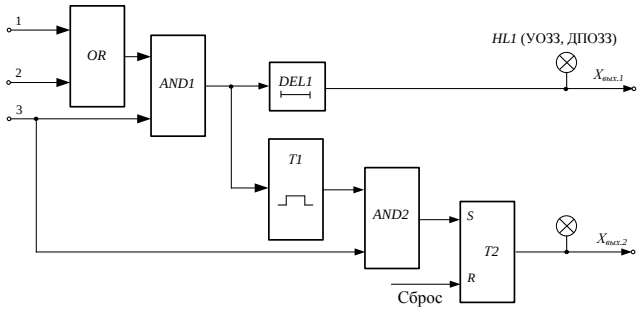
Отметим также, что при исследованиях и оценке эффективности функционирования универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ учитывалось влияние погрешностей, вносимых электромагнитными кабельными ТТНП и ТННП. Для этого в имитационных моделях компенсированной и некомпенсированной кабельной сети для подключения цепей тока и напряжения нулевой последовательности защиты использовались модели кабельного ТТНП наиболее широко применяемого типа ТЗЛМ и электромагнитного ТННП типа НТМИ-66, разработанные в [148, 149].

4.4.2 **Структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ для компенсированных и некомпенсированных кабельных сетей 6–10 кВ.** Разработанная на основе рассмотренных в разделе 4.3 принципов выполнения и указанных выше дополнительных требований структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адмитансной приведена на рис. 4.11.

Схема включает измерительную (рис. 4.11, а) и логическую (рис. 4.11, б) части защиты.



а)



б)

Рисунок 4.11 – Структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ:
а – измерительная часть; б –логическая часть

Измерительная часть защиты включает следующие основные функциональные узлы и элементы: *TLA* – вторичный преобразователь тока нулевой последовательности; *TLV* – вторичный преобразователь напряжения нулевой последовательности; *RC* – входные *RC*-фильтры 1-го порядка, обеспечивающие подавление высокочастотных составляющих переходных токов и напряжений до ~2 кГц; *ADC*1, *ADC2* – АЦП, обеспечивающие формирование цифровых отсчетов тока и напряжения нулевой последовательности; *ZF1*, *ZF2* – цифровые фильтры, обеспечивающие подавление составляющей основной частоты (используются только при работе устройства защиты в компенсированных сетях); *SX1*, *SX2* – переключатели режима заземления нейтрали защищаемой сети; *D*/*DT* – цифровой дифференциатор; *MUL1*, *MUL2* – первый и второй блоки перемножения; *Kor.1*, *Kor.2* – первый и второй корреляторы; *DIV* – блок деления; *MOD* – блок вычис-

ления модуля входной величины; *CMP1*, *CMP2* – первая и вторая схемы сравнения; *SX3* – переключатель ввода в работу/вывода из работы направленной адмитансной защиты; *SX4* – переключатель ввода в работу/вывода из работы ненаправленной адмитансной защиты; I_0> – пусковой орган максимального тока нулевой последовательности; U_0> – пусковой орган максимального напряжения нулевой последовательности; $C_{0\,уст}$ – уставка направленной и ненаправленной защиты по воздействующей величине; $I_{0\,уст}$ – уставка по току срабатывания пускового органа тока; $I_{0\,уст}$ – уставка по напряжению срабатывания пускового органа напряжения.

Логическая часть защиты включает следующие основные элементы: *OR* – логический элемент «ИЛИ»; *AND1*, *AND2* – логические элементы «И»; *T1* – одновибратор, выполняющий функции оперативной (кратковременной) памяти; *T2* – *RS*-триггер, выполняющий функции долговременной памяти; *DEL* – элемент временной задержки на срабатывание.

В имитационной модели макетного образца адаптивной ТЗНП по схеме рис. 4.11 использовались входные *RC*-фильтры с частотой среза f_c до 1000 Гц, и АЦП с частотой дискретизации $f_д$ = 4 кГц и разрядностью $N_{АЦП}$ = 16. Модели вторичных преобразователей тока *TLA* и напряжения *TLV* выполнялись на основе реальных характеристик и параметров промежуточных трансформаторов тока и напряжения, используемых в функциях защиты от ОЗЗ разрабатываемой НПП «ЭКРА» новой серии микропроцессорных терминалов РЗА линий электропередачи среднего напряжения.

Время усреднения («окно» наблюдения $T_н$) в корреляторах *Kor.1* и *Kor.2* для обеспечения устойчивости функционирования защиты при опасных для сети ДПОЗЗ (интервалы времени между повторными пробоями изоляции Δt < 50–60 мс) принято равным 60 мс (3 периода рабочей частоты T_{50} = 20 мс). С учетом принятого значения $T_н$ для исключения неустойчивой фиксации дуговых прерывистых ОЗЗ с Δt > 60 мс уставка по времени срабатывания элемента временной задержки *DEL* должна выбираться из условия

$$t_{ср.\,DEL1} > T_H = 60 \text{ мс}. \qquad (4.20)$$

В модели защиты по рис. 4.11 принято $t_{ср.DEL}$ = 100 мс.

Уставка по величине $C_{0\,уст}$ в имитационной модели защиты в соответствии с (4.8) выбиралась из условия

$$C_{0\,уст} \geq K_{отс} 3C_{0\,собс}, \qquad (4.21)$$

где $K_{отс}$ = 1,5 – коэффициент отстройки; $C_{0\,собс}$ – емкость фазы на землю защищаемого присоединения.

Пусковой орган максимального напряжения нулевой последовательности U_0>, как и в рассмотренной в разделе 3.5 универсальной мультичастотной адаптивной токовой защите, предназначен для отстройки защиты от режимов, не связанных с ОЗЗ, при которых возможно появление тока и напряжения нулевой последовательности (коммутационные переключения в сети и др.). Уставка пускового органа по напряжению срабатывания $U_{0\,уст}$ выбирается по (3.31), по времени срабатывания – по (3.32).

Чувствительный пусковой орган максимального тока I_0> введен в схему адмитансной защиты для отстройки от влияния на точность замера при малых значениях выходных сигналов корреляторов *Kor.1* и *Kor.2* различного рода помех и шумов. Для того, чтобы пусковой орган I_0> не ограничивал чувствительность адмитансной защиты при УОЗЗ через большое переходное сопротивление, уставку по току срабатывания $I_{0\,уст}$ целесообразно принимать равной минимально возможной уставке по техническим возможностям терминала. Как правило, минимальное значение уставки защит от ОЗЗ в микропроцессорных терминалах РЗА линий 6–35 кВ равно (0,01–0,02)$I_{з.ном}$, где $I_{з.ном}$ – номинальный ток входа для защиты от ОЗЗ.

В схеме защиты по рис. 4.11 скорректирован алгоритм функционирования направленной и ненаправленной адмитансной защиты. Недостатком рассмотренного в разделе 4.3 алгоритма, основанного на определении знака (в направленной защите) или модуля (в ненаправленной максимальной защите) воздействующей величины $C_0(t)$ на основе соотношений (4.17) и (4.18), являются очень малые значения последней, что может быть причиной дополнительных погрешностей замера защиты. Учитывая это, целесообразно предварительно нормировать сравниваемые величины следующим образом:

$$C_{0\,неп*}(t)=\frac{C_{0\,неп}(t)}{K_{отс}3C_{0\,собс}}=\frac{\int_0^{T_н}3i_{0\,неп}(t)\cdot u_0'(t)}{K_{отс}3C_{0\,собс}\int_0^{T_н}u_0'(t)\cdot u_0'(t)}\approx\frac{1}{K_{отс}}<1; \qquad (4.22)$$

$$C_{0\,пов*}(t)=\frac{C_{0\,пов}(t)}{K_{отс}3C_{0\,собс}}=\frac{\int_0^{T_н}3i_{0\,пов}(t)\cdot u_0'(t)}{K_{отс}3C_{0\,собс}\int_0^{T_н}u_0'(t)\cdot u_0'(t)}\approx$$
$$\approx-\frac{3(C_{0\Sigma}-C_{0\,собс})}{K_{отс}3C_{0\,собс}}=-\frac{1-C_{0\,собс*}}{K_{отс}C_{0\,собс*}}=-\frac{1-I_{с\,собс*}}{K_{отс}I_{с\,собс*}}, \qquad (4.23)$$

где $I_{с\,собс*}=I_{с\,собс}/I_{с\Sigma}$ – относительное значение собственного емкостного тока защищаемого присоединения.

Из (4.22) можно видеть, что на неповрежденных присоединениях нормированное значения замера защиты всегда положительно и по модулю меньше 1 ($1/K_{отс}$ = 1/1,5 ≈ 0,67). Нормированный замер защиты на поврежденном присоединении всегда отрицателен, а его абсолютное значение определяется только относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{с\,собс*}$ и коэффициентом отстройки $K_{отс}$.

4.4.3 **Испытания модели макетного образца универсальной мультичастотной адмитансной защиты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали.** Оценка эффективности функционирования универсальной мультичастотной адмитансной защиты проводилась на моделях кабельных сетей напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью ($I_{с\Sigma}$ = 5 А и $I_{с\Sigma}$ = 30 А), заземлением нейтрали через высокоомный резистор ($I_{с\Sigma}$ = 5 А) и заземлением нейтрали через ДГР (и $I_{с\Sigma}$ = 30 А).

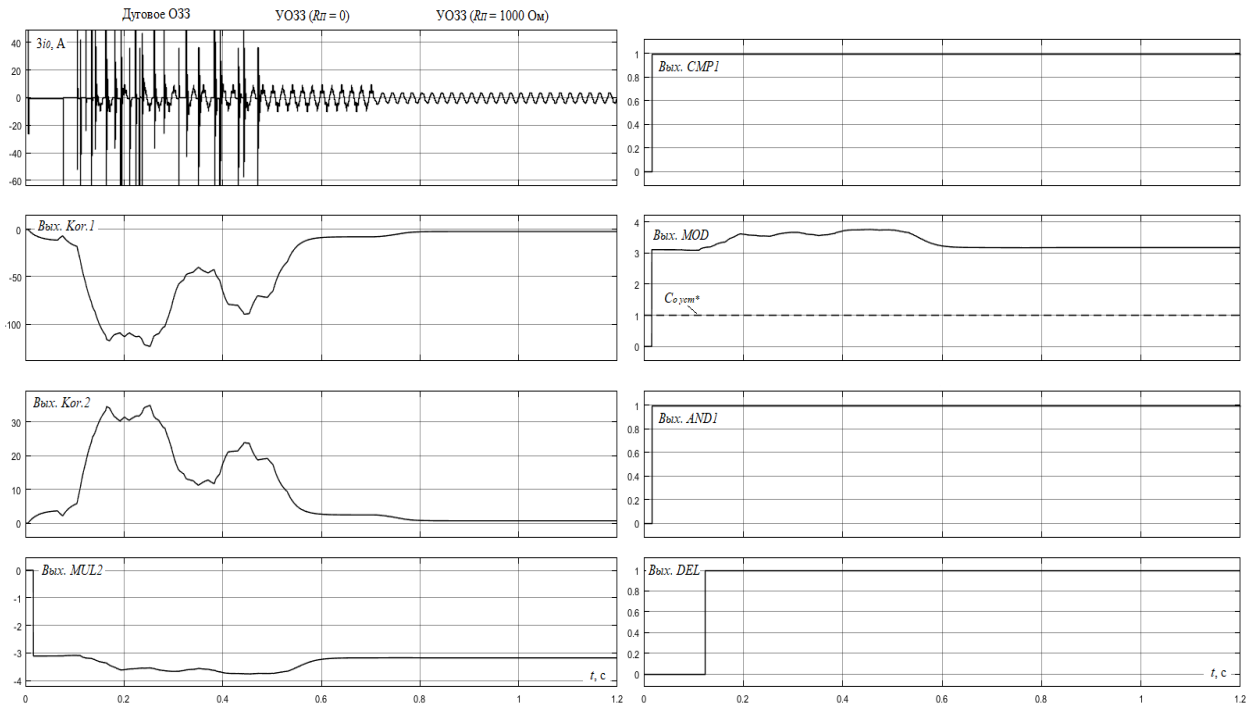
Имитировались внутренние и внешние дуговые ОЗЗ с различными условиями гашения и повторного зажигания заземляющей дуги (в соответствии с теориями W. Petersen и I.E. Peters и J. Slepian [13, 14]) и различными интервалами между повторными пробоями изоляции Δt = 10–200 мс, переходящие в металлические УОЗЗ ($R_П$ = 0) или УОЗЗ через переходное сопротивление ($R_П$ > 0). Собственный емкостный ток защищаемого присоединения во всех вычислительных экспериментах принимался равным $I_{с\,собс*}$ = 0,25. Основной целью исследований на имитационных моделях яв-

лялась проверка селективности, динамической и статической устойчивости функционирования направленной и ненаправленной мультичастотной адмитансной защиты в различных условиях функционирования.

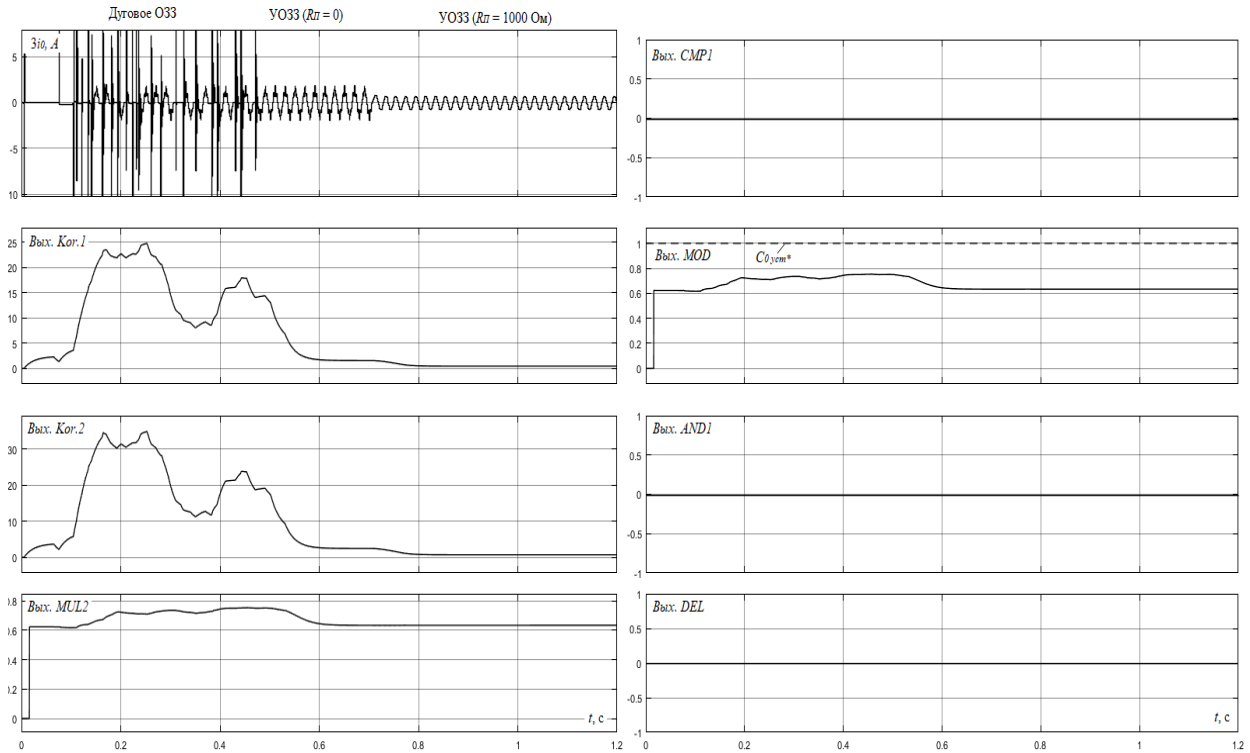
Исследования на имитационных моделях подтвердили работоспособность алмитансной защиты во всех исследованных режимах функционирования. На рис. 4.12 в качестве примера приведены полученные на имитационной модели кабельной сети напряжением 6 кВ с изолированной нейтралью с $I_{c\Sigma}$ = 5 А осциллограммы, иллюстрирующие функционирование направленной и ненаправленной адмитансной защиты при сложном дуговом ОЗЗ, переходящем сначала в металлическое УОЗЗ ($R_П$ = 0), а затем в УОЗЗ через большое переходное сопротивление ($R_П$ = 1000 Ом). На поврежденном присоединении защита устойчиво срабатывает как в переходных режимах дуговой стадии ОЗЗ, так и в установившихся режимах замыкания, на неповрежденном присоединении – не срабатывает.

На рис. 4.13 приведены аналогичные осциллограммы, полученные на модели кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 5 А, работающей с высокоомным заземлением нейтрали, на рис. 4.14 – в кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 30 А с заземлением нейтрали через ДГР, работающей с перекомпенсацией 20%. Из осциллограмм можно видеть, что на поврежденном присоединении защита устойчиво срабатывает как в дуговой стадии ОЗЗ, так и в режимах УОЗЗ, на неповрежденном присоединении – устойчиво не срабатывает.

Осциллограммы на рис. 4.15 иллюстрируют функционирование адмитансной защиты в компенсированной кабельной сети 6 кВ при однократном пробое изоляции в зоне действия защиты (внутреннем КрОЗЗ), возникшем в момент прохождения напряжения поврежденной фазы через максимум ($\varphi_{пр}$ = 90^0). Отметим, что изменение начальной фазы пробоя изоляции $\varphi_{пр}$ практически не влияет на чувствительность адмитансной защиты при КрОЗЗ.



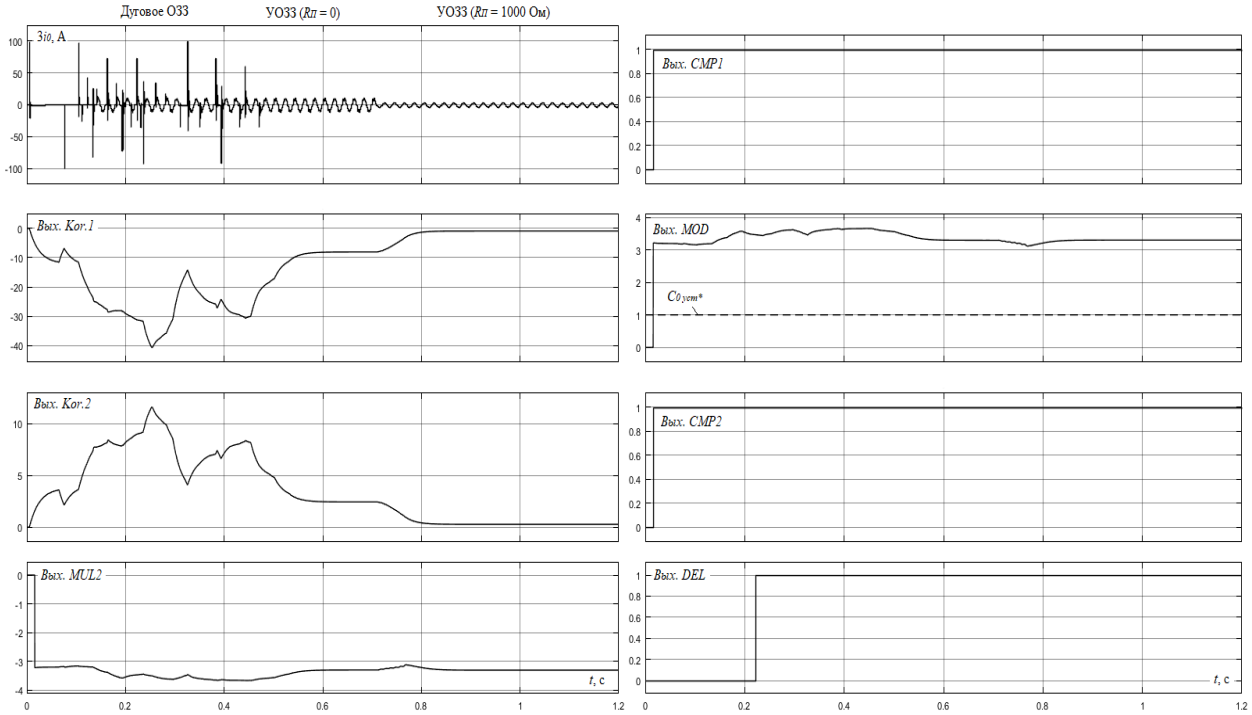
а)



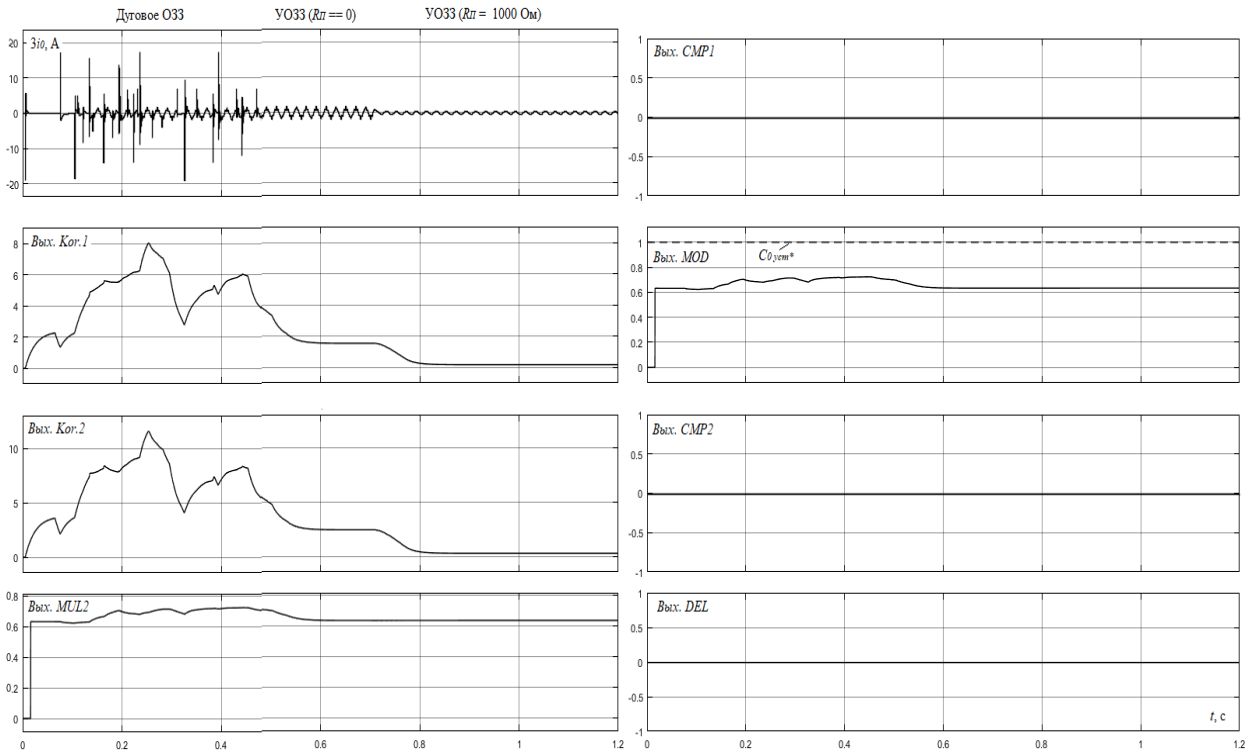
б)

Рисунок 4.12 – Осциллограммы работы мультичастотной адмитансной защиты при ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 5 А, работающей с изолированной нейтралью (переключатели *SX1* и *SX2* на схеме рис. 4.11 в положении «Изол»):

а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ

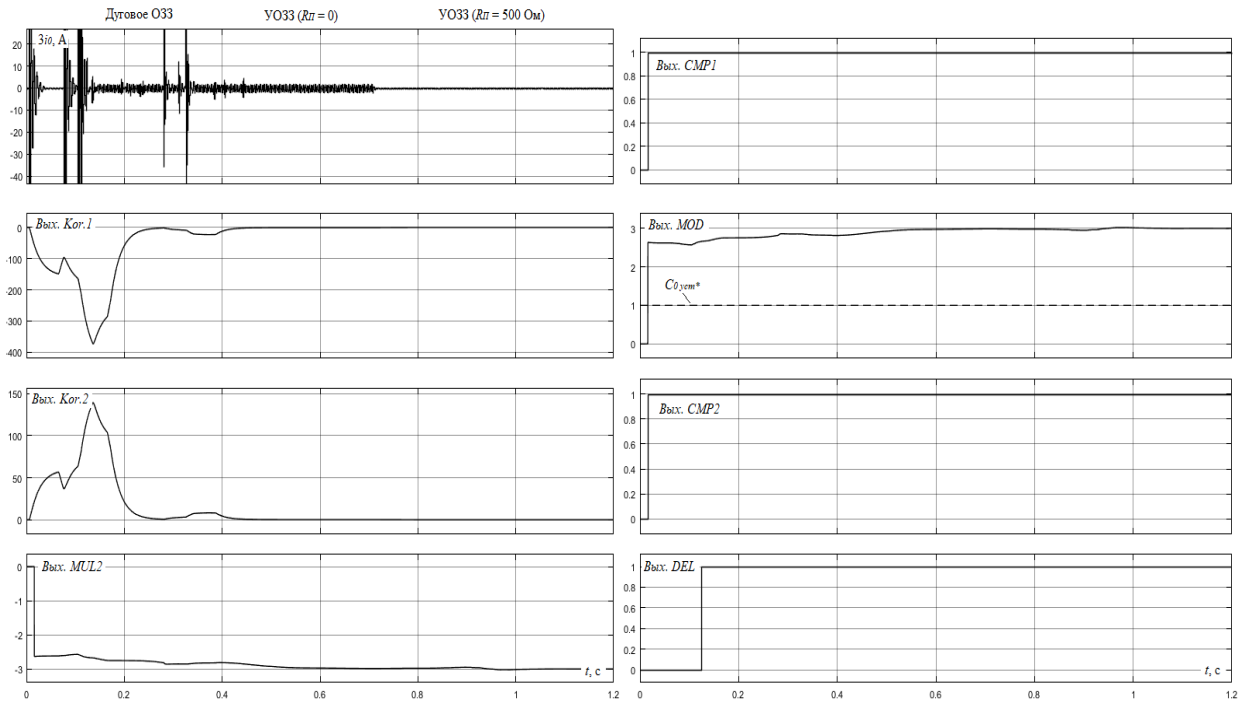


а)

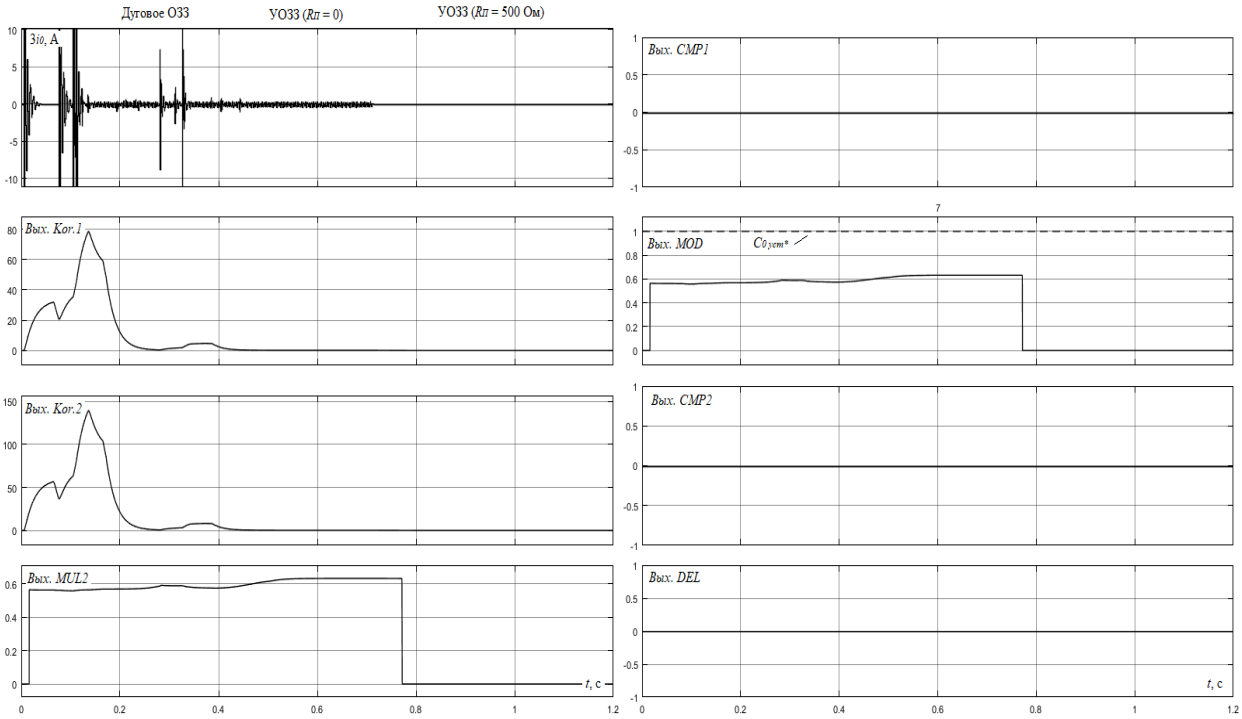


б)

Рисунок 4.13 – Осциллограммы работы мультичастотной адмитансной защиты при ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 5 А, работающей с заземлением нейтрали через высокоомный резистор (переключатели *SX1* и *SX2* на схеме рис. 4.11 в положении «Изол»): а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ



а)



б)

Рисунок 4.14 – Осциллограммы работы мультичастотной адмитансной защиты при ОЗЗ в кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 30 А, работающей с заземлением нейтрали через ДГР (переключатели *SX1* и *SX2* на схеме рис. 4.11 в положении «Комп») в режиме недокомпенсации 20%: а – внутреннее ОЗЗ; б – внешнее ОЗЗ

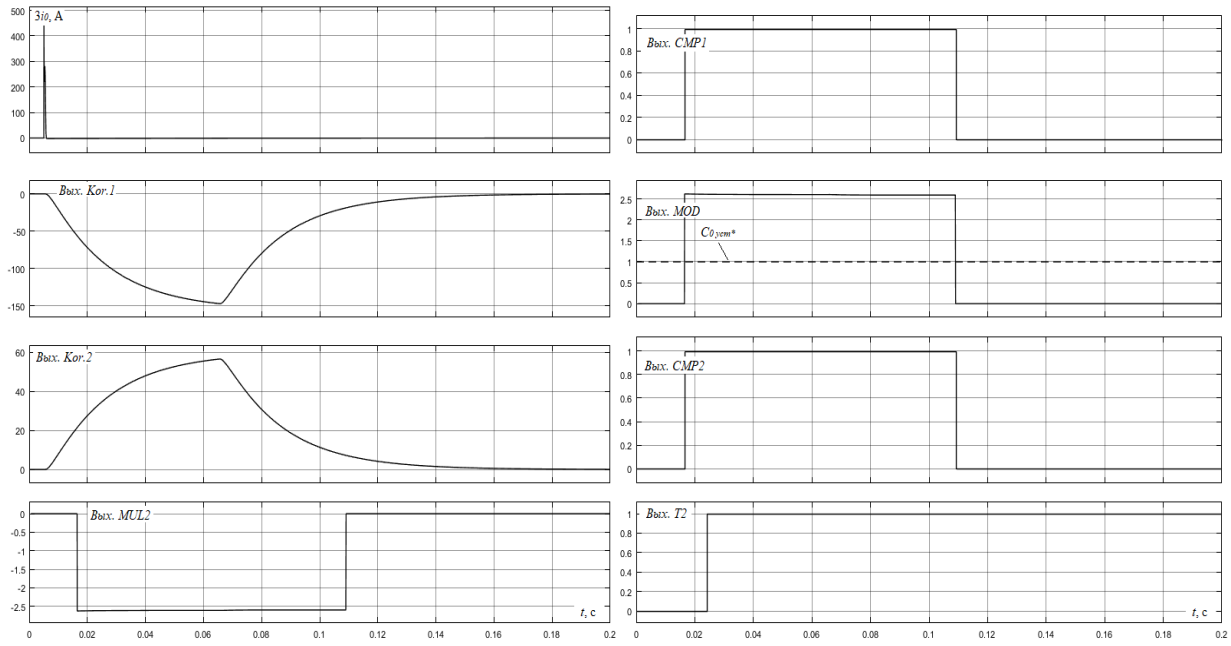


Рисунок 4.15 – Осциллограммы работы мультичастотной адмитансной защиты при однократном пробое изоляции на защищаемой линии (внутреннее КрОЗЗ) в компенсированной кабельной сети 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 30 А

Указанное свойство адмитансной защиты на основе предлагаемого способа обусловлено тем, что значение воздействующей величины, формируемой на выходе блока *MUL2*, в момент пробоя изоляции возрастает скачкообразно и практически не изменяется во времени. Анализ на имитационных моделях показал, что рассматриваемая мультичастотная адмитансная защита обеспечивает возможность фиксации КрОЗЗ даже при $\varphi_{пр} \to 0$. В адаптивной токовой защите значение воздействующей величины – среднеквадратичного значения контролируемого тока – увеличивается во времени постепенно, поэтому при пробоях с $\varphi_{пр} < 90^0$ чувствительность защиты данного типа значительно уменьшается.

Анализ результатов вычислительных экспериментов, выполненных на имитационных моделях кабельных сетей 6 кВ с различными режимами заземления нейтрали, позволяет сделать следующие основные выводы:

1) разработанные принципы выполнения универсальной мультичастотной адмитансной защиты при цифровой реализации с частотой дискретиза-

ции АЦП обеспечивают селективность и устойчивость функционирования при всех разновидностях ОЗЗ, включая КрОЗЗ;

2) значение коэффициента отстройки $K_{отс}$ = 1,5, используемое при выборе уставки срабатывания мультичастотной адмитансной по воздействующей величине $C_{0\,уст}$, обеспечивает требуемую отстроенность при всех разновидностях внешних ОЗЗ с учетом дополнительных погрешностей, вносимых ограниченной частотой дискретизации АЦП, первичными и вторичными преобразователями тока и напряжения нулевой последовательности.

Таким образом, исследования на имитационных моделях подтвердили возможность получения на основе предложенных принципов выполнения мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты универсального технического решения, обеспечивающего селективность и устойчивость функционирования при всех разновидностях ОЗЗ как в некомпенсированных, так и в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

4.5 Сравнительная оценка универсальных решений на основе мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит

4.5.1 **По области возможного применения на объектах распределительных кабельных сетей 6–10 кВ.** Адаптивная токовая и адмитансная защиты от ОЗЗ представляют собой защиты с двумя подведенными величинами – током и напряжением нулевой последовательности. Поэтому указанные защиты могут применяться только на объектах, оснащенных не только ТТНП, но и первичными преобразователями напряжения нулевой последовательности. К таким объектам в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ относятся ЦП и РП (РТП).

Область возможного применения мультичастотной адаптивной ТЗНП, как в сетях с изолированной нейтралью, так и в компенсированных сетях, определяется соотношением (3.19), т.е. относительным значением собствен-

ного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{c\,собс*}$ и значениями коэффициентов отстройки $K_{отс}$ и чувствительности $K_{ч.мин}$, учитывающих погрешности функционирования, которые могут привести к излишним срабатываниям при внешних и отказам срабатывания при внутренних замыканиях на землю. Область возможного применения мультичастотной ненаправленной адмитансной защиты определяется, соотношением (4.10), аналогичном (3.19). Поэтому при одинаковых значениях коэффициентов $K_{отс}$ = 1,5 и $K_{ч.мин}$ = 1,5 область возможного применения, как адаптивной ТЗНП, так и адмитансной защиты на основе предложенных принципов ограничивается присоединениями ЦП и РП, для которых относительное значение собственного емкостного тока не превышает значений:

$$I_{c\,собс*} \le \frac{1}{1+K_{отс}K_{ч.мин}} = \frac{1}{1+1{,}5\cdot 1{,}5} \approx 0{,}3.$$

В главе 3 (раздел 3.5) показано, что ненаправленные защиты, область применения которых ограничена условием $I_{c\,собс*} < 0{,}3$, обеспечивают практически 100%-ю защитоспособность присоединений на объектах типа РП (РТП) и защитоспособность 90 и более процентов присоединений на центрах питания кабельных сетей 6–10 кВ. Таким образом, разработанные ненаправленные адаптивная и адмитансная защиты, хотя и значительно увеличивают защитоспособность по сравнению с традиционными исполнениями токовых защит от ОЗЗ (ТЗНП, ТЗНПВГ), но не позволяют полностью решить проблему селективной защиты от данного вида повреждений на ЦП кабельных сетей 6–10 кВ.

На присоединениях, на которых ненаправленные защиты не обеспечивают селективность и чувствительность, как известно, должны применяться направленные защиты от ОЗЗ. Простоту технической реализации как ненаправленной, так и направленной защиты от ОЗЗ обеспечивает применение универсальной мультичастотной адмитансной защиты.

4.5.2 **По устойчивости функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.** По принципу действия адаптивной токовой защиты при изменении условий функционирования и, соответственно, значения воздействующей величины – среднеквадратичного значения контролируемого

тока $3I_0(t)$, например, при замыканиях через перемежающуюся дугу, автоматически должно меняться также и значение уставки по току срабатывания $I_{0\,уст}(t)$ (см., например, осциллограммы величин $3I_0(t)$ и $I_{0\,уст}(t)$ на рис. 3.13–3.16). Это означает, что при определении минимально допустимых запасов устойчивости, задаваемых в значениях коэффициентов отстройки $K_{отс}$ и чувствительности $K_{ч.мин}$, в общем случае должны учитываться не только погрешности измерения воздействующей величины, но и формирования текущего значения уставки по току срабатывания.

В адмитансной мультичастотной ненаправленной защите, основанной на непосредственном измерении емкости нулевой последовательности, уставка определяется только собственной емкостью фаз на землю $3C_{0\,собс}$ защищаемого присоединения и является постоянной величиной (см., например, осциллограммы на рис. 4.12–4.15). Поэтому в адмитансной защите погрешности формирования уставки срабатывания по воздействующей величине могут не учитываться, что при одинаковых требованиях к отстроенности от внешних и чувствительности при внутренних ОЗЗ (т.е. одинаковых $K_{отс}$ и $K_{ч.мин}$) обеспечивает большие запасы устойчивости ее функционирования.

4.5.3 **По эффективности фиксации «мгновенных» замыканий на землю.** Воздействующей величиной для адаптивной ТЗНП является среднеквадратичное значение контролируемого тока, усредняемое на заданном интервале времени наблюдения $T_н$ за процессом при ОЗЗ. Как было показано выше, для обеспечения непрерывности замера при замыканиях через перемежающуюся дугу и устойчивой фиксации опасных для сети ДПОЗЗ значение $T_н$ в кабельных сетях 6–10 кВ целесообразно принимать порядка ~60 мс. При таком значении $T_н$ среднеквадратичное значение тока при ДПОЗЗ, протекающих в соответствии с теорией W. Petersen [13] достигает максимального значения через 4–5 повторных пробоев изоляции, следующих с интервалами времени Δt = 10 мс, при ДПОЗЗ по теории I.E. Peters, J. Slepian [14] – через 2–3 повторных пробоя, следующих с интервалами вре-

мени Δt = 20 мс. При первом пробое изоляции среднеквадратичное значение на выходе блоков *RMS* (рис. 3.12) будет в несколько раз меньше, чем на квазистационарной стадии ДПОЗЗ, что приводит к уменьшению чувствительности адаптивной ТЗНП при однократных пробоях изоляции. Для увеличения этой чувствительности, как было показано выше (см. п. 3.4.3), необходимо уменьшить время усреднения при вычислении среднеквадратичного значения переходного до ~10 мс, что связано с необходимостью введения дополнительных блоков в схему защиты и ее усложнением.

В адмитансной мультичастотной защите подобных проблем не возникает, т.к. замер защиты – значение воздействующей величины, формируемой на выходе блока *MUL2* (рис. 4.11), в момент пробоя изоляции возрастает скачкообразно и практически не изменяется во времени.

4.5.4 **По чувствительности к УОЗЗ через большое переходное сопротивление.** Как уже отмечалось выше, в момент пробоя изоляции переходное сопротивление в месте повреждения в кабельных сетях 6–10 кВ определяется незначительным сопротивлением электрической дуги, характеризуемой напряжением на дуге $u_д$ = 50–100 В [15] и динамическим сопротивлением $r_д$, имеющим величину порядка тысячных долей Ом [135]. При таких значениях $u_д$ и $r_д$ электрическая дуга в месте ОЗЗ практически не оказывает влияния на параметры электрических величин переходного процесса при ОЗЗ. Однако в установившемся режиме ОЗЗ величина переходного сопротивления в месте повреждения может достигать больших значений, измеряемых сотнями и даже тысячами Ом. Так по данным [138] в кабельных сетях 6–10 кВ в установившемся режиме ОЗЗ $R_П$ может достигать значений порядка (2–2,5)$X_{c\Sigma}$ = (2–2,5)$U_{ф.ном}$ / $X_{c\Sigma}$. Поэтому высокая чувствительность защиты от ОЗЗ кабельных сетей среднего напряжения к устойчивым замыканиям через достаточно большое переходное сопротивление является важным показателем ее технического совершенства.

Собственно, традиционные адаптивные токовые защиты имели своей главной целью именно повышение чувствительности при УОЗЗ через переходное сопротивление [49 50]. В то же время, в [52 и др.] отмечается, что основным преимуществом адмитансных защит по сравнению с традиционными ТЗНП и ТНЗНП является их более высокая чувствительность к УОЗЗ через большое переходное сопротивление. Указанное свойство адмитансных защит обусловлено тем, что отношение тока $3i_0$ к напряжению $3u_0$ в поврежденном и неповрежденном присоединениях, как можно видеть из комплексной схемы замещения по методу симметричных составляющих кабельной сети 6–10 кВ в режиме ОЗЗ (рис. 2.1) и соотношений (4.2) и (4.3), не зависит от переходного сопротивления в месте повреждения. Преимущества адмитансной защиты в части чувствительности к УОЗЗ через переходное сопротивление по сравнению с адаптивной ТЗНП подтверждается также расчетами на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ. В табл. 4.1 в качестве примера приведены результаты оценок предельных значений переходного сопротивления $R_П$ в месте УОЗЗ, при которых обеспечивается срабатывания мультичастотной адаптивной ТЗНП и мультичастотной адмитансной защиты, выполненных соответственно по схемам рис. 3.12 и рис. 4.11.

Из данных табл. 4.1 можно видеть, что при одинаковых условиях функционирования в кабельной сети с изолированной нейтралью чувствительность мультичастотной адмитансной защиты к УОЗЗ через переходное сопротивление примерно в 3,2 раза выше, чем мультичастотной адаптивной ТЗНП, в компенсированной кабельной сети – примерно в 4 раза выше. Исключение составляют кабельные сети с высокоомным заземлением нейтрали, в которой чувствительность адаптивной и адмитансной защит ограничивается чувствительность пускового органа по напряжению нулевой последовательности и при одинаковой уставке последнего $U_{0\,уст}$ примерно одинакова.

Таблица 4.1 – Оценка чувствительности мультичастотной адаптивной ТЗНП и мультичастотной адмитансной защиты к УОЗЗ через переходное сопротивление в кабельных сетях 6 кВ с различными режимами заземления нейтрали

Параметры и режим заземления нейтрали сети	Предельное значение $R_П$, при котором обеспечивается срабатывание защиты, Ом	
	Мультичастотная адаптивная ТЗНП (рис. 3.12)	Мультичастотная адмитансная защита (рис. 4.11)
Кабельная сеть 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 5 А с изолированной нейтралью, $I_{c\ собс}$ = 0,25$I_{c\Sigma}$	~4300	~13900
Кабельная сеть 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 5 А с заземлением нейтрали через высококомный резистор, $I_{c\ собс}$ = 0,25$I_{c\Sigma}$	~2800	~2800
Кабельная сеть 6 кВ с $I_{c\Sigma}$ = 30 А с заземлением нейтрали через ДГР, $I_{c\ собс}$ = 0,25$I_{c\Sigma}$	~150	~600

4.5.5 **Общая оценка универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ.** Приведенные в пп. 4.5.1–4.5.4 оценки основных свойств двух вариантов выполнения универсальной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ позволяют сделать вывод, что мультичастотная адмитансная защита, основанная на контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивает большее техническое совершенство по сравнению с мультичастотной адаптивной ТЗНП.

4.6 Разработка технического задания на экспериментальный образец мультичастотной токовой и адмитансной защит от замыканий на землю и перспективы их внедрения в кабельных сетях 6–10 кВ

4.6.1 **Основные разделы технического задания на экспериментальный образец мультичастотной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ.** В рамках работ по теме “Разработка комплекса научно-технических решений

по автоматической локации однофазных замыканий на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ”, выполняемых ИГЭУ по федеральной целевой программе “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы” (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57716X0215) Индустриальным партнером – ООО НПП «ЭКРА» должны быть разработаны эскизная конструкторская и технологическая документацию на экспериментальный образец комплексного устройства автоматической локации ОЗЗ, реализующего типовые, модифицированные и вновь созданные функции защиты от ОЗЗ для кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, программное обеспечение к нему, изготовлен экспериментальный образец, разработаны программа и методика испытаний экспериментального образца, а также совместно с ИГЭУ проведены лабораторные испытания экспериментального образца на соответствие требованиям технического задания, исследовательские испытания с применением установки физико-математического моделирования и банка тестовых сигналов в COMTRADE-формате, моделирующего комплекса реального времени RTDS и физической модели трехфазной кабельной сети. По результатам испытаний должен быть определены наиболее эффективный состав функций защиты от ОЗЗ и произведена их доработка в составе экспериментального образца.

Для выполнения указанных работ в диссертации разработано техническое задание (ТЗ) на экспериментальный образец комплексной защиты от ОЗЗ, включающее следующие разделы:

1 Назначение и область применения функций защиты от ОЗЗ.

2 Конструктивное выполнение микропроцессорного терминала комплексной защиты от ОЗЗ и требования по условиям работы.

3 Основные параметры терминала.

4 Состав функций защиты от ОЗЗ, реализуемых терминале.

5 Функционально-структурные схемы и описание принципа действия функций защиты от ОЗЗ.

6 Характеристики функций защиты от ОЗЗ.

7 Общие требования к измерительным органам функций защиты от ОЗЗ.

8 Требования к интерфейсу «человек – машина».

9 Требования к интерфейсу связи.

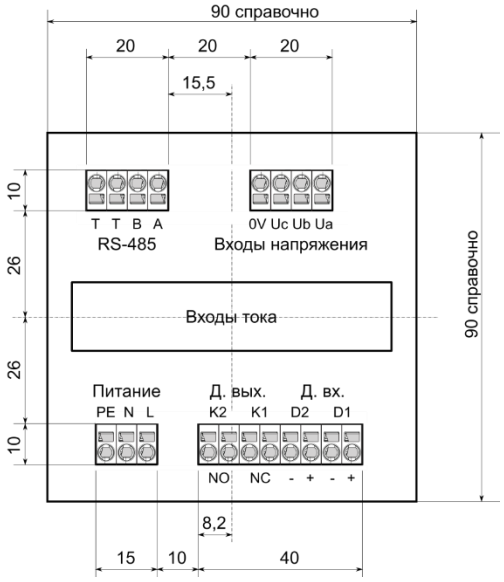
4.6.2 **Требования к экспериментальному образцу по составу функций защиты от ОЗЗ.** Кроме типовых функций защиты от ОЗЗ для электрических сетей среднего напряжения – ненаправленной и направленной токовых защит нулевой последовательности на основе составляющих основной частоты (ТЗНП и ТНЗНП) для кабельных сетей с изолированной нейтралью и высокоомным заземлением нейтрали, ненаправленной токовой защиты абсолютного замера ВГ в токе нулевой последовательности (ТЗНПВГ) и максимальной защиты напряжения нулевой последовательности, в экспериментальном образце в соответствии с требованиями ТЗ должны быть реализованы разработанные в рамках работ по указанной в п. 4.6.1 теме, в том числе, и в рамках настоящей диссертационной работы:

1) многопараметрические токовые защиты от ОЗЗ, основанные на использовании составляющей основной частоты и высших гармоник тока нулевой последовательности [24, 25];

2) универсальная ненаправленная мультичастотная адаптивная токовая защита от ОЗЗ (раздел 3.4);

3) универсальная направленная и ненаправленная мультичастотная адмитансная защита от ОЗЗ (раздел 4.4).

4.6.3 **Конструктивное выполнение экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ.** Внешний вид и вид задней панели микропроцессорного терминала (условно называемого МиР), на базе которого реализуется экспериментальный образец комплексной защиты от ОЗЗ, показан на рис. 4.16.



а) **б)**

Рисунок 4.16 – Внешний вид (а) и эскиз задней панели (б) экспериментального образца комплексного устройства защиты от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ

4.6.4 **Перспективы внедрения универсальных мультичастотных адаптивной токовой и адмитансной защит от ОЗЗ.** Приведенные в разделе 4.5 оценки отдельных свойств указанных принципов выполнения защит от ОЗЗ с двумя подведенными величинами и общая их оценка позволяют сделать вывод, что мультичастотная адмитансная защита позволяет получить более общее и более эффективное техническое решение в части защиты от ОЗЗ в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали, чем мультичастотная адаптивная токовая защита. Однако окончательное заключение об эффективности разработанных в диссертации технических решений может быть дано только на основании результатов лабораторных и исследовательских испытаний экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ, разрабатываемого в настоящее время НПП «ЭКРА». Так как в составе одного терминала нецелесообразно иметь несколько функции защиты от ОЗЗ с близкими показателями защитоспособности и эффективности функционирования, в терминале типа МиР планируется применить только одно из разработанных универсальных технических решений.

4.7 Выводы по главе 4

4.7.1 Разработаны принципы выполнения ненаправленной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанной на непосредственном контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения с использованием соотношений для суммы мгновенных значений составляющих основной частоты и высших гармоник в диапазоне частот до ~2 кГц тока и производной напряжения нулевой последовательности, что позволяет обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования при внешних и внутренних замыканиях через перемежающуюся дугу.

4.7.2 Разработаны принципы выполнения ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с заземлением нейтрали через ДГР, основанной на контроле емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения с использованием соотношений для суммы мгновенных значений высших гармонических составляющих в диапазоне частот до ~2 кГц тока и производной напряжения нулевой последовательности, что позволяет обеспечить не только высокую чувствительность при УОЗЗ, но и высокую динамическую устойчивость функционирования при дуговых перемежающихся замыканиях.

4.7.3 Разработаны принципы выполнения мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ, основанной на контроле знака и величины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

4.7.4 На основе технических решений по п. 4.7.3 разработана структурно-функциональная схема макетного образца универсальной мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

4.7.5 Результаты исследований на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали подтверждают высокую эффективность функционирования универсальной мультичастотной адмитансной защиты при всех разновидностях ОЗЗ, включая металлические УОЗЗ, УОЗЗ через большое переходное сопротивление, дуговые ОЗЗ и КрОЗЗ.

4.7.6 Разработано техническое задание для НПП «ЭКРА» на экспериментальный образец комплексной защиты от ОЗЗ, включающей, кроме традиционных функций защиты от ОЗЗ, также функции универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты и универсальной мультичасотной адмитансной защиты от ОЗЗ.

4.7.7 По результатам лабораторных и исследовательских испытаний экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ, выполняемого НПП «ЭКРА» на базе терминала типа МиР, будет принято решение о внедрении в составе функций РЗА серийного терминала защиты и автоматики линий 6–35 кВ разработанных в диссертации технических решений.

Результаты исследований, изложенных в главе 4, опубликованы в работах [75, 77].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработаны способы повышения точности моделирования переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ при исследованиях динамических режимов функционирования защит от данного вида повреждений, включающие модификацию аналитического решения уравнений переходных процессов при замыканиях на землю на основе двухчастотной схемы замещения, методику эквивалентирования имитационных моделей кабельных сетей 6–10 кВ без существенной потери точности расчетов мгновенных и среднеквадратичных значений переходных токов и напряжений, методику приближенного учета зависимости индуктивностей трехжильных кабелей от частоты токов переходного процесса. Достоверность предложенных способов повышения точности расчетов переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с использованием аналитических и имитационных математических моделей проверена сравнением с теоретическими и экспериментальными результатами, полученными другими авторами.

2 На основе сравнительного анализа с использованием сформулированных критериев для оценки общей эффективности защит от ОЗЗ кабельных сетей 6–10 кВ показано, что известные способы выполнения адаптивных токовых защит от ОЗЗ обеспечивают адаптивность только к влиянию на чувствительность больших переходных сопротивлений в месте повреждения, но не позволяют обеспечить высокую динамическую устойчивость функционирования в переходных режимах при дуговых ОЗЗ и могут применяться только в сетях с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали.

3 Предложен способ модификации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в кабельных сетях с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанный на использовании соотношений мгновенных значений для составляющих основной частоты тока и производной напряжения нулевой последовательности и позволяющий обеспечить не только высокую чув-

ствительность к повреждениям через большое переходное сопротивление, но и значительное повышение динамической устойчивости функциониро-вания при замыканиях через перемежающуюся дугу.

4 Разработаны принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты нулевой последовательности от ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали, основанной на использовании составляющей основной частоты и высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц, обеспечивающие адаптацию защиты как к влиянию переходного сопротивления в месте повреждения, так и к влиянию переходных процессов при дуговых перемежающихся замыканиях.

5 Разработаны принципы выполнения мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанные на использовании соотношений мгновенных значений высокочастотных составляющих тока и производной напряжения нулевой последовательности в диапазоне частот до ~2 кГц, обеспечивающие высокую устойчивость функционирования при дуговых перемежающихся ОЗЗ, возможных при больших расстройках компенсации.

6 На основе технических решений по пп. 4 и 5 разработана функционально-структурная схема универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для выполнения на ее основе макетного и экспериментального образцов защиты и проведения их испытаний на НПП «ЭКРА». Результаты исследований макета защиты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали подтвердили эффективность ее функционирования при всех разновидностях замыканий и режимах заземления нейтрали защищаемой сети.

7 Разработаны принципы выполнения ненаправленной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ, основанной на непосредственном контроле вели-

чины емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, обеспечивающие высокую динамическую устойчивость функционирования при замыканиях через перемежающуюся дугу.

8 Разработаны принципы выполнения мультичастотной направленной и ненаправленной адмитансной защиты от ОЗЗ, основанной на контроле знака (направленная защита) и величины (ненаправленная защита) емкости нулевой последовательности защищаемого присоединения, в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ.

9 На основе технических решений по п. 8 разработана структурно-функциональная схема универсальной мультичастотной адмитансной защиты от ОЗЗ в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6–10 кВ для выполнения на ее основе макетного и экспериментального образцов защиты и проведения их испытаний на НПП «ЭКРА». Результаты исследований макета защиты на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали подтвердили эффективность ее функционирования.

10 Разработано техническое задание для выполнения НПП «ЭКРА» на базе микропроцессорного терминала МиР экспериментального образца комплексной защиты от ОЗЗ, включающей, кроме традиционных функций защиты от ОЗЗ, также функции универсальной мультичастотной адаптивной токовой защиты и универсальной мультичастотной адмитансной защиты от замыканий на землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

2 Лебедев Г.М. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6–10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 / Лебедев, Геннадий Михайлович. – Москва, МЭИ (Технический университет), 2007. – 410 с.

3 Крутов А. Класс средних и низких напряжений вообще забыт / А. Крутов // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2002. – № 1(13). – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2002/13/04.php.

4 Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002 № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

5 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 19.06.2003 № 229]. – М.: Энергосервис, 2003.

6 Беляков Н.Н. Анализ повреждений от замыканий на землю в кабельных сетях / Н.Н. Беляков // Электрические станции. – 1952. – № 6. – С. 40 – 43.

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

8 Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 2001. – 272 с.

9 Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – 416 с.

10 Обердорфер, Г. Замыкания на землю и борьба с ними / Г. Обердорфер. – М: Энергоиздат. – 1932. – 203 с.

11 Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах /Л.И. Сиротинский. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – 268 с.

12 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.

13 Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss / W. Petersen. – ETZ. – 1917. - H. 37, 38.

14 Peters I.E. Voltage Induced by Arcing Ground / I.E. Peters, J. Slepian. – Tr. AIEE. – 1923. – P. 478.

15 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.

16 Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей / А.М. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

17 Федосеев, А.М. Релейная защита электрических систем / А.М. Федосеев. – М.: Энергия, 1976. – 560 с.

18 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.

19 Шабад, М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ: конспект лекций / М.А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2002. – 51 с.

20 Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В.А. Андреев. – М.: Высшая школа, 2006. – 639 с.

21 Корогодский, В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.

22 Гельфанд, Я.С. Релейная защита распределительных сетей / Я.С. Гельфанд. – М.: Энергоатомиздат, 1987. - 368 с.

23 Шадрикова, Т.Ю. Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шадрикова Татьяна Юрьевна. – Иваново, ИГЭУ, 2016. – 204 с.

24 V. A. Shuin, A. N. Golubev, O. A. Dobryagina, T. Yu. Shadrikova. Multiparameter current protections against ground faults in 6 – 10 kV cable networks /Power Technology and Engineering, Vol. 51, No. 5, January, 2018, PP. 602–610.

25 Шуин, В.А. Многопараметрические токовые от замыканий на землю распределительных кабельных сетей 6–10 кВ /В.А. Шуин, А.Н. Голубев, О.А. Добрягина, Е.С. Шагурина // Электрические станции, 2017, № 7. – С. 43–52.

26 Лачугин, В.Ф. Релейная защита объектов электроэнергетических систем, основанная на использовании волновых методов: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Лачугин Владимир Фёдорович. – Иваново, ИГЭУ, 2016. – 437 с.

27 Белянин, А.А. Исследование и разработка средств локации замыканий на землю фидера распределительной сети: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Белянин Андрей Александрович. – Чебоксары, ЧГУ, 2015. – 110 с.

28 Шуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Шуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин. – М.: Энергоатомиздат. – 1988. ─ 152 с.

29 Добрягина, О.А. Исследование и разработка методов и средств повышения динамической устойчивости функционирования токовых защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Добрягина Ольга Александровна. – Иваново, ИГЭУ, 2012. – 179 с.

30 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.

31 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.

32 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.

33 Кискачи, В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник токов нулевой последовательности / В.М. Кискачи // Электричество. – 1967. – № 9. – С. 24 – 30.

34 Шуин, В.А. Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6–10 кВ / В.А. Шуин, В.А. Мартынов, Е.С. Шагурина, Т.Ю. Шадрикова // Электротехника, 2018, № 1. – С. 62–72.

35 Сирота, И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов. – Киев: Наукова Думка. – 1985. – 264 с.

36 Вайнштейн, Р.А. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головко, В.С. Григорьев [и др.] // Электрические станции. – 1998, № 7. – С. 26–30.

37 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.

38 Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Характеристики, особенности применения /А.И. Шалин // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 6 (36).

39 Шалин, А.И. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты А.И. Шалин // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1 (37).

40 Кискачи В.М. Защита от однофазных замыканий на землю ЗЗП-1 (описание, наладка, эксплуатация). – М.: Энергия. – 1972. – 73 с.

41 Реле защиты /В.С. Алексеев, Г.П. Варганов, Б.И. Панфилов, Р.З. Розенблюм. М.: Энергия. – 1976. – 464 с.

42 Кискачи В.В. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6-10 кВ с различным режимом заземления нейтрали типа ЗЗН. – М.: ИУЭГУУ, ВИПКэнерго, ИПКгосслужбы, 2001. – 63 с.

43 Авторское свидетельство СССР 299908, МПК Н02Н3/16. Способ направленной защиты от однофазных замыканий на землю // Кискачи В.М. – Опубл. 27.05.1971.

44 Авторское свидетельство СССР 1078526, МПК Н02Н3/16. Способ направленной импульсной защиты от однофазного замыкания на землю в сетях с компенсированной и изолированной нейтралью // Лебедев О.В., Шуин В.А., Чухин А.М. – Опубл. 07.03.84.

45 Шалыт, Г.М. Повышение эффективности профилактики изоляции в кабельных сетях / Г.М. Шалыт // Труды ВНИИЭ. Вып. 8. – М.: Госэнергоиздат. – 1959. – С. 77–97.

46 Шалыт, Г.М. Профилактические испытания изоляция под нагрузкой в кабельных сетях 6-10 кВ: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шалыт Герман Михайлович. – М.: ВНИИЭ, 1959.

47 Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3-35 кВ: дис. … докт. техн. наук: 05.14.02 / Шуин Владимир Александрович. – М.: ВНИИЭ. – 1994. – 523 с.

48 Horowitz, S.H., Phadke, A.G., Thorp, J.S. Adaptive transmission system relaying, in IEEE Trans, on Power Delivery, vol. 3, no. 4, 1988, pp. 1436-1458.

49 Патент 2088010 РФ. МПК Н02Н3/16, Н01Н83/20. Реле защиты / В.И. Кашкалов. – Заявл. 19.08.1994; опубл. 20.08.1997.

50 Патент 2422964 РФ. МПК Н02Н3/16, G01R31/08. Устройство токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю (варианты) / М.Л. Сапунков, А.А. Худяков. – Заявл. 17.03.2010; опубл. 27.06.2011.

51 Шуин, В.А. Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин // Электричество. – 1991, № 10. – С. 58–61.

52 Ольшовец П. Адмитансные защиты – эффективное средство охраны сетей СН от замыканий на землю // Релейная защита и автоматизация. – Чебоксары: РИЦ "Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управлению в электроэнергетике", 2017. – № 3 (28). – С. 56–59.

53 Патент РФ 2491563, МПК G01R31/08. Способ и устройство для определения замыкания на землю // Валроос Ари (FI), Алтонен Янне (FI). – Опубл. 27.08.2013.

54 Wahlroos A., Altonen J. „Multifrequency admittance protection”, Wiadomości Elektrotechniczne, 12/2016. – С. 43–45

55 J. Lorenc et. al, Admittance criteria for earth fault detection in substation automation systems in Polish distribution power networks, CIRED 1997 Birmingham.

56 Мурзина Е.А. Условия возникновения максимальных перенапряжений при дуговых однофазных замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Электроэнергетика: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия – 2011». – Иваново, 2011. – Т. 3. – с. 68 – 74.

57 Шуин В.А. Максимальные перенапряжения при дуговых перемежающихся замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.А. Шуин, Е.А. Мурзина // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояния и перспективы развития электроэнергетики» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – Т. 1, с. 150 – 153.

58 Мурзина, Е.А. Исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю на математической модели сети 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Восемнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М., 2012. – Т. 4, с. 467.

59 Мурзина, Е.А. Расчет переходного процесса при однофазном замыкании на землю в сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин, О.А. Добрягина // Электроэнергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы: сб. науч. тр. / под ред. Д.Р. Любарского, В.А. Шуина / ОАО «Институт “Энергосетьпрокт”». – Иваново: ПресСто, 2012. – с. 394 – 401.

60 Мурзина, Е.А. Расчет перенапряжений при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Электроэнергетика. «Энергия – 2012» региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). – Иваново, 2012. – Т. 3, с. 107 – 116.

61 Мурзина, Е.А. Оценка перенапряжений при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // ОАО «СО ЕЭС» Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды III международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. – Т. 2, с. 244 – 249.

62 Мурзина, Е.А. О выборе схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Девятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Тезисы докладов. – М., 2013. – Т. 4, с. 281.

63 Мурзина, Е.А. Математическая модель сети 6-10 кВ для расчета переходных процессов при замыканиях на землю / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Тезисы докладов II международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России», РЕЛАВЭКСПО-2013. – Чувашская республика, г. Чебоксары, 2013 г. – с. 114 – 115.

64 Мурзина, Е.А. Сравнительный анализ аналитических решений уравнений переходного процесса при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина, В.А. Шуин // Электроэнергетика. «Энергия – 2013». Восьмая Меж-

дународная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново, 2013 г. – с. 139 – 144.

65 Мурзина, Е.А. Особенности применения двухчастотной схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / Е.А. Мурзина // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – Т. 1, с. 179 – 182.

66 Добрягина, О.А. О выборе схемы замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ / О.А. Добрягина, Е.А. Мурзина, В.А. Шуин //4-я Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». Аннотации докладов. – Екатеринбург, 2013 г.

67 Мурзина, Е.А. Методы аналитического расчета переходных процессов при замыканиях на землю / Е.А. Мурзина // Научные труды IV международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Новочеркасск, 2013. – Т.2, с. 137 – 140.

68 Воробьева, Е.А. Обоснование схем замещения для расчета переходных процессов при замыканиях на землю в сетях 6 – 10 кВ / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин //Электроэнергетика. Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2014»: материалы конференции. – Иваново, 2014 г. – Т. 3, Ч. 1. С. 203 – 207.

69 Воробьева, Е.А. Определение частотных характеристик индуктивностей трехжильных кабелей 6 – 10 кВ / Е.А. Воробьева, Г.А. Филатова // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V Международной молодежной научно-технической конференции, 10 – 14 ноября 2014 г.: материалы конференции. – Томск: ТПУ, 2014. – Т.1., С.558 – 563

70 Слышалов В.К. Методика определения индуктивностей трехфазных силовых кабелей при расчетах переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ / В.К. Слышалов, В.А. Шуин, А.В. Куванов, Е.А. Воробьева, Г.А. Филатова // Вестник ИГЭУ – 2015 – Вып. 6. – С. 17 – 22

71 Воробьева, Е.А. Анализ достоверности эквивалентных моделей кабельных сетей 6 – 10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Материалы международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения) / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – Т. III. – С. 456 – 460.

72 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 научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2015 »: материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2015. – Т. 3, С. 112 – 114.

73 Воробьева, Е.А. Оценка точности эквивалентных моделей кабельных сетей 6–10 кВ для расчета переходных процессов при однофазных замыканиях на землю/ Е.А. Воробьева, В.А. Шуин // Электроэнергетика глазами молодежи. Труды VI Международной молодежной научно-технической конференции: материалы конференции.— Иваново: ИГЭУ.— 2015.— Т.2. – С.63 – 66.

74 Воробьева, Е.А. Аналитическое решение уравнений переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в α, β, 0-составляющих / Е.А. Воробьева, О.А. Добрягина, В.А. Шуин // Одиннадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2016 »: материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. – Т. 3, С. 160 – 162.

75 Воробьева, Е.А. Способ повышения динамической устойчивости функционирования адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / Е.А. Воробьева, В.А. Шуин, Т.Ю. Шадрикова // Трина-

дцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2018» материалы конференции.– Иваново: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2018. – Т. 3, С. 73 – 74.

76 Шуин, В.А. Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ / В.А. Шуин, Е.А Воробьева, О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ – 2018 – Вып. 3. – С. 29 – 37.

77 Шуин, В.А. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью / В.А. Шуин, Е.А Воробьева., О.А. Добрягина, Т.Ю. Шадрикова // Вестник ИГЭУ – 2018 – Вып. 4. – С. 20 – 30.

78 Шуин, В.А. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6 – 10 кВ / В.А. Шуин, Г.А. Филатова, Е.А. Воробьева, Д.И. Ганджаев // Вестник ИГЭУ – 2017 – Вып. 2. – С.34 – 42.

79 Филатова Г.А. Использование электрических величин переходного процесса для определения зоны однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ / Г.А. Филатова, Е.А. Воробьева // Электроэнергетика глазами молодежи. Научные труды V Международной молодежной научно-технической конференции, 10 – 14 ноября 2014 г.: материалы конференции.— Томск: ТПУ.— 2014.— Т.1. – С.569 – 574.

80 Федоров, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров – М.: Энергия, 1972. – 416 с.

81 Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Б.Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1990. – 366 с.

82 Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 414 с.

83 Кужеков С.Л., Гончаров С.В. Городские электрические сети: Учебное пособие – Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2001. – 256 с.

84 Инструкция по проектированию городских электрических сетей. РД.34.20.185–94. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 48 с.

85 Вайнштейн, Р.А. Режимы нейтрали в электрических системах: уч. пособие / Р.А. Вайнштейн, С.И. Головко, Н.В. Коломиец. – Томск: ТПИ, 1981. – 79 с.

86 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.

87 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.

88 Лисицын, Н.В. К обоснованию выбора режима заземления нейтрали / Н.В. Лисицын // Энергетик. – 2000. – № 1. – С. 22–25.

89 Четыре режима заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ. Объявим изолированную нейтраль вне закона // Новости электротехники [Электронный ресурс]. – 2003. – № 5. – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/05.php.

90 Целебровский Ю.Б. Области применения различных систем заземления нейтрали // Новости электротехники [Электронный ресурс]. — 2004. — № 5. — С. 28–31. – Режим доступа: http://masters.donntu.org/2011/etf/minakova/ library/article4.htm.

91 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.

92 О проектировании сетей собственных нужд энергоблоков / Решение главного технического управления Минэнерго СССР № 8/8-8 от 17.06.86.

93 О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС / Эксплуатационный циркуляр № Ц-01-97(7) – М.: Росэнергоатом – 1997.

94 О повышении надежности сетей 6 кВ собственных нужд энергоблоков АЭС / Эксплуатационный циркуляр Минэнерго СССР № Ц-01-83 от 23.09.88.

95 Методические указания по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 - 10 кВ дочерних обществ и организаций ОАО «Газпром» // СТО Газпром 2-1.11-070-2006.

96 Филатова, Г.А. Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Филатова Галина Андреевна. – Иваново, ИГЭУ, 2017. – 240 с.

97 Дударев Л.Е., Зубков В.В. Некоторые особенности переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6-35 кВ и использование их для средств релейной защиты // Электр. станции. – 1978. - № 6. – С. 68-71.

98 Шуин В.А., Сарбеева О.А., Чугрова Е.С. Токовые защиты от замыканий на землю. Исследование динамических режимов функционирования // Новости ЭлектроТехники. Информационно-справочное издание. № 2(62). - 2010. – С. 36-40.

99 Шуин В.А., Сарбеева О.А. Параметры токов переходного процесса при замыканиях на землю, влияющие на функционирование токовых защит нулевой последовательности электрических сетей 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ, 2006. Вып. 6. – С. 138-144.

100 Шуин В.А., Сарбеева О.А. Чугрова Е.С. Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 4. – С. 84-91.

101 Шуин В.А., Сарбеева О.А. Шагурина Е.С., Ганджаев Д.И. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защи-

тах от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ, 2011. Вып. 1 – С. 32-41.

102 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.

103 Koch W. Кратковременные замыкания на землю и их действие на реле // Энергетическое обозрение. Электротехнический выпуск, 1936, № 7.

104 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.

105 Шуляк, В.Г. Исследование релейных защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью: дис. … канд. техн. наук 05.14.02 /Шуляк Виктор Григорьевич. – Новочеркасск, Новочеркасск. политехн. ин-т, 1968.

106 Дьяконов, В.П. Matlab и Simulink в электроэнергетике. Справочник / В.П. Дьяконов, А.А. Пеньков. – М.: Горячая линия–Телеком, 2009. – 816 с.

107 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystem и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

108 Программный комплекс для моделирования энергосистем PSCAD [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ennlab.ru/category/products/manitoba/.

109 Программно-аппаратный комплекс-симулятор RTDS на платформе NovaCor / Техническое описание [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ennlab.ru/category/products/rtds/.

110 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.

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

112 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.

113 Соколова, Г.В. Защита от замыканий на землю ИЗС / Г.В. Соколова // Электрические станции. – 1984. – № 1. – С. 59–62.

114 Лачугин, В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю / В.Ф. Лачугин // Энергетик. – 1997. – № 9. – С. 21.

115 Лачугин В.Ф. Устройство защиты от замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ //Энергетик. 2004. № 7. С. 30-31.

116 Лачугин В.Ф. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных сетей с компенсированной нейтралью // Электрические станции. 2005. № 8. С. 58-63.

117 Лачугин, В.Ф. Опыт разработки импульсных защит от замыканий на землю // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 2. С. 77-79.

118 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/.

119 Дударев, Л.Е. Комплексная защита от замыканий на землю / Л.Е. Дударев, В.В. Зубков // Электрические станции. – 1981. – № 7. – С. 59–61.

120 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.

121 Шуин, В.А. Централизованное направленное устройство сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием переходных процес-

сов / В.А. Шуин, А.В. Гусенков, А.И. Дроздов // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 53–57.

122 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.

123 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.

124 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.

125 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.

126 Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отдние, 1986. – 488 с.

127 Модели волновых процессов в воздушных линиях 6-10 кВ для решения задачи определения места однофазного замыкания на землю / Слышалов В.К., Шуин В.А., Киселева Ю.А., Ганджаев Д.И. // Вестник ИГЭУ. – 2004. – Вып. 6. – С. 47-53.

128 К. Шимони. Теоретическая электротехника. Перевод с немецкого под ред. К.М. Поливанова. – М.: Изд-во «Мир», 1971. – 773с.

129 Смирнов В.М. Курс высшей математики. Том 2. – М.: Изд-во «Наука», 1965. – 655 с.

130 Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М: изд. «Наука», 1973. – 228с.

131 Березкин Е.Д. Анализ характеристик и разработка испытательных моделей силовых кабельных линий 6–10 кВ для диагностических лабораторий электрических сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Березкин Евгений Данилович. – Новочеркасск, ЮРГТУ (НПИ), 2001. – 264 с.

132 Шалыт Г.М. Определение мест повреждения линий импульсными методами / Г.М. Шалыт. – М.: Энергия, 1968. – 216 с.

133 Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 549 с.

134 Шуин, В.А. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / В.А. Шуин, Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, С.Н. Пашковский, Е.С. Шагурина, Г.А. Филатова // Релейщик. – 2015. – № 2. – С. 23 – 29.

135 Ширковец, А.И. Исследование и моделирование электромагнитных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях с неэффективным заземлением нейтрали: дис. … канд. техн. наук 05.14.02 / А.И. Ширковец – Новосибирск, НГТУ, 2013. – 224 с.

136 Р. Рюденберг. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р. Рюденберг. – М.: Издательство иностранной литературы, 1955. – 716 с.

137 Ширковец А.И. Исследование параметров высших гармоник в токе замыкания на землю и оценка их влияния на гашение однофазной дуги / А.И. Ширковец // Релейная защита. – 2011. – № 4. – С. 14–19.

138 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.

139 MUPASZ 2000STS/RTS. Микропроцессорное устройство для измерений, автоматики, дистанционного управления и защит распредустройств / Инструкция для обслуживающего персонала STS_RTS_TEL_1.01_RU. – Варшава, 2005. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://www.mupasz.ru/fileadmin/user_upload/documents/Instrukcje/mu_2000_sts_rts_ru.pdf.

140 MiCOM P14x P141, P142, P143, P144 & P145. Терминалы защиты и управления присоединением. Техническое руководство. Версия ПО: 35. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=User+guide&p_File_Name=MiCOM_P14x.pdf&p_Doc_Ref=%D0%A014%D1%85_RU_C74&_ga=2.98033247.1198092320.1533195869-1636465532.1528538525.

141 Ari Wahlroos, Janne Altonen. Применение нового метода на основе проводимости по гармоническому спектру при замыканиях на землю в сетях среднего напряжения с компенсированной нейтралью /ABB Oy Medium Voltage Products, Finland, 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRS758683&LanguageCode=ru&DocumentPartId=&Action=Launch.

142 Николотов О. Предложен новый метод защиты от замыканий на землю в распредсетях 6–35 кВ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://digitalsubstation.com/blog/2017/10/25/predlozhen-novyj-metod-zashhity-ot-nbsp-zamykanij-na-nbsp-zemlyu-p-p-v-nbsp-raspredsetyah-6-ndash-35-nbsp-kv/.

143 Патент РФ № 2629375, МПК H02H 3/16. Устройство адаптивной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов /Шуин В.А., Шадрикова Т.Ю., Добрягина О.А., Шагурина Е.С., Пашковский С.Н. Заявл. 17.08.2017. Опубл. 29.08.2017. Бюл. № 25.

144 Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

145 Винокурова Т.Ю., Воробьева Е.А., Шуин В.А. О выборе рабочего диапазона частот устройств защиты от замыканий на землю на основе переходных процессов в кабельных сетях 6–10 кВ // 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.

146 Шуин, В.А. Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ /В.А. Шуин, М.С. Аль-Хомиди, Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ: Журнал. – Иваново: ООО "ПресСто". – 2016. – Вып. 3. – С. 50 – 55.

147 Шуин, В.А. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения от однофазных замыканий на землю / В.А. Шуин, Т.Ю. Винокурова, О.А. Добрягина, С.Н. Пашковский, Г.А. Филатова, Е.С. Шагурина // Релейщик. – 2015. – № 2. – С. 23 – 29.

148 Филатова, Г.А. Разработка и исследование способов и алгоритмов определения места однофазного замыкания на землю в кабельных сетях 6–10 кВ по параметрам переходного процесса: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Филатова Галина Андреевна. – Иваново, ИГЭУ, 2017. – 204 с.

149 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.