

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

На правах рукописи

Белянин Андрей Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ И ЛОКАЦИИ
ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ФИДЕРА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

**Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы**

**Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Лямец Юрий Яковлевич**

ЧЕБОКСАРЫ – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Состояние проблемы замыканий на землю и вопросы моделирования	8
1.1 Обзор литературы	8
1.2 Имитационное моделирование	17
1.3 Алгоритмическое моделирование	24
1.4 Нормальные и локальные информационные составляющие.....	32
1.5 Выводы	37
Глава 2 Организация защиты от замыканий на землю.....	38
2.1 Критерии исправного состояния фидера	38
2.2 Использование нормального режима наблюдаемого объекта	43
2.3 Использование локального режима наблюдаемого объекта	47
2.4 Определение поврежденного участка разветвленной сети	50
2.5 Выводы	55
Глава 3 Поиск места замыкания на землю	56
3.1 Применение дискретно-аналоговых моделей	57
3.2 Энергетический критерий	62
3.3 Распознавание ОЗЗ по методу локализации.....	65
3.4 Распознавание двойных замыканий на землю по методу локализации	69
3.5 Выводы	72
Глава 4 Внедрение.....	74
4.1 Селективная защита от замыканий на землю ТОР 110-ИЗН.....	74
4.2 Анализ осциллограмм реальных замыканий на землю.....	81
4.3 Апробация алгоритма определения поврежденного фидера по нормальным и локальным компонентам	84
4.4 Выводы	88
Заключение	89
Список литературы	91
Приложение А. Описания переходных процессов в длинных линиях.....	103

Приложение Б. Способ определения поврежденного участка разветвленной распределительной сети	106
--	-----

ВВЕДЕНИЕ

Значительную часть в инфраструктуре передачи и распределения электроэнергии занимают распределительные сети 6-35 кВ, эксплуатация которых сопряжена со значительными издержками, обусловленными аварийными перебоями в энергоснабжении и необходимостью проведения профилактических и ремонтных работ. Основным видом повреждения таких сетей является однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), составляющее по разной информации от 70 до 90% от общего числа электрических повреждений. В отличие от сетей с эффективно заземленной нейтралью замыкание одной фазы на землю в рассматриваемых сетях не является коротким замыканием и не требует немедленного отключения. В то же время замыкание фазы на землю ведет к нежелательным последствиям: возникновению перенапряжений в сети, вследствие чего может произойти пробой неповрежденных фаз и переход ОЗЗ в более серьезный вид повреждения – двойное замыкание на землю; проявлению феррорезонансных процессов, вредных для трансформаторов напряжения; попаданию людей и животных под шаговое напряжение; разрушению опор.

Разработкам новых, более совершенных алгоритмов защит от ОЗЗ уделяется большое внимание. Но проблема ОЗЗ всё ещё остаётся в повестке дня. Кроме того, требуют совершенствования методы локации повреждений, что представляет собой отдельную и несравненно более сложную задачу. Значительный вклад в развитие алгоритмов защит от замыканий на землю внесли отечественные научные школы, сложившиеся в Москве (ЭНИН им. Кржижановского, ВНИИЭ), Иванове (энергетический университет), Томске (политехнический университет), Новочеркасске (ЮРГТУ).

В диссертации представлены результаты исследований, выполненных в Чебоксарах (ЧГУ и исследовательский центр (ИЦ) «Бреслер») совместно с к.т.н. В.Ф. Лачугиным (ЭНИН).

Целью диссертации является разработка способов и средств защиты от однофазных замыканий на землю и определения места однофазного замыкания фидера на землю. Исследуются существующие алгоритмы защиты и локации

замыканий на землю, вопросы построения имитационных и алгоритмических моделей электрической сети для исследования процессов замыканий на землю. Разработка на основе результатов теоретических исследований эффективных способов защиты и локации замыканий на землю, независящих от режима нейтрали.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 100 наименований, двух приложений, 56 рисунков. Общий объем работы в 110 стр. включает: текст диссертации – 90 стр., список литературы – 12 стр. и приложения – 8 стр.

В первой главе приведён обзор литературы по теме диссертации и обоснован выбор направления исследований. Рассмотрены вопросы имитационного моделирования распределительных сетей, способных воспроизводить протекающие процессы при замыканиях на землю. Решена задача алгоритмического моделирования фидера в переходном режиме. Выделен подкласс дискретно-аналоговых алгоритмических моделей, дальнейшее развитие которых привело к обнаружению новых информационных составляющих, названных нормальными и локальными. Показано различие между локальным режимом и аварийным. Локальный режим интересен своей физической природой: он создаётся в зашунтированной модели неизвестными источниками тока, действующими из неизвестного места замыкания. Обоснована возможность перемещения шунтов внутри модели локального режима, что открывает определённые перспективы использования локального режима для решения задачи локации повреждений.

Во второй главе исследованы критерии неповрежденного состояния фидера. Рассмотрено применение дискретно-аналоговых моделей объекта, позволяющих контролировать его исправное состояние. Критерием исправного состояния фидера служит уровень тока нулевой последовательности в конце фидера, определяемый при помощи алгоритмической модели по наблюдаемым в начале присоединения току и напряжению нулевой последовательности. О состоянии каждого фидера можно судить, сопоставляя наблюдаемый ток нулевой

последовательности в начале фидера и нормальный ток, определяемый в модели нулевой последовательности. Наиболее общий подход к определению повреждённого присоединения несут в себе модели локальных режимов, обусловленный их физической природой. В модели локального режима шунт в месте наблюдения освобождает неповрежденную часть сети от влияния источника тока в месте повреждения. Использование информации со всех сторон наблюдаемого участка разветвленной сети при помощи перемещения шунтов позволяет определить поврежденный участок. На способ защиты от однофазных замыканий на землю получен патент РФ №2516371.

Третья глава посвящена задаче локации ОЗЗ в фидере распределительной сети. Под локацией понимается определение места повреждения. Разработанные подходы к определению поврежденного присоединения при дальнейшем развитии и расширении информационной базы позволяют решать и эту более сложную задачу. Метод дискретно-аналогового алгоритмического моделирования представляет локацию повреждения как поиск минимума целевой функции, строящейся для оценки соответствия алгоритмической модели реальному состоянию объекта. Более общим подходом является использование критериев повреждения, которые исходят из принципа резистивности замыкания. Разработанные алгоритмические модели используются для построения моделей фидера до и после предполагаемого замыкания с целью определения тока повреждения и напряжения поврежденной фазы, использующихся в энергетическом критерии поиска места повреждения. Предложены алгоритмы поиска мест земляных замыканий с использованием локальных моделей, причем данные алгоритмы могут использоваться, как при одностороннем наблюдении, так и при двухстороннем и подходят для поиска однофазных и двойных замыканий на землю. На алгоритмы определения мест замыканий на землю получены патенты РФ №2542745 и №2542331.

Четвертая глава посвящена разработке микропроцессорной селективной защиты воздушных и кабельных линий электропередачи 6-35 кВ с любым режимом нейтрали (по заданию и при участии ОАО «Тюменьэнерго»). В этой же

главе представлена апробация разработанных, принятых к внедрению способов определения повреждённого фидера. Разработка защищена патентами РФ №2519277 и №2550348.

Автор выражает большую признательность научному руководителю д.т.н. профессору Лямецу Ю.Я. и научному консультанту к.т.н. Иванову С.В.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ И ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

1.1 Обзор литературы

Распределительные сети имеют различную конфигурацию и режимы заземления нейтрали (изолированную, заземленную через дугогасящий реактор (ДГР) и резистивно заземленную), что предъявляет к защитах от ОЗЗ ряд весьма жестких требований в части обеспечения высокой чувствительности и селективности как при устойчивых, так и при перемежающихся замыканиях. В то же время селективные защиты от замыканий на землю отсутствуют на 80% подстанций России¹. В этом случае поиск повреждённого присоединения при ОЗЗ зачастую ведётся «дедовским» способом – поочерёдным отключением присоединений и затягивается на несколько часов. С эксплуатируемыми защитами дело обстоит не лучше. Несмотря на длительную эксплуатацию защит, на сегодняшний день практически нет методик расчета и выбора уставок направленных токовых защит, отсутствие нормативные требования по работе защит от ОЗЗ при перемежающихся замыканиях и соответствующих методик испытаний². Все это определяет высокий интерес исследователей к процессам замыканий на землю. Не обошли стороной вопросы замыканий на землю и на прошедшей летом 2015 г конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем»³. Однако решение задачи определения поврежденного присоединения при ОЗЗ не позволит решить проблему ОЗЗ в целом. Для этого требуется разработка устройств и алгоритмов дистанционного поиска мест замыканий на землю, которые позволят сократить время восстановления нормального режима работы. Решение проблемы

¹ Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик, 2000, №1. С.20-22.

² Головки С. И. Земляные защиты электрооборудования 6-35 кВ // Новости электротехн. – 2012. – № 5. – С. 52-54.

³ Шуин В.А. и др. Комплексный подход к решению проблемы селективной защиты распределительных кабельных сетей среднего напряжения // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем. – Сочи, 2015.

замыканий на землю мы будем рассматривать в два этапа: на первом ставится задача определения поврежденного фидера, а на втором – определение места повреждения.

1.1.1 Защита от замыканий на землю

Информационный поиск показал большую активность исследователей по разработке различных способов определения поврежденного присоединения при замыканиях на землю. В настоящее время можно выделить 3 класса защит от однофазных замыканий:

- индивидуальные (используют информацию только с одного присоединения);
- централизованные (осуществляют сбор информации о токах со всей секции);
- групповые (осуществляют обмен информации между устройствами РЗА секции).

Индивидуальные защиты являются наиболее предпочтительными, поскольку не требуют значительного объема монтажа – ток ($3I_0$) и напряжение ($3U_0$) поступают только с одного присоединения. С другой стороны ограниченный объем информации усложняет алгоритмы защиты.

Централизованные защиты собирают информацию о токах $3I_0$ со всех присоединений секции и с этой точки зрения являются наименее предпочтительными. К тому же разная вторичная нагрузка на трансформаторы тока нулевой последовательности вызывает значительную погрешность в измеряемом токе, что нередко приводит к неселективной работе защиты. С другой стороны алгоритмы централизованных устройств защиты отличаются простотой и не требуют использования цепей напряжения.

Групповые защиты по своей сути являются подклассом централизованных защит. Они осуществляют индивидуальное измерение информации о наблюдаемых электрических величинах, что снижает погрешность измерения, с дальнейшим обменом информации между устройствами. Развитие

информационных технологий позволяет говорить и об обмене информации об аналоговых сигналах.

Классические алгоритмы индивидуальных устройств защиты от ОЗЗ широко описаны в литературе¹ и делятся на четыре группы:

- алгоритмы, основанные на использовании электрических величин промышленной частоты;
- алгоритмы, основанные на использовании высших гармоник;
- алгоритмы, основанные на использовании электрических величин переходного процесса;
- алгоритмы, основанные на использовании «наложенных» токов.

Так как данные алгоритмы подробно описаны в литературе², подробно останавливаться на них не будем, и лишь отметим ряд научных школ, занимающихся данными вопросами. Разработками защит от замыканий на землю занимаются в Ивановском государственном энергетическом университете³, в Томском политехническом университете⁴, в Энергетическом институте имени Г.М. Кржижановского⁵, во ВНИИЭ⁶ и в ряде других.

Среди классических алгоритмов следует особо выделить алгоритмы, реагирующие на переходные токи и напряжения нулевой последовательности, так как они наиболее полно отвечают требованиям по селективности при устойчивых и неустойчивых ОЗЗ. Помимо этого использование данного принципа определяет независимость функционирования защиты от режима заземления нейтрали и конфигурации сети. Данные алгоритмы подробно разрабатывались

¹ Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ. – Библиотека электротехника; Вып. 11(35). – М.: НТФ «Энергопрогресс». – 104 с.

² Шалин А.И., Политов Е.Н. Защита от замыканий на землю в сетях 6...35кВ с резистивным заземлением нейтрали // Электроэнергетика, 2002. Часть 1 С. 45-54.

³ 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 Ивановского государственного энергетического университета. – 2009. – № 4. – С. 84-91.

⁴ Вайнштейн Р.А. и др. Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 115-118.

⁵ Лачугин В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю // Энергетик. – 1997. – № 9. – С. 21.

⁶ Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ // Труды ВНИИЭ. М.: Госэнергоиздат. – 1963. – вып. 16.- С. 219 - 251.

Поповым И.Н.¹ и его последователями в середине прошлого столетия. На основе разработанной теории были сконструированы устройства защиты², однако эксплуатация подобных устройств показала их недостаточную селективность. Совершенствование микропроцессорной техники позволило вновь обратиться к данным алгоритмам, увеличение частоты дискретизации наблюдений позволило улучшить качество функционирования данных защит³.

Также развитие микропроцессорной техники подтолкнуло исследователей к поиску новых решений задачи определения поврежденного присоединения. Так, в патенте⁴ российских исследователей модель фидера по нулевой последовательности представляется в виде емкости на землю. Рассчитывается производная напряжения нулевой последовательности, измеряемого на шинах присоединения, представляющая собой величину, пропорциональную емкостному току, генерируемому присоединением при внешнем замыкании на землю. Далее определяется взаимный характер изменения тока нулевой последовательности и полученной оценки тока. При однотипном изменении фиксируется внешнее замыкание, при различии в характере изменения токов фиксируется повреждение на контролируемом присоединении.

Ведутся исследования в сторону адаптивных защит. Например, разработана адаптивная токовая защита от ОЗЗ⁵, функционирующая при замыканиях через переходное сопротивление, изменяющееся в широком диапазоне. Принцип работы защиты основан на непрерывном контроле фазного напряжения и напряжения нулевой последовательности. Их отношение позволяет определить показатель неполноты замыкания на землю, который характеризует влияние

¹ Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 246 с.

² Устройство направленной волновой защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ типа УЗС-01. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Казань: Энергосоюз, 1998.

³ Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю. – Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №03(08). – С. 50-57.

⁴ Устройство диагностики и направленной защиты от однофазных замыканий в электрических сетях // Патент РФ на полезную модель №128027, БИ №13, 2013.

⁵ Мухаметшин Р.Я, Пеленев Д.Я. Устройство адаптивной токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: Тезисы докладов 5 Всероссийской конференции. – Пермь. – 2012. – С. 137.

переходного сопротивления в месте однофазного замыкания на землю на величину напряжения и токов нулевой последовательности, и разработать алгоритм адаптивной коррекции этих величин.

Все чаще для решения задач релейной защиты привлекается теория множеств. Нашли применение ей и при поиске поврежденного присоединения.¹

Развитие микропроцессорной техники позволяет исследователям использовать все больше имеющейся у них информации и реализовывать новые алгоритмы. Остается актуальной задача реализации устройства, обеспечивающего селективную и надежную защиту от ОЗЗ независимо ни от конфигурации сети, ни от режима нейтрали, ни от характера замыкания на землю.

1.1.2 Поиск места замыкания на землю

Помимо определения поврежденного фидера необходимо решить более сложную задачу поиска места замыкания на землю. Различные способы определения места повреждения (ОМП), применяемые в сетях высокого и сверхвысокого напряжения, классифицированы (рисунок 1.1)². Однако они оказываются малопригодными для поиска кратковременных самоустраняющихся замыканий или для поиска места замыкания под нагрузкой³. Целью исследователей является повышение точности определения места замыкания на землю в распределительной сети.

¹ Роженцова Н.В., Вагапов Г.В., Нургалиев М.З. Разработка алгоритма работы защит от замыканий на основе нечеткой логики // Федоровские чтения - 2012: 42 Всеросс. науч.-практ. конф. – Москва. – 2012. – С. 120-122.

² Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях // М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.

³ Квришвили Л.В. Исследование и разработка методов локации однофазных замыканий на землю в распределительных сетях: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Новосиб. гос. техн. университет, Томск, 2012.

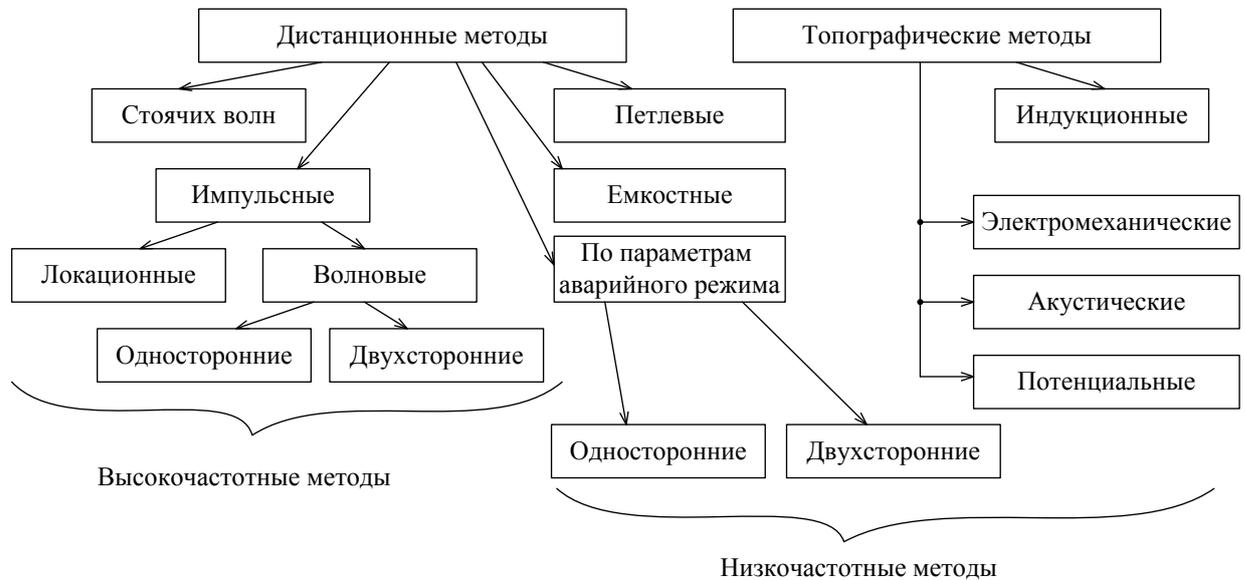


Рисунок 1.1 – Классификация методов ОМП

В патенте¹ поставленная цель достигается путём запоминания токов нулевой последовательности предшествующего режима каждой линии и измерения разности токов нулевой последовательности каждой линии в течение периода промышленной частоты. После определения повреждённой линии относительное расстояние до места повреждения оценивают по формуле

$$\hat{x}_f^* = \frac{I_{зп} - \sum I_{нп}}{I_{зд}} = \frac{x_f}{l},$$

где $I_{зп}$ – аварийный ток нулевой последовательности повреждённой линии, $\sum I_{нп}$ – суммарный ток нулевой последовательности неповреждённых линий, $I_{зд}$ – доаварийный ток нулевой последовательности повреждённой линии, x_f – длина повреждённой линии от подстанции до места повреждения, l – длина повреждённой линии.

В патенте США² оценка расстояния \hat{x}_f до места повреждения производится из выражения:

¹ Способ определения поврежденного присоединения и места однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью // Патент РФ RU 2174690

² Method and device for locating a fault point on a three-phase power transmission line // Патент США №4559491, 1985 г.

$$\hat{x}_f^2 + B \cdot \hat{x}_f + C = 0,$$

где B, C – параметры, зависящие от основной частоты наблюдаемых величин. В патенте даётся описание расчёта этих величин в зависимости от вида повреждения.

Другой патент¹ обеспечивает определения расстояния до места замыкания на землю при не отключённом присоединении в радиальных распределительных сетях. Поставленная цель достигается путём нахождения минимума среднеквадратического отклонения специальной измерительной кривой напряжения повреждённой фазы по отношению к набору расчётных кривых в начальной стадии переходного процесса, полученных для различных расстояний до места замыкания на землю. Среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле

$$s_k = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (u_{u,i}^* - u_{p,i,k})^2},$$

где $u_{u,i}^* = U_{\text{фм}} \frac{u_{u,i}}{U_{\text{п}}}$ – нормированное напряжение повреждённой фазы, i – номер отсчёта измерения, n – количество точек измерения, $u_{u,i}$ – напряжение повреждённой фазы, $U_{\text{п}}$ – напряжение пробоя, $U_{\text{фм}}$ – максимальное фазное напряжение, $u_{p,i,k}$ – расчётная кривая напряжения, k – номер расчётной кривой.

По минимальному среднеквадратическому отклонению, соответствующему расчётной k -ой кривой, определяют расстояние до места замыкания (расчётные кривые приведены в патенте).

В качестве альтернативного способа поиска места однофазного замыкания на землю рассматривается кратковременный перевод замыкания в двойное замыкание на землю замыканием на шинах подстанции одной из здоровых фаз и применение критериев поиска мест двойных замыканий.

¹ Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в радиальных распределительных сетях // Патент РФ RU 2250472

Например, патент¹ предполагает оценку расстояния до мест повреждения пропорционально индуктивному сопротивлению, определяемому по формуле

$$X_i = \frac{(U_{ai}^{ab} R_{1H} - U_{pi}^{ab} X_{1H})(I_{1a}^{ab} R_{1H} - U_{1a}^{ab} - I_{1p}^{ab} X_{1H}) + (U_{ai}^{ab} X_{1H} + U_{pi}^{ab} R_{1H})(I_{1a}^{ab} X_{1H} - U_{1p}^{ab} + I_{1p}^{ab} R_{1H})}{(\sqrt{3} + K/\sqrt{3})(I_{1a}^{ab} R_{1H} - U_{1a}^{ab} - I_{1p}^{ab} X_{1H})^2 + (\sqrt{3} + K/\sqrt{3})(I_{1a}^{ab} X_{1H} - U_{1p}^{ab} + I_{1p}^{ab} R_{1H})^2},$$

где $R_{1H} = \frac{U_{1a}^n I_{1a}^n + U_{1p}^n I_{1p}^n}{(I_{1a}^n)^2 + (I_{1p}^n)^2}$ – активное сопротивление нагрузки прямой

последовательности; $X_{1H} = \frac{U_{1p}^n I_{1a}^n + U_{1a}^n I_{1p}^n}{(I_{1a}^n)^2 + (I_{1p}^n)^2}$ – реактивное сопротивление нагрузки

прямой последовательности; U_{1a}^n, U_{1p}^n – активная и реактивная составляющие фазного напряжения прямой последовательности неповреждённой фазы

предаварийного режима; I_{1a}^n, I_{1p}^n – активная и реактивная составляющие фазного тока прямой последовательности неповреждённой фазы предаварийного режима;

i – индекс неповреждённой фазы; U_{ai}^{ab}, U_{pi}^{ab} – активная и реактивная составляющие фазного напряжения соответствующей повреждённой фазы

аварийного режима; I_{1a}^{ab}, I_{1p}^{ab} – активная и реактивная составляющие фазного тока прямой последовательности неповреждённой фазы аварийного режима; U_{1a}^{ab}, U_{1p}^{ab}

– активная и реактивная составляющие фазного напряжения прямой

последовательности неповреждённой фазы аварийного режима; $K = \frac{X_0 - X_1}{X_1}$ –

коэффициент компенсации; X_1, X_0 – удельные сопротивления прямой и нулевой последовательностей контролируемой линии.

Нельзя не упомянуть исследования в области ОМП с применением локационного метода активного зондирования¹, разработки методов волнового

¹ Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю // Авторское свид. СССР №1569753, 1990 г.

ОМП отечественными² и зарубежными³ учёными, в том числе с применением имитационного моделирования наблюдаемой линии электропередачи⁴. Уже сегодня компания Alstom реализует устройства волнового определения места замыкания на землю, основанное на фиксации времен прихода волн переходного процесса по всем сторонам наблюдаемой линии и последующем расчете из разновременности координаты места замыкания на землю. Большой опыт эксплуатации двухсторонних волновых алгоритмов ОМП накоплен в НПП «Бреслер»⁵. Однако уже сегодня в Китае представлены разработки односторонних волновых методов⁶ определения места повреждения на линии при замыканиях на землю, основанных на временных различиях распространения волн в каналах «фаза-фаза» и «фаза-земля», фиксируемых в точках. Представленные в статье результаты моделирования указывают, что метод обладает высокими надежностью и точностью.

Китайские исследователи стали родоначальниками еще одного алгоритма определения поврежденного участка, основанного на распределенном измерении⁷. На линии электропередачи устанавливаются индикаторы повреждения воздушной линии (ИПВЛ), которые фиксируют путь протекания тока повреждения и таким образом могут определять поврежденный участок линии. Устройство представляет собой сигнальную лампу, которая срабатывает при протекании по ней тока повреждения. Принцип действия проиллюстрирован на рисунке 1.2. Точность такого способа зависит от частоты установки подобных

¹ Куликов А.Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования // М.: Энергоатомиздат, 2006. – 148 с.

² Куликов А.Л., Ананьев В.В. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач // Вестник Ивановского гос. энерг. ун-ва. – 2014. – №4. – С. 21-25.

³ Fault location using travelling waves // Патент США №8655609, 2014.

⁴ Куликов А.Л. Адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП на основе имитационного моделирования // Совр. напр. разв. систем релейной защиты и автоматики энергосистем, Екатеринбург. – 2013. – С. 1-7.

⁵ Бычков Ю.В. Развитие и приложения дистанционного метода определения места повреждения линий электропередач: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2012.

⁶ Liu Y., Sheng G., He Z., Jiang X. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points // Pr. elektrotechn. – 2012. – Vol.88. – № 3a. – С. 254-258.

⁷ Jen-Hao Teng, Wei-Hao Huang. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators. – IEEE Trans. on Power Systems, 2014, V. 29, № 4, P. 1653-1662.

индикаторов. В России подобное оборудование выпускают две фирмы: ООО МНПП «Антракс» и ООО «Исследовательский центр «Бреслер».

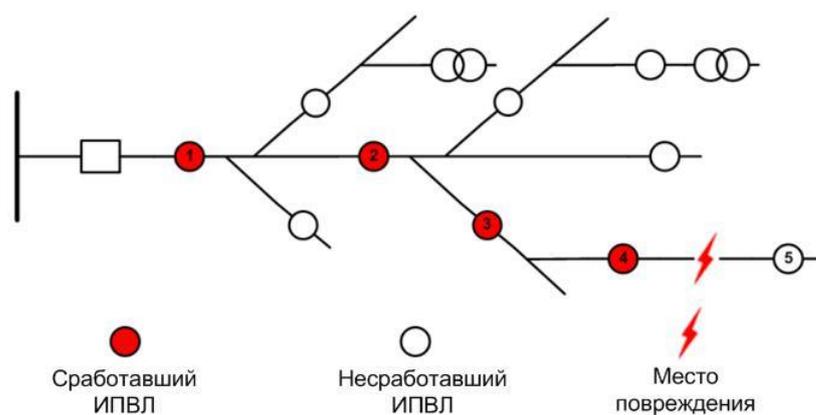


Рисунок 1.2 – Принцип действия ИПВЛ

Современная релейная защита движется в сторону распределенных измерений. Появление многостороннего наблюдения в распределительных сетях совместно с возможностью обмена информацией между концами наблюдаемой линии откроет новые перспективы для разработки и применения более точных алгоритмов локации повреждений в распределительных сетях.

Таким образом, на сегодняшний день представлено большое количество решений для поиска замыканий на землю. На настоящий момент перспектива развития алгоритмов локации замыкания на землю связана с увеличением информационной базы, а именно привлечением информации с удаленных концов линий электропередачи.

1.2 Имитационное моделирование

Интеллектуальный наблюдатель, каковым является микропроцессорная релейная защита и автоматика (РЗА), представляет собой обучаемую систему. В роли учителя выступает имитационная модель контролируемого объекта (ИМО), которая представляет собой математическое описание защищаемых объектов. В настоящее время получили широкое распространение моделирующие комплексы (MatLAB/Simulink¹, RTDS, PSSE, PSCAD и др.), которые могут быть

¹ Дьяконов В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель // М.: ДМК Пресс, 2008. – 708 с.

использованы для построения ИМО для целей релейной защиты¹. Однако заложенные в них алгоритмы не свободны от методической погрешности, в частности, при моделировании длинной линии². Поэтому для задач разработки и тестирования релейной защиты помимо моделирующих комплексов используют ИМО, построенные в базисе фазных координат³, а также ИМО, построенные в базисе симметричных составляющих⁴.

Как было представлено выше, защиты от ОЗЗ выполняются как на основе анализа установившегося процесса при ОЗЗ, так и на основе анализа переходного процесса. Если учесть, что с расчетом установившегося процесса достаточно просто справится базис фазных координат, то с переходным процессом дело обстоит несколько сложнее. При исследовании переходных процессов, возникающих при ОЗЗ, фидер распределительной сети представляет собой длинную линию, так как емкости проводов относительно земли сильно влияют на процесс. На сегодняшний момент есть ряд книг, в которых приводится математическое описание элементов электроэнергетических систем, подходящее для анализа, как установившихся процессов, так и для переходных⁵, однако они оказываются достаточно сложны для реализации. Переходные процессы в длинных линиях, а также в цепях с дискретно изменяющимися источниками или параметрами, в кусочно-линейных цепях носят прерывистый характер. Общий метод анализа таких процессов основан на их описании функциями дискретного и непрерывного аргументов⁶.

¹ Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink // М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

² Лямец Ю.Я., Белянин А.А., Воронов П.И. Анализ переходных процессов в длинной линии в базисе дискретного и непрерывного времени // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – №5. – С. 11–16.

³ Павлов А.О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2002.

⁴ Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М.: Энергия, 1970, 519 с.

⁵ Бернас С. Цёк З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польск. – М.: Энергоиздат. – 1982. – 312 с.

⁶ Лямец Ю.Я. Анализ дискретных процессов в электрических цепях: автореф. дис. ... к-та техн. наук. МИИТ, 1973.

Ниже систематизируются те случаи, когда переходный процесс в длинной линии допускает математическое описание в замкнутой форме. Аналитическое решение достигается с помощью разностных уравнений длинной линии, которые в отсутствие потерь не имеют методической погрешности¹. Анализ основан на переходе от неограниченного непрерывного времени к двум разнотипным временам – дискретному и локальному непрерывному, заполняющему промежутки между дискретами. В результате система с длинной линией описывается уравнениями, разностными по дискретному аргументу и алгебраическими или дифференциальными – по локальному непрерывному². Решение в замкнутой форме может быть получено при алгебраических граничных условиях на концах длинной линии. В отличие от предыдущих работ здесь методика решения будет предельно упрощена благодаря введению различных времён для разных сторон линии.

При тех положительных направлениях токов и напряжений, что приняты в схеме по рисунку 1.3а, разностные уравнения линии без потерь имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u_1(t) - R_b i_1(t) &= u_2(t - \tau) - R_b i_2(t - \tau), \\ u_2(t) + R_b i_2(t) &= u_1(t - \tau) - R_b i_1(t - \tau), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $R_b = \sqrt{L^0/C^0}$ – волновое сопротивление линии, $\tau = l\sqrt{L^0C^0}$ – время пробега волны вдоль линии, L^0 и C^0 – удельные индуктивность и ёмкость, l – длина линии.

¹ Караев Р.И., Лямец Ю.Я. О применении разностных уравнений длинной линии // Электричество. – 1972. – №11. – С. 28-36.

² Караев Р.И., Лямец Ю.Я. Дифференциально-разностные уравнения волнового процесса в длинной линии. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1973. – №3. – С. 132-138.

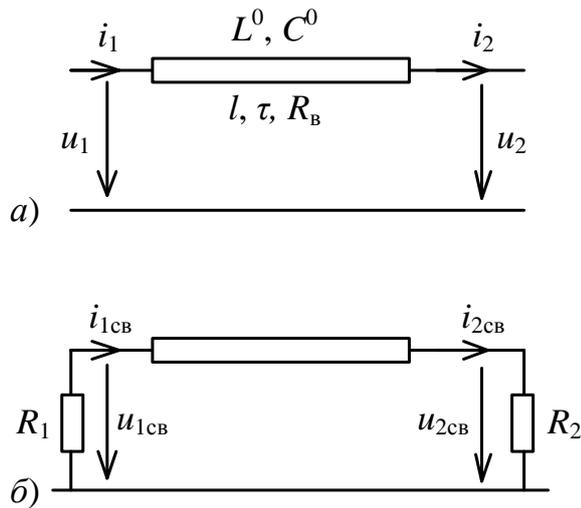


Рисунок 1.3 – Длинная линия без потерь:

a – в произвольном режиме;

б – в свободном процессе с алгебраическими граничными условиями

Свободный процесс описывается одним однородным разностным уравнением, которое может быть представлено в форме с отстающим аргументом, как в (1.1), либо в альтернативной форме с опережающим аргументом. Опережение или запаздывание на этот раз составляет 2τ . Так, из уравнений (1) при алгебраических граничных условиях $u_{1св}(t) = -R_1 i_{1св}(t)$, $u_{2св}(t) = R_2 i_{2св}(t)$ вытекает следующее описание любой из свободных составляющих граничных электрических величин, представленное в форме с опережающим аргументом

$$f_{св}(t + 2\tau) - \lambda f_{св}(t) = 0; \quad (1.2)$$

коэффициент λ представляет собой произведение коэффициентов отражения волн от концов линии

$$\lambda = \frac{(R_1 - R_B)(R_2 - R_B)}{(R_1 + R_B)(R_2 + R_B)}.$$

Решения разностного уравнения (1.2) для токов $i_{1св}$, $i_{2св}$ различаются не только потому, что не совпадают их начальные функции, но и по ещё одной менее очевидной причине: расположение начальных интервалов зависит от того, где находится искомая величина – в месте коммутации или на противоположной стороне линии. В этой связи удобно рассматривать переходные процессы в начале и в конце линии на разных осях времени. Если t – ось времени для величин,

действующих в месте коммутации, то $t' = t + \tau$ – ось времени для величин противоположной стороны (рисунок 1.4). Заметим, что начальный интервал противоположной стороны начинается ранее момента коммутации $t = 0$ на время τ ($t' = 0, t = -\tau$)¹

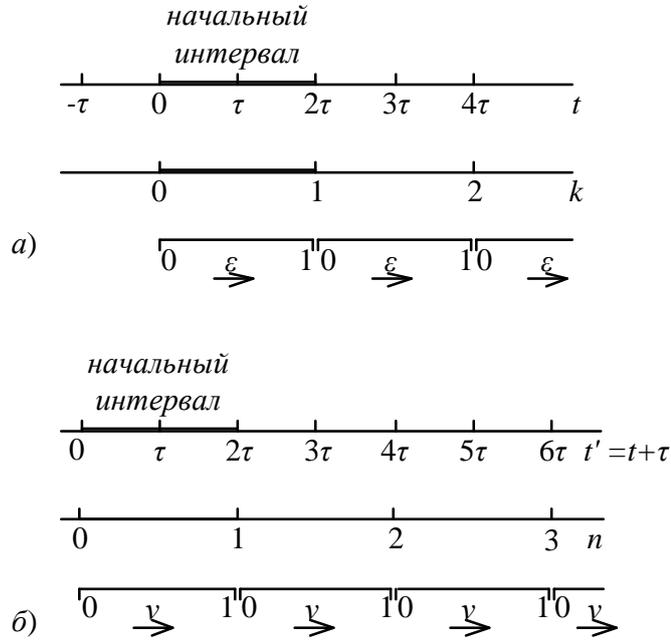


Рисунок 1.4 – Разметка оси времени:

а – для величины, действующей в месте коммутации;

б – для величины противоположного места

После разметки оси времени интервалами 2τ появляется возможность перейти от единого аргумента t к двум временам: дискретному и относительно непрерывному, изменяющемуся в пределах от 0 до 1. Для каждого из двух случаев, показанных на рисунке 1.4, предусмотрены свои обозначения. Для ситуации по рисунку 1.4а вводится относительное время $t_* = t/2\tau$, дискретное $k = \text{ent}(t_*) = 0, 1, 2, \dots$ и местное непрерывное время $\varepsilon = t - 2\tau k \in (0, 1)$, так что $t_* = k + \varepsilon$. Для ситуации по рисунку 1.4б $t'_* = (t + \tau)/2\tau = n + \nu$, $n = \text{ent}(t'_*) = 0, 1, 2, \dots, \nu = t' - 2\tau n \in (0, 1)$.

¹ Лямец Ю.Я. Слагаемые свободного процесса в длинной линии. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1978. – №1. – С. 11-17.

Пусть f_x – величины в месте коммутации, а f_y – на противоположной стороне линии. После введения времён k , ε и n , ν уравнение (1.2) по-разному описывает функции $f_{x,cb}$ и $f_{y,cb}$:

$$f_{x,cb}(k+1, \varepsilon) - \lambda f_{x,cb}(k, \varepsilon) = 0, \quad (1.3)$$

$$f_{y,cb}(n+1, \nu) - \lambda f_{y,cb}(n, \nu) = 0. \quad (1.4)$$

Решения разностных уравнений (1.3) и (1.4) однотипны:

$$f_{x,cb}(k, \varepsilon) = f_{x,cb}(0, \varepsilon) \lambda^k, \quad (1.5)$$

$$f_{y,cb}(n, \nu) = f_{y,cb}(0, \nu) \lambda^n. \quad (1.6)$$

Полное описание переходного процесса в базисе двух функций

$$f_x(k, \varepsilon) = f_{x,уст}(k, \varepsilon) + f_{x,cb}(k, \varepsilon), \quad (1.7)$$

$$f_y(n, \nu) = f_{y,уст}(n, \nu) + f_{x,cb}(n, \nu), \quad (1.8)$$

где индекс «уст» обозначает установившуюся слагающую. Начальные функции определяются разностью функций текущего и установившегося режимов на начальном интервале

$$f_{x,cb}(0, \varepsilon) = f_x(0, \varepsilon) - f_{x,уст}(0, \varepsilon), \quad (1.9)$$

$$f_{y,cb}(0, \nu) = f_y(0, \nu) - f_{y,уст}(0, \nu). \quad (1.10)$$

Функция $f_x(0, \varepsilon)$ подлежит расчёту в послекоммутационной схеме, а $f_y(0, \nu)$ – в докоммутационной, так как противоположная сторона линии на своём начальном интервале пребывает все ещё в предшествующем режиме, описываемом функцией $f_{y,пд}(n, \nu)$, $n \leq 0$, отсюда

$$f_y(0, \nu) = f_{y,пд}(0, \nu). \quad (1.11)$$

В линии с постоянными источниками исчезает зависимость от локального времени, и решения (1.5)-(1.11) принимают вид

$$F_x(k) = F_{x,уст}(k) + (F_x(0) - F_{x,уст}(0)) \lambda^k, \quad (1.12)$$

$$F_y(n) = F_{y,уст}(n) + (F_{y,пд}(0) - F_{y,уст}(0)) \lambda^n. \quad (1.13)$$

В линии с синусоидальными источниками к подобному же эффекту приводит применение комплексного преобразования по локальному времени. Синусоидальный источник $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi)$ или $e'(t) = E_m \sin(\omega t' - \alpha + \psi)$, где $\alpha = \omega \tau$, в базисе двух функций k , ε или n , ν предстаёт в виде

$$e(k, \varepsilon) = E_m \sin(2\alpha(k + \varepsilon) + \psi) \quad (1.14)$$

или

$$e(n, \nu) = E_m \sin(2\alpha(n + \nu) - \alpha + \psi). \quad (1.15)$$

Комплексное преобразование по ε или ν освобождает описание источников (1.14) или (1.15) от непрерывных аргументов, сохраняя зависимость от дискретных аргументов:

$$\underline{E}_m(k) = E_m e^{j\psi} e^{j2\alpha k}, \quad (1.16)$$

$$\underline{E}_m(n) = E_m e^{j(\psi - \alpha)} e^{j2\alpha n}. \quad (1.17)$$

По аналогии с (1.14)–(1.17) функции установившегося режима

$$f_{x,\text{уст}}(k, \varepsilon) = F_{mx} \sin(2\alpha(k + \varepsilon) + \psi_x),$$

$$f_{y,\text{уст}}(n, \nu) = F_{my} \sin(2\alpha(n + \nu) + \psi_y)$$

преобразуются в комплексы

$$\underline{F}_{mx \text{ уст}}(k) = \underline{F}_{mx} \exp j2\alpha k,$$

$$\underline{F}_{my \text{ уст}}(n) = \underline{F}_{my} \exp j2\alpha n,$$

где $\underline{F}_{mx} = F_{mx} \angle \psi_x$, $\underline{F}_{my} = F_{my} \angle \psi_y$. В результате получаем описание переходных процессов комплексными функциями дискретного времени, формально аналогичными (1.12), (1.13):

$$\underline{F}_{mx}(k) = \underline{F}_{mx} e^{j2\alpha k} + (\underline{F}_{mx}(0) - \underline{F}_{mx}) \lambda^k, \quad (1.18)$$

$$\underline{F}_{my}(n) = \underline{F}_{my} e^{j2\alpha n} + (\underline{F}_{my,\text{пд}}(0) - \underline{F}_{my}) \lambda^n. \quad (1.19)$$

В приложении А приведены таблицы, в которые сведены примеры описания переходных процессов в линии с постоянным и переменным источниками.

1.3 Алгоритмическое моделирование

Полезную роль, как в теории, так и в приложениях сыграло разграничение моделей наблюдаемого объекта. Помимо класса имитационных моделей, воспроизводящих процессы, протекающие в реальном объекте, был введен класс алгоритмических моделей¹, предназначенных для распознавания его состояния по результатам наблюдения (текущая информация) и априорной информации о его структуре и параметрах². АМО представляет собой преобразователь наблюдаемых величин, полученных с помощью ИМО или на реальном объекте в месте установки защиты в величины, прогнозируемые в каком-либо другом месте наблюдаемой электрической сети. Одним из вариантов применения АМО является задача определения места повреждения (ОМП)³.

Разностная модель фидера. Двухпроводный отрезок цепи с распределёнными параметрами длиной l моделируется участком линии без потерь с удельными параметрами L^0 , C^0 и сосредоточенными на краях участка активными сопротивлениями $R^0l/2$ (рисунок 1.5а). Участок описывается парой разностных уравнений (1.1)⁴.

¹ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели электрических систем // Труды АЭН ЧР. – 1999. – №1-2. – С. 10-21.

² Бычков Ю.В., Васильев Д.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели в релейной защите // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26-31.

³ Лямец Ю.Я. и др. Диагностика линий электропередачи // Электротехн. микропроц. устр. и сист. Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та. – 1992. – С. 9-32.

⁴ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Эволюция дистанционной релейной защиты. – Электричество, 1999, №3, С. 8-15.

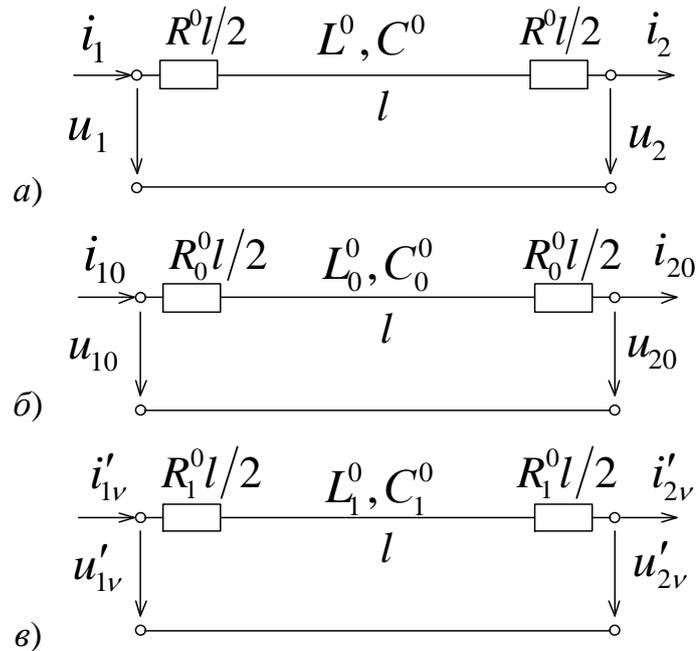


Рисунок 1.5 – Модели отрезка линии

a – двухпроводной линии; *б*, *в* – симметричного фидера; *б* – для составляющих нулевой последовательности, *в* – для безнулевых составляющих произвольной фазы ν

Симметричный фидер моделируется в системе нулевой и безнулевых (центрированных) составляющих¹ двумя двухпроводными моделями (рисунок 1.5*б* и 1.5*в*). Безнулевая составляющая получается из фазной величины путем устранения составляющей нулевой последовательности

$$u'_\nu = u_\nu - u_0, \quad i'_\nu = i_\nu - i_0,$$

где $\nu = A, B, C$ – обозначение произвольной фазы.

Из уравнений (1.1) следуют выражения обратной передачи, описывающие участок линии как элемент алгоритмической модели

$$\begin{aligned} u_2(t) &= (1/2R_B) \left[au_1(t+\tau) + bu_1(t-\tau) - a^2i_1(t+\tau) + b^2i_1(t-\tau) \right], \\ i_2(t) &= (1/2R_B) \left[-u_1(t+\tau) + u_1(t-\tau) + ai_1(t+\tau) + bi_1(t-\tau) \right]. \end{aligned} \quad (1.20)$$

¹ Лямец Ю.Я. К анализу переходных процессов в трёхфазных цепях методом симметричных составляющих. – Электричество, 1988, №12, с. 57-60.

Её входные сигналы $u_1(t)$, $i_1(t)$ подвергаются дискретизации с интервалом Δt , никак не связанным со временем пробега волны τ , вследствие чего после дискретизации возникает необходимость в интерполяции наблюдаемых величин¹.

Для более точного учета потерь линия может быть разделена на несколько равных участков, например, на два (рисунок 1.6). Подобная модель предусматривается и в имитационном программном комплексе Simulink. Что же касается алгоритмических моделей, то разбиение на равные участки длиной l означает всего лишь повторение преобразований (1.20) на каждом участке. То же положение справедливо и для неоднородного фидера, состоящего из каскадно соединенных однородных участков. В этом случае в формулах (1.20) для разных участков будут различаться параметры R_B , a , b и τ .

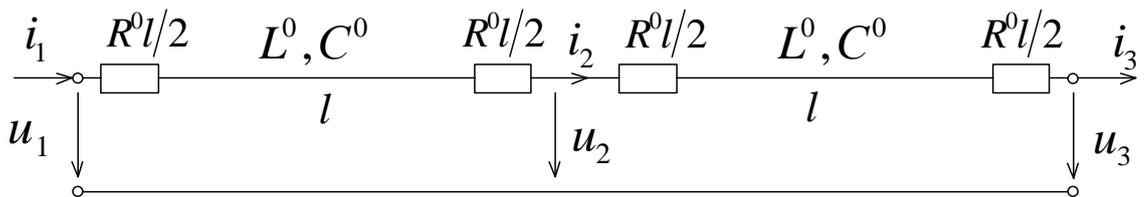


Рисунок 1.6 – Модель отрезка линии длиной $2l$

Алгоритмическая модель трехфазного симметричного фидера работает по двухканальной схеме с каналом нулевой последовательности и каналом безнулевых составляющих

$$u_{20}(t) = (1/2R_{B0}) \left[a_0 u_{10}(t + \tau_0) + b_0 u_{10}(t - \tau_0) - a_0^2 i_{10}(t + \tau_0) + b_0^2 i_{10}(t - \tau_0) \right],$$

$$i_{20}(t) = (1/2R_{B0}) \left[-u_{10}(t + \tau_0) + u_{10}(t - \tau_0) + a_0 i_{10}(t + \tau_0) + b_0 i_{10}(t - \tau_0) \right],$$

$$u'_{2v}(t) = (1/2R_{B1}) \left[a_1 u'_{1v}(t + \tau_1) + b_1 u'_{1v}(t - \tau_1) - a_1^2 i'_{1v}(t + \tau_1) + b_1^2 i'_{1v}(t - \tau_1) \right],$$

$$i'_{2v}(t) = (1/2R_{B1}) \left[-u'_{1v}(t + \tau_1) + u'_{1v}(t - \tau_1) + a_1 i'_{1v}(t + \tau_1) + b_1 i'_{1v}(t - \tau_1) \right],$$

¹ Белянин А.А., Лямец Ю.Я. Интерполяция процесса в электрической системе. – Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VIII Всеросс. научн.-техн. конф., Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та, 2012, С. 252-254.

где $R_{B0} = \sqrt{L_0^0/C_0^0}$, $a_0 = R_{B0} + R_0^0 l/2$, $b_0 = R_{B0} - R_0^0 l/2$, $\tau_0 = l\sqrt{L_0^0 C_0^0}$; $R_{B1} = \sqrt{L_1^0/C_1^0}$, $a_1 = R_{B1} + R_1^0 l/2$, $b_1 = R_{B1} - R_1^0 l/2$, $\tau_1 = l\sqrt{L_1^0 C_1^0}$; L_0^0 , C_0^0 , R_0^0 – удельные параметры нулевой последовательности, L_1^0 , C_1^0 , R_1^0 – прямой последовательности.

Интегро-дифференциальная модель фидера. Более общее решение задачи о преобразовании наблюдаемого напряжения $u_1(t)$ и тока $i_1(t)$ в величины $u_2(t)$ и $i_2(t)$ даёт метод наложения в сочетании с интегралом Дюамеля (рисунок 1.7). Одна из наблюдаемых величин рассматривается как наложение реакций на вторую наблюдаемую величину и на одну из выходных величин.

Модификации моделей различаются тем, какой из двух наблюдаемых величин отводится роль источника. В первой модификации роль источника отведена напряжению (рисунок 1.7б), и искомые величины описываются следующими интегральными уравнениями

$$u_2(0)y(t) + \int_0^t \frac{du_2(\xi)}{d\xi} y(t-\xi) d\xi = i_1(t) - i_{1КЗ}(t), \quad (1.21)$$

$$i_2(0)h_i(t) + \int_0^t \frac{di_2(\xi)}{d\xi} h_i(t-\xi) d\xi = i_1(t) - i_{1ХХ}(t). \quad (1.22)$$

Во второй модификации действует источник наблюдаемого тока (рисунок 1.7в). Соответствующие уравнения

$$u_2(0)h_u(t) + \int_0^t \frac{du_2(\xi)}{d\xi} h_u(t-\xi) d\xi = u_1(t) - u_{1КЗ}(t), \quad (1.23)$$

$$i_2(0)z(t) + \int_0^t \frac{di_2(\xi)}{d\xi} z(t-\xi) d\xi = u_1(t) - u_{1ХХ}(t), \quad (1.24)$$

где $y(t)$, $h_i(t)$, $h_u(t)$, $z(t)$ – переходные характеристики пассивного четырехполюсника Π при различных режимах его входа и выхода.

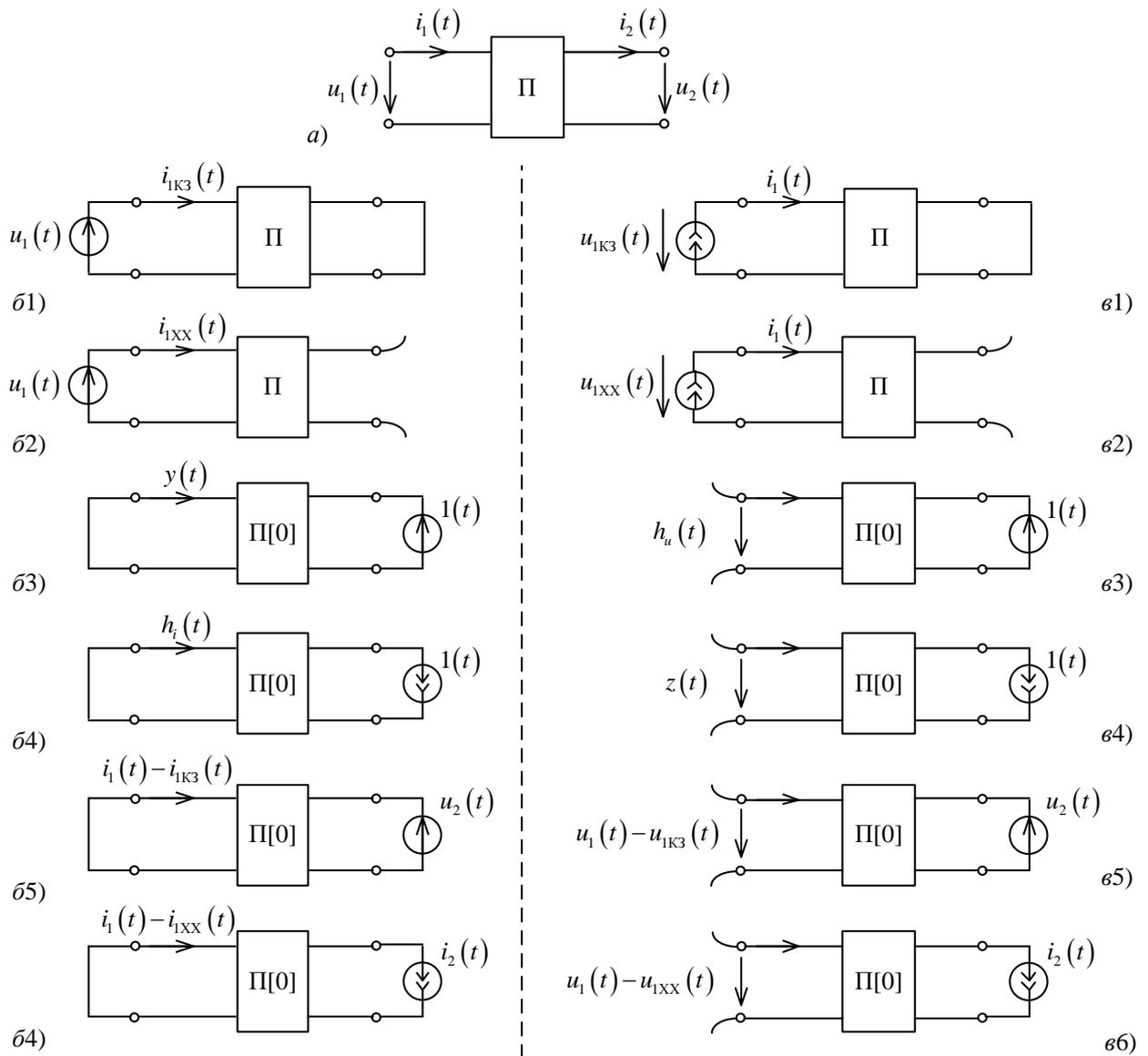


Рисунок 1.7 – Две модификации алгоритмических моделей двухпроводной системы

а – наблюдаемые входные величины и искомые выходные; *б*, *в* – первая и вторая модификации; Π – пассивный четырехполюсник при произвольных начальных условиях, $\Pi[0]$ – при нулевых начальных условиях; *б1*, *б2*; *в1*, *в2* – реакция системы с замкнутым или разомкнутым выходом на одну из наблюдаемых величин; *б3*, *б4*; *в3*, *в4* – определение переходных характеристик; *б5*, *б6*; *в5*, *в6* – разностные входные токи или напряжения как реакции на искомые выходные величины

Напряжение $u_2(t)$ описывается в равной мере уравнением (1.21) или же уравнением (1.23). Аналогично, ток $i_2(t)$ описывается либо уравнением (1.22), либо (1.24). Какому из уравнений каждой пары следует отдать предпочтение, зависит от поведения переходной характеристики. Желательно располагать

переходной характеристикой с резко возрастающей начальной частью. Рассмотрим это положение на примере уравнения (1.21), записав его для дискретного времени $k = \text{ent}(t/\Delta t)$ с заменой интегралов суммами, а производных – отношением приращений.

$$u_2(0)y(k) + \sum_{d=1}^k \Delta u_2(d)y(k-d) = i_1(k) - i_{1КЗ}(k), \quad (1.25)$$

где $\Delta u_2(d) = u_2(d) - u_2(d-1)$.

Из (1.25) следует рекуррентная формула

$$\Delta u_2(k)y(0) = i_1(k) - i_{1КЗ}(k) - u_2(0)y(k) - \sum_{d=1}^{k-1} \Delta u_2(d)y(k-d), \quad (1.26)$$

работающая только при том условии, что начальное значение $y(0)$ переходной характеристики имеет достаточную величину. Тогда при $k=0$

$$u_2(0)y(0) = i_1(0) - i_{1КЗ}(0),$$

при $k=1$

$$\Delta u_2(1)y(0) = i_1(1) - i_{1КЗ}(1) - u_2(0)y(1),$$

при $k=2$

$$\Delta u_2(2)y(0) = i_1(2) - i_{1КЗ}(2) - u_2(0)y(2) - \Delta u_2(1)y(1),$$

и т.д. Если $y(0) = 0$, то рекурсия начинается на шаг позднее

$$u_2(0)y(1) = i_1(1) - i_{1КЗ}(1),$$

$$\Delta u_2(1)y(1) = i_1(2) - i_{1КЗ}(2) - u_2(0)y(2),$$

$$\Delta u_2(2)y(1) = i_1(3) - i_{1КЗ}(3) - u_2(0)y(3) - \Delta u_2(1)y(2),$$

а при малости $y(1)$ отодвигается ещё на один шаг.

В отличие от разностной модели интегральная модель фидера не ограничена значениями его первичных параметров, что делает её более общей. К

тому же она позволяет учесть свойства земли как токопровода, имеющего собственную модель, резистивно-ёмкостную¹ или резистивно-индуктивную².

Дискретно-аналоговая алгоритмическая модель. До настоящего времени алгоритмические модели строились в одночастотном базисе, а именно для номинальной или реальной частоты сети. Дальнейшее развитие метода алгоритмических моделей позволило перевести модели в более общий временной базис. На этом пути встречается противоречие. Аналоговые модели функционируют в непрерывном времени t . Но имитационная модель наблюдается с частотой дискретизации f_d в дискретном времени $k = \text{ent}(f_d t)$. Результаты наблюдения предстоит перенести в алгоритмическую модель. Выделим подкласс дискретно-аналоговых моделей, продолжающих работать во времени t , но способны воспринимать воздействия, описываемые во времени k .

Введем еще понятие о функционально определенных алгоритмических моделях, режимы которых вполне определяются при задании пассивных параметров и введении источников в виде некоторого числа наблюдаемых величин, скажем, только напряжений или, может быть, только токов. Пример, иллюстрирующий постановку следующей задачи, приведён на рисунке 1.8.

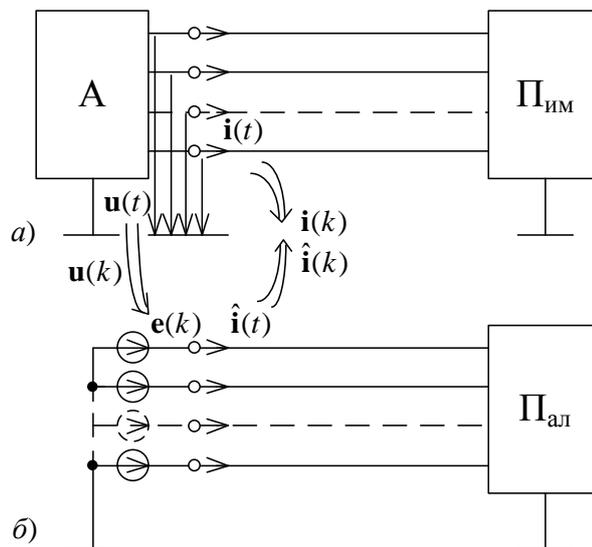


Рисунок 1.8 – Модели простейшей электропередачи с односторонним питанием
а – имитационная; б – дискретно-аналоговая алгоритмическая.

¹ Ступель А.И., Львов Ю.Н., Левина Л.С. Моделирование на ЦВМ частотных характеристик линий при расчете переходных процессов волновым методом // Электричество. – 1972. – №1. – С. 25-28.

² Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности // М.: Энергия. – 1978. – 191 с.

Наблюдается имитационная модель n -проводной сети с односторонним питанием. Сигналы имитационной модели – векторы токов $\mathbf{i}(t)$ и напряжений $\mathbf{u}(t)$ – регистрируются как функции дискретного времени $\mathbf{i}(k)$ и $\mathbf{u}(k)$. Имитационная модель состоит из активного n -полюсника A и пассивного $\Pi_{\text{ИМ}}$. Алгоритмическая модель функционально определена благодаря тому, что в нее введены ЭДС, вектор которых совпадает с вектором наблюдаемых напряжений: $\mathbf{e}(k) \equiv \mathbf{u}(k)$. Входящий в состав модели пассивный n -полюсник $\Pi_{\text{АЛ}}$ построен в соответствии с априорной информацией о нормальном режиме многополюсника $\Pi_{\text{ИМ}}$.

Что же касается аварийных параметров имитационной модели, таких как координата места повреждения $x_{f,\text{ИМ}}$ и переходные сопротивления $R_{f,\text{ИМ}}$, то информация о них скрыта от алгоритмической модели, где они вынужденно задаются произвольными значениями $x_{f,\text{АЛ}}$, $R_{f,\text{АЛ}}$.

К основным операциям, совершаемым алгоритмической моделью относятся интерполяция векторной функции дискретного аргумента $\mathbf{e}(k)$, расчет вектора $\hat{\mathbf{i}}(t)$ – реакции алгоритмической модели на воздействие интерполированной функции $\mathbf{e}(t)$ – и дискретизация вектора $\hat{\mathbf{i}}(t)$ с частотой f_d .

В данной модификации метода алгоритмических моделей результаты наблюдения имитационной модели оказываются разделенными пополам. Если наблюдаемые напряжения вводятся в алгоритмическую модель, то наблюдаемые токи используются только для проверки адекватности многополюсника $\Pi_{\text{АЛ}}$ многополюснику $\Pi_{\text{ИМ}}$. В качестве целевой функции может быть взята, например, усредненная сумма квадратов отклонений отсчетов токов $\mathbf{i}(k)$ и $\hat{\mathbf{i}}(k)$:

$$\sigma^2(x_{f,\text{АЛ}}, R_{f,\text{АЛ}}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (\mathbf{i}(k) - \hat{\mathbf{i}}(k))^T (\mathbf{i}(k) - \hat{\mathbf{i}}(k)) \rightarrow \min, \quad (1.27)$$

где $k=0$ – начало наблюдения аварийного процесса;
 $k=N-1$ – окончание наблюдения.

1.4 Нормальные и локальные информационные составляющие

Дальнейшее развитие идей дискретно-аналогового моделирования привело к обнаружению (совместно с Вороновым П.И.) новых информационных составляющих, названных нормальными и локальными, и, соответственно, нормального и локального режима наблюдаемого объекта¹. Исследования в данном направлении ведутся не только в России, но и в Китае². Рассмотрим далее связанные с ними информационные аспекты распознавания коротких замыканий, но сначала остановимся на принципиальных различиях нормального и предшествующего режимов, затем, как следствие, локального и чисто аварийного режимов.

Сопоставление моделей и режимов. Предположим, что модель системы разделяется относительно места наблюдения на активный A_1 и пассивный Π_2 многополюсники (рисунок 1.9а). Ведется полное наблюдение: регистрируются и ток, и напряжение каждого провода, $\mathbf{i}(t)$ и $\mathbf{u}(t)$ – векторы наблюдаемых величин. В момент $t = 0$ в неизвестном месте f многополюсника Π_2 происходит короткое замыкание; R_f – резистивная модель повреждения, $\mathbf{i}_f(t)$ – вектор неизвестных токов в месте замыкания; $\mathbf{i}_f(t) \equiv 0$ при $t < 0$. Момент замыкания разделяет наблюдаемый процесс на предшествующий и текущий:

$$\mathbf{i}(t), \mathbf{u}(t) = \begin{cases} \mathbf{i}_{\text{нд}}(t), \mathbf{u}_{\text{нд}}(t), & t < 0; \\ \mathbf{i}_{\text{тк}}(t), \mathbf{u}_{\text{тк}}(t), & t \geq 0. \end{cases}$$

Модель предшествующего режима действует до момента замыкания (рисунок 1.9б). Модель нормального режима активируется наблюдаемым напряжением $\mathbf{u}(t)$, она не ограничена временными рамками и никак не связана с моментом замыкания (рисунок 1.9в). Нормальный ток $\mathbf{i}_{\text{нм}}(t)$ представляет собой

¹ Лямец Ю.Я., Беянин А.А., Воронов П.И. Модификации аварийных составляющих наблюдаемых токов и напряжений. – Электротехника. – 2015 – № 2. – С. 22-28.

² Хо Д., Ли Ю., Ли Б., Сюе Ш. Новый принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения // Электричество. – 2015. – №2. – С. 17–22

реакцию многополюсника Π_2 на действие источника $\mathbf{u}(t)$. До замыкания нормальный режим совпадает с предшествующим

$$\mathbf{i}_{\text{нм}}(t) \equiv \mathbf{i}_{\text{нд}}(t), \quad t < 0,$$

но после замыкания нормальный ток не совпадает ни с какой из известных составляющих.

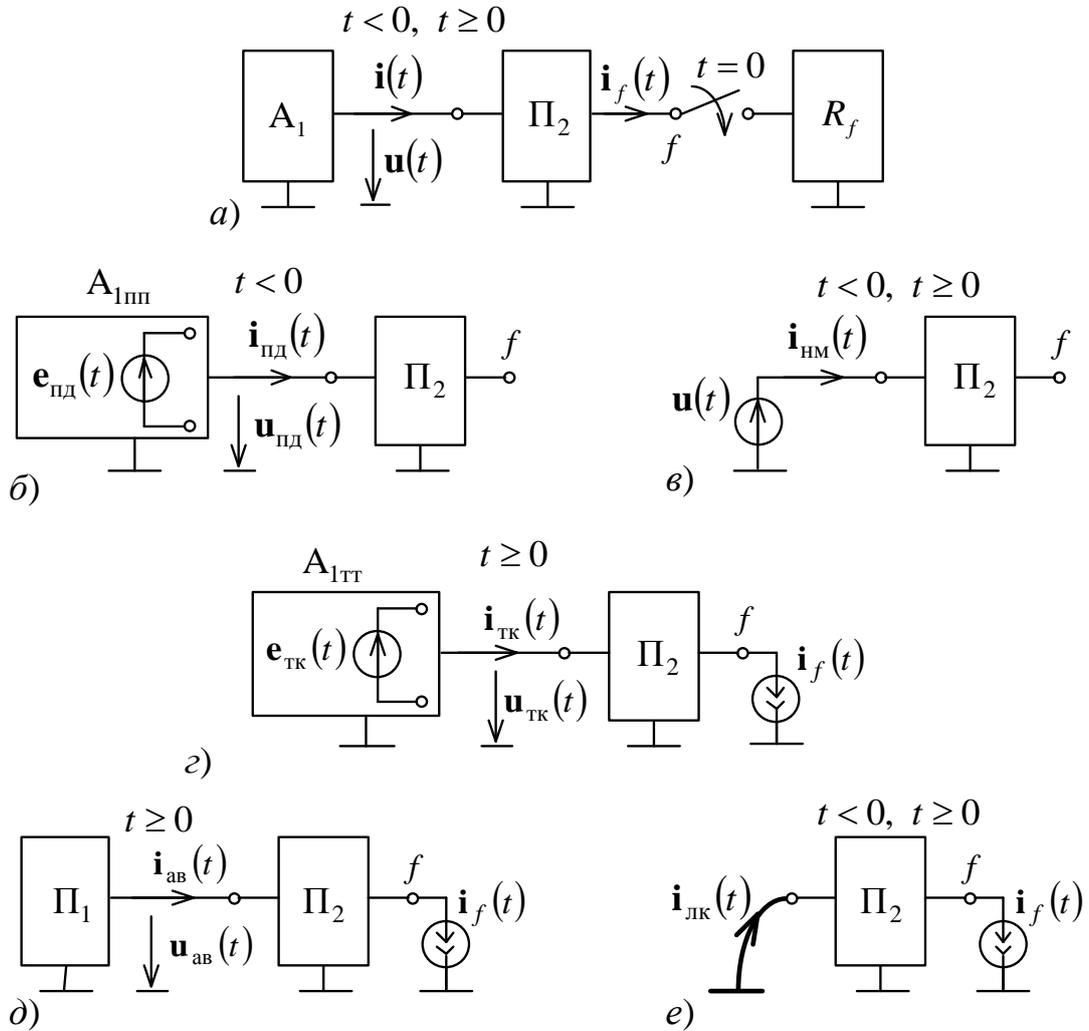


Рисунок 1.9 – Модели и режимы

a – наблюдаемая система, $b \dots e$ – режимы: b – предшествующий, c – нормальный, d – текущий, e – чисто аварийный, e – локальный

Источники в составе активного многополюсника A_1 в предшествующем и текущем режимах могут различаться; на рисунке 1.9б это вектор $\mathbf{e}_{\text{нд}}(t)$, а в текущем режиме – $\mathbf{e}_{\text{тк}}(t)$ (рисунок 1.9г). Модель чисто аварийного режима (рисунок 1.9д) строится при условии сохранения закона изменения источников после возникновения короткого замыкания

$$\mathbf{e}_{\text{тк}}(t) = \hat{\mathbf{e}}_{\text{пд}}(t), t \geq 0, \quad (1.28)$$

где $\hat{\mathbf{e}}_{\text{пд}}(t)$ – продолжение функции $\mathbf{e}_{\text{пд}}(t)$ на время текущего режима. Важно заметить, что аварийные составляющие определяются вне зависимости от выполнения этого условия. Достаточно наблюдений, и тогда

$$\mathbf{i}_{\text{ав}}(t) = \mathbf{i}_{\text{тк}}(t) - \hat{\mathbf{i}}_{\text{пд}}(t), \mathbf{u}_{\text{ав}}(t) = \mathbf{u}_{\text{тк}}(t) - \hat{\mathbf{u}}_{\text{пд}}(t), t \geq 0,$$

где $\hat{\mathbf{i}}_{\text{пд}}(t)$, $\hat{\mathbf{u}}_{\text{пд}}(t)$ – экстраполяция векторов $\mathbf{i}_{\text{пд}}(t)$, $\mathbf{u}_{\text{пд}}(t)$ на время после замыкания. Однако вне условия (1.28) в модель чисто аварийного режима неправомерно вводить пассивный многополюсник Π_1 , получаемый из A_1 устранением его источников.

Локальный ток представляет собой разность наблюдаемого и нормального токов

$$\mathbf{i}_{\text{лк}}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{\text{нм}}(t). \quad (1.29)$$

В модели локального режима на все места наблюдений напряжений накладываются шунты (рисунок 1.9e), вследствие чего многополюсник Π_2 утрачивает связь с активной частью A_1 общей модели. Отсюда следует, что локальный режим не зависит от условия (1.28). Кроме того, локальная составляющая, в отличие от аварийной, не требует для своего определения процедуры экстраполяции. При $t < 0$ и та, и другая составляющие имеют нулевой уровень, но при $t \geq 0$ они принципиально различаются.

Метод локализации места замыкания. Модель локального режима получилась весьма простой благодаря тому, что появившиеся в месте наблюдения шунты отключили от неё активную часть сети со всеми её источниками. Тот же подход может быть применён ещё неоднократно, но теперь уже по отношению к новой модели с зашунтированными входами, до тех пор, пока часть шунтов, перемещаясь вдоль повреждённых проводов, не попадёт в место замыкания f . В результате будет зашунтирован источник локального режима $\mathbf{i}_f(t)$, и на всех остальных входах модели обнулятся локальные токи.

Рассмотрим метод локализации на примере n -проводной электропередачи с синхронным двухсторонним наблюдением. Наблюдаются n -мерные векторы токов и напряжений $\mathbf{i}_s(t)$, $\mathbf{u}_s(t)$, $\mathbf{i}_r(t)$, $\mathbf{u}_r(t)$, где s и r – символы сторон электропередачи (рисунок 1.10а). Короткое замыкание происходит в момент времени $t=0$ в месте с неизвестной координатой x_f и сопровождается неизвестными токами, объединяемыми в вектор $\mathbf{i}_f(t)$, элементы которого – токи отдельных проводов. Неповрежденным проводам отвечают нулевые элементы.

Нормальный режим воспроизводится моделью неповрежденной электропередачи, находящейся под воздействием наблюдаемых напряжений $\mathbf{u}_s(t)$ и $\mathbf{u}_r(t)$ (рисунок 1.10б)¹. Реакцией модели являются векторы нормальных входных токов $\mathbf{i}_{shm}(t)$ и $\mathbf{i}_{rhm}(t)$. Векторы локальных токов следуют из определения (1.29):

$$\mathbf{i}_{слк}(t) = \mathbf{i}_s(t) - \mathbf{i}_{shm}(t), \mathbf{i}_{рлк}(t) = \mathbf{i}_r(t) - \mathbf{i}_{rhm}(t).$$

Как видно из модели электропередачи в локальном режиме (рисунок 1.10в), векторы $\mathbf{i}_{слк}(t)$ и $\mathbf{i}_{рлк}(t)$ создаются неизвестным вектором $\mathbf{i}_f(t)$. Имеется возможность перенести шунты из начала линии в любое место $x_s \leq x_r$ или из конца линии в любое место $x_s \geq x_r$. Рисунок 1.10г иллюстрирует первый этап процедуры переноса шунтов из начала линии. Локальный ток начала линии $\mathbf{i}_{слк}(t)$ преобразуется в ток $\mathbf{i}(t, x_s)$ и напряжение $\mathbf{u}(t, x_s)$ ², действующие в произвольном месте x_s и играющие роль квазинаблюдаемых величин для остающейся части электропередачи с местом повреждения x_f и зашунтированным концом $x=l$. Новый нормальный режим воспроизводится путем подачи напряжения $\mathbf{u}(t, x_s)$ на вход x_s усеченной модели (рисунок 1.10д). Модель реагирует нормальным током

¹ Лямец Ю.Я., Беянин А.А. Описание линии 6-35 кВ при распознавании замыкания на землю в распределительной сети. – Электротехника, 2014, № 3, С. 2-7.

² Лямец Ю.Я., Беянин А.А., Воронов П.И. Алгоритмическое моделирование фидера в переходном режиме. – Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 5, С. 49-56.

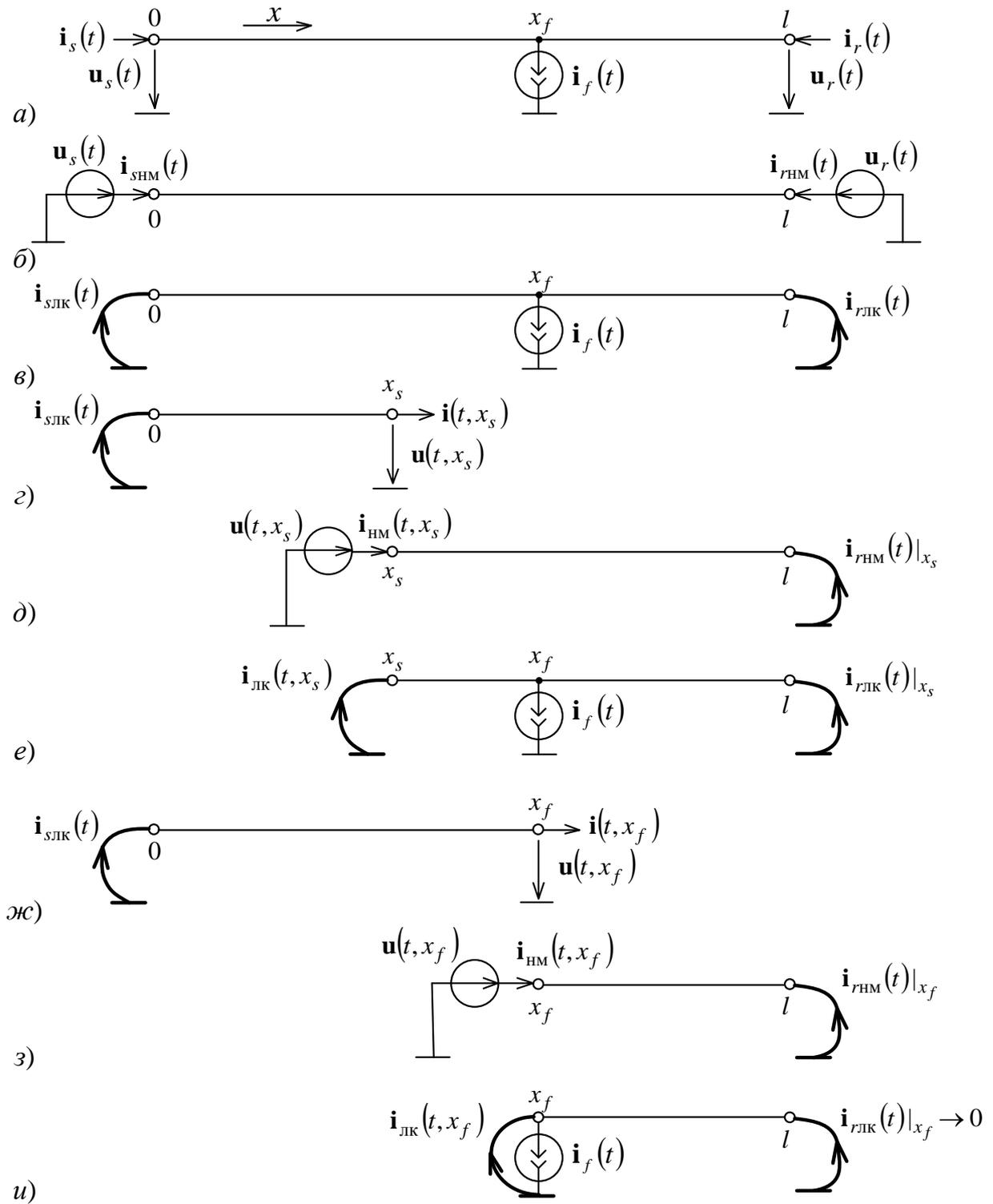


Рисунок 1.10 – Иллюстрация процедуры локализации места замыкания $i_{HM}(t, x_s)$ на входе усечённой модели и нормальным током $i_{rHM}(t)|_{x_s}$ на выходе. В последнем обозначении координата x_s указывает на перенос шунтов в место x_s , хотя сама реакция определяется в прежних шунтах конца электропередачи.

Новый локальный режим возникает в усечённой модели (рисунок 1.10e), на входе и выходе которой известны локальные токи

$$\mathbf{i}_{\text{лк}}(t, x_s) = \mathbf{i}(t, x_s) - \mathbf{i}_{\text{нм}}(t, x_s), \quad \mathbf{i}_{\text{рлк}}(t)|_{x_s} = \mathbf{i}_{\text{рлк}}(t) - \mathbf{i}_{\text{нм}}(t)|_{x_s}.$$

1.5 Выводы

1. Наиболее перспективным алгоритмом индивидуальной защиты фидера от замыканий на землю является анализ переходного процесса, возникающего при появлении ОЗЗ в сети.

2. Подходящим методом анализа переходных процессов в фидере является описание процессов функциями дискретного и непрерывного времени. В этом случае система описывается разностными уравнениями по дискретному аргументу и алгебраическими или дифференциальными – по локальному непрерывному.

3. Разработаны алгоритмические модели фидера распределительной сети в переходном режиме, позволяющие преобразовывать мгновенные значения наблюдаемых величин.

4. Раскрыта физическая сущность локального режима полностью наблюдаемой сети (регистрация и токов, и напряжений) и разработана методика построения модели объекта в локальном режиме.

ГЛАВА 2 ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Информационная достаточность нулевой последовательности для защиты от однофазных замыканий в распределительных сетях хорошо известна¹. Она обоснована теоретическим анализом, разработками реле защиты и опытом их эксплуатации, в том числе микропроцессорных реле с функцией регистрации тока и напряжения нулевой последовательности². Интерес к алгоритмическим моделям в значительной степени обусловлен возможностью их реализации в терминалах релейной защиты и программных комплексах, создаваемых для анализа аномальных ситуаций в электрических сетях.

2.1 Критерии исправного состояния фидера

Если электромагнитная связь между фидерами незначительна, то имеется возможность контролировать исправность каждого фидера в отдельности с помощью его собственной алгоритмической модели для составляющих нулевой последовательности. О состоянии фидера можно судить по уровню тока нулевой последовательности на выходе его алгоритмической модели.

Рассмотрим применение данного критерия на иллюстративном примере, в связи с чем параметры ИМО распределительной сети, представленной на рисунке 2.1, и, как следствие, параметры алгоритмических моделей фидеров полагаются константами. Моделируется двухфидерная сеть, в которой в момент $t_0 = 0,05$ с произошло замыкание на землю. Величинам неповрежденного фидера присвоен верхний индекс a , повреждённого – b . Фидеры приняты одинаковыми. Параметры имитационной модели: линейное напряжение на шинах – 10 кВ, комплексная мощность нагрузки $\underline{S} = 4,67 \text{ МВт} + j1,50 \text{ МВАр}$, удельные параметры нулевой последовательности (для кабеля) $L_0^0 = 4,5 \text{ мГн/км}$, $C_0^0 = 400 \text{ нФ/км}$, $R_0^0 = 0,67 \text{ Ом/км}$, длина фидера $l = 20 \text{ км}$, координата места замыкания

1 Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 246 с.

2 Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю. – Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №03(08). – С. 50-57.

$x_f = 10$ км, переходное сопротивление $R_f = 5$ Ом. Наблюдаемые величины – напряжение и токи нулевой последовательности $u_0(t)$, $i_{10}^a(t)$, $i_{10}^b(t)$ – формируются путём двухэтапного моделирования с линейной интерполяцией дискретных величин на каждом этапе. На первом этапе применялся программный комплекс Simulink, максимальный шаг моделирования устанавливался равным 10^{-7} с. В этом комплексе модель фидера и её описание совпадают со схемой рисунка 1.6 и уравнениями (1.1), в чем можно убедиться, подставляя величины, сформированные на первом этапе, в формулу (1.20). Проверка показывает, что ток $i_{10}^a(t)$ на выходе неповреждённого фидера находится на нулевом уровне, следовательно, имитационная модель действует в точном соответствии с разностными уравнениями длинной линии. На втором этапе моделирования сформированные величины подвергались дискретизации с частотой 16 кГц и затем вновь применялась линейная интерполяция. Получаемые в итоге аналоговые величины, графики которых приведены на рисунке 2.2, предназначаются для передачи в алгоритмическую модель. Если она чувствительна к шумам, порождаемым интерполяцией, то аналоговые величины придется предварительно пропустить через фильтр нижних частот.

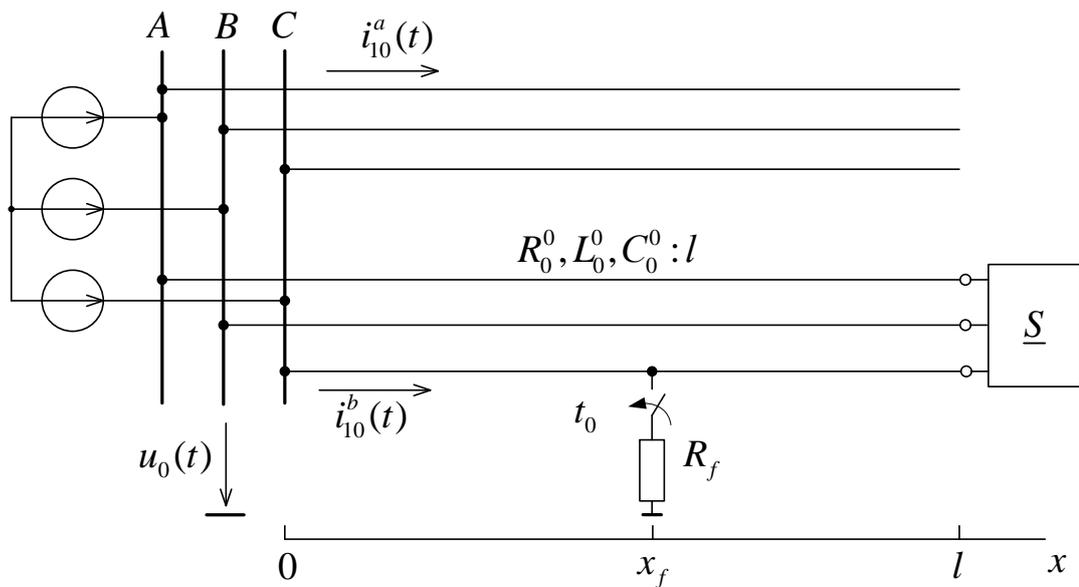


Рисунок 2.1 – Имитационная модель распределительной сети

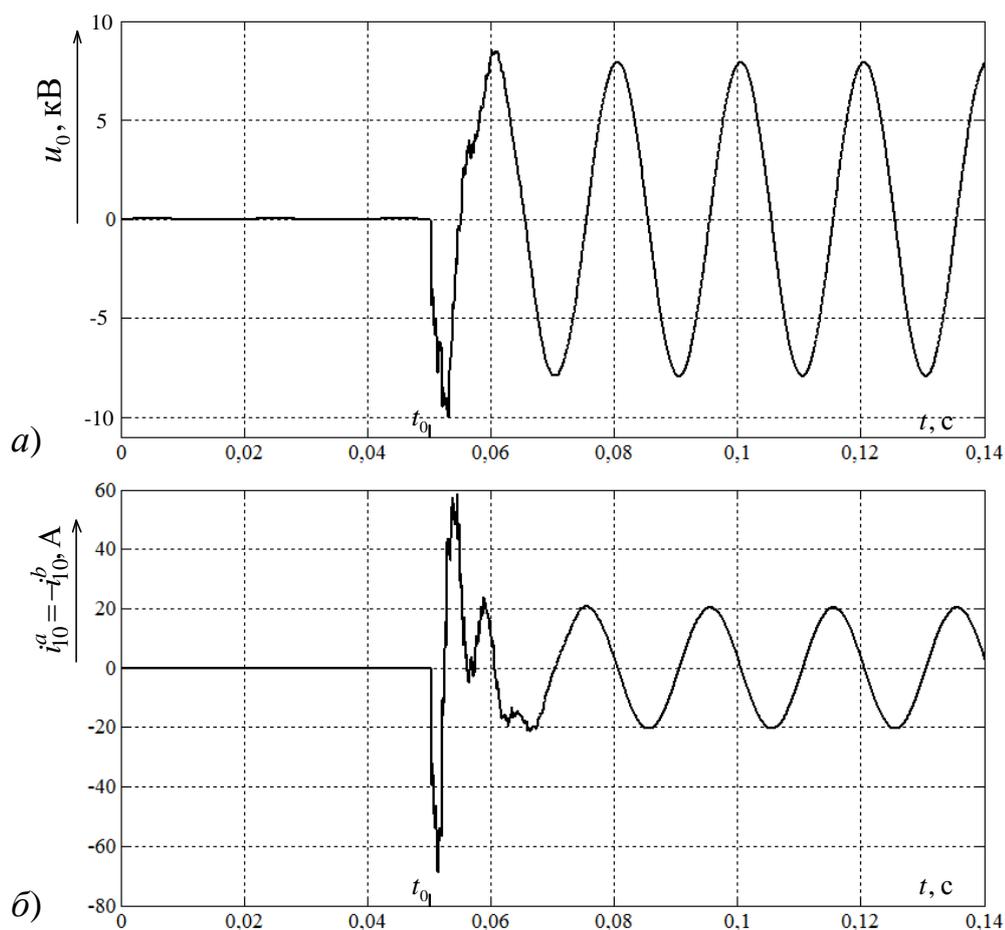


Рисунок 2.2 – Графики наблюдаемых величин

Применение разностной модели. Выходные сигналы этих моделей $i_{10}^a(t)$ и $i_{10}^b(t)$ определяются по алгоритму (1.20) при учете потерь по схеме рисунка 1.6. Для входных сигналов по рисунку 2.2 выходные сигналы показаны на рисунке 2.3. Высокий уровень выходного сигнала $i_{10}^b(t)$ алгоритмической модели повреждённого фидера говорит о её несоответствии реальному состоянию контролируемого объекта, т.е. указывает на его повреждение. Что же касается небаланса сигнала $i_{10}^a(t)$ на выходе неповреждённого фидера, то он объясняется влиянием верхнечастотной части спектра входных сигналов, создаваемой линейной интерполяцией входных величин в переходном процессе. Установка на входах алгоритмической модели аналоговых RC -фильтров первого порядка с частотой среза 1 кГц понижает уровень небаланса более чем в три раза (рисунок 2.3а и б).

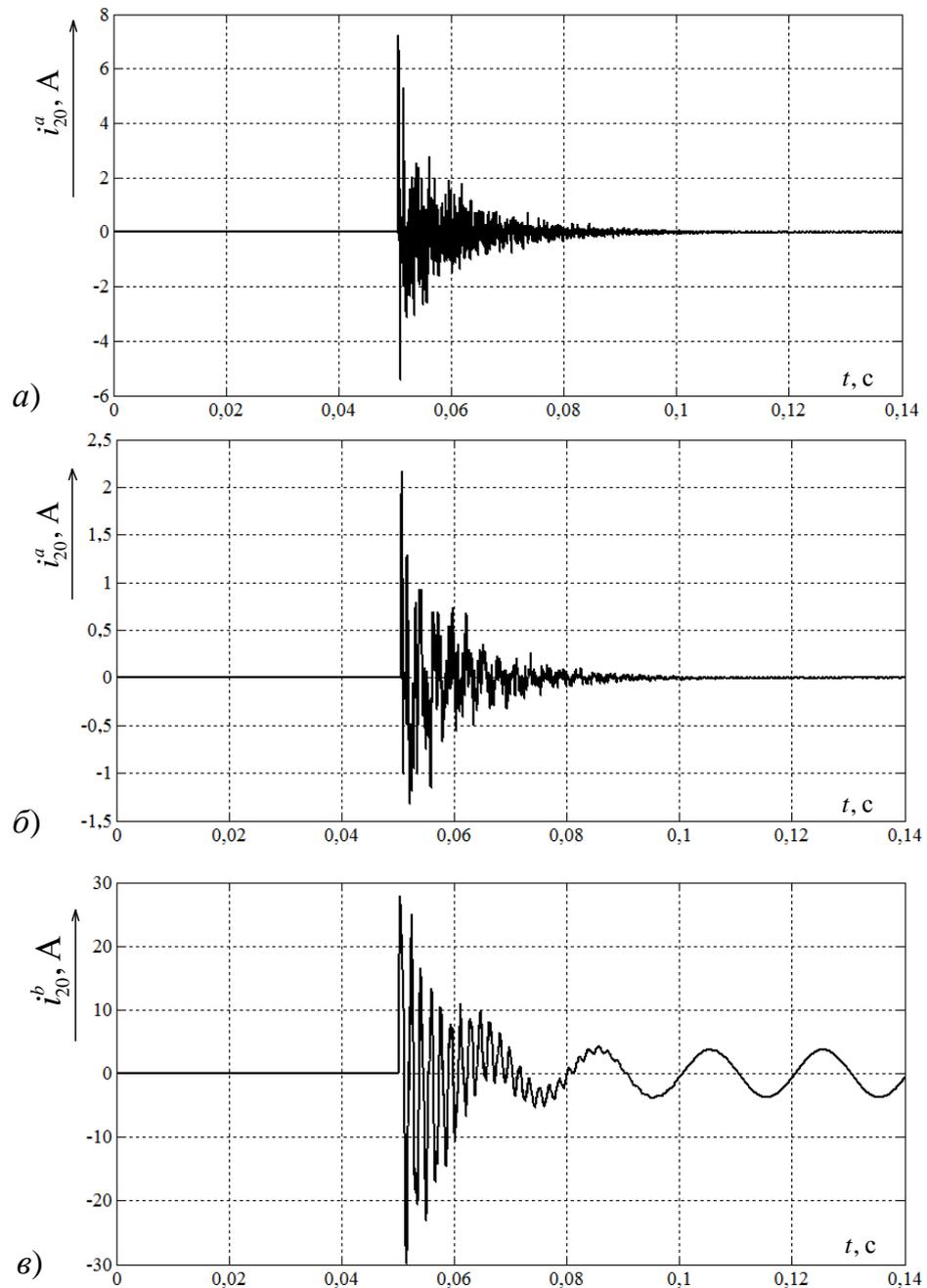


Рисунок 2.3 – Токи нулевой последовательности на выходе разностных алгоритмических моделей двух фидеров
a, б – реально неповреждённого; *a* – без фильтрации входных сигналов, *б* – с фильтрацией; *в* – реально повреждённого

Применение интегральных моделей. Для расчёта тока $i_2(t)$ применялось уравнение (1.22), которое по аналогии с цепочкой (1.21), (1.25) и (1.26) приводит к рекурсивному соотношению

$$\Delta i_2(k) h_i(0) = i_1(k) - i_{1XX}(k) - i_2(0) h_i(k) - \sum_{d=1}^{k-1} \Delta i_2(d) h_i(k-d), \quad (2.1)$$

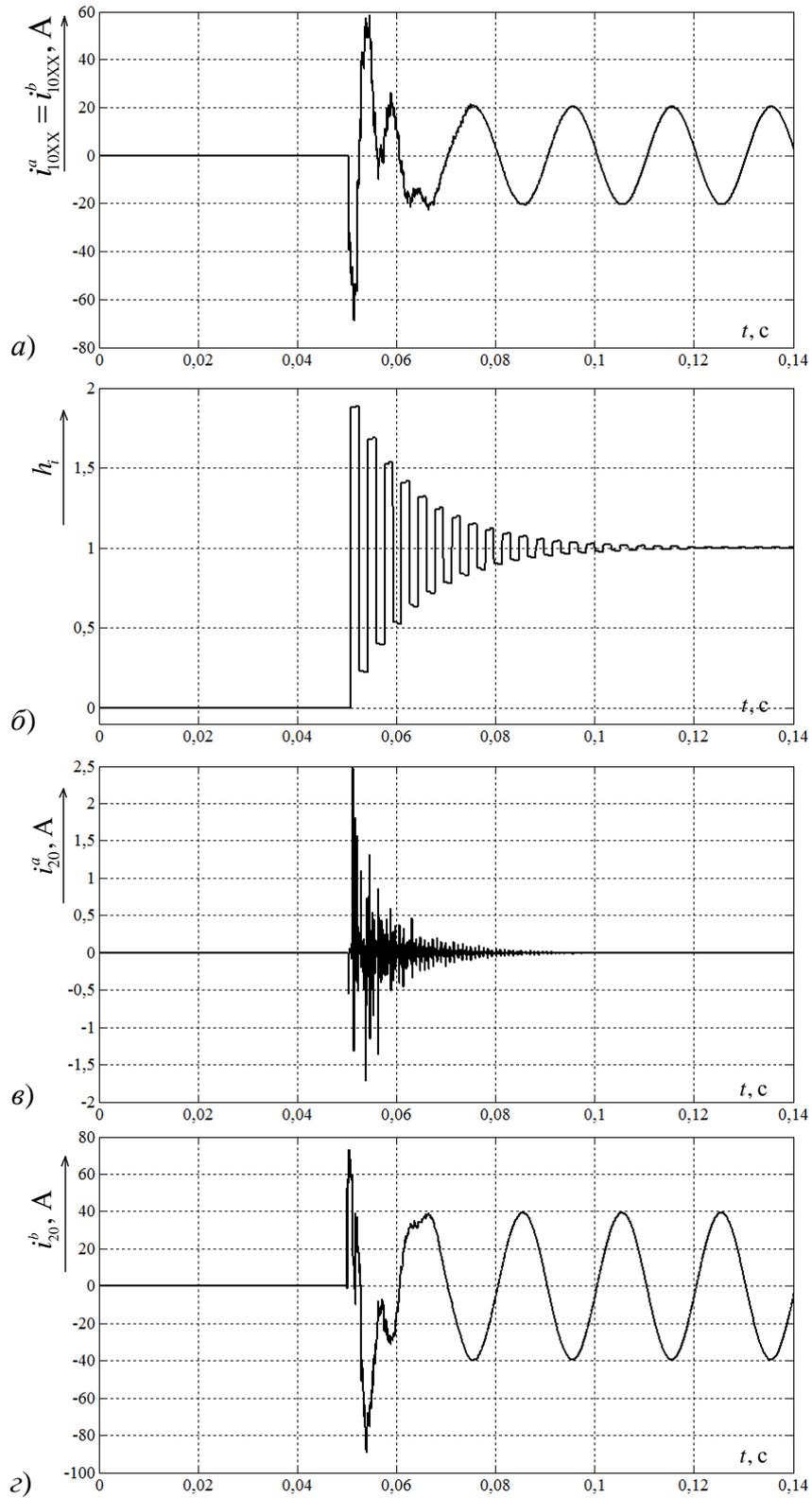


Рисунок 2.4 – Результаты действия моделей, построенных с помощью интегральных уравнений

a – ток холостого хода фидера; $б$ – переходная характеристика; $в, г$ – токи нулевой последовательности на выходе алгоритмических моделей двух фидеров, $в$ – реально неповреждённого, $г$ – реально повреждённого

Входящие в него функции $i_{1xx}(k)$ и $h_i(k)$ подлежат расчёту в схемах рисунка 1.762 и рисунка 1.764, которые моделировались в программном комплексе Simulink.

Результаты действия этих двух моделей, составленных для величин нулевой последовательности, и алгоритма (2.1) приведены на рисунке 2.4. Заметим, что в данном случае интегрирующие свойства моделей избавили от необходимости фильтровать входные сигналы.

2.2 Использование нормального режима наблюдаемого объекта

Обнаруженные нормальный и локальный режимы наблюдаемого объекта позволили по-новому взглянуть на проблему определения повреждённого фидера. О состоянии каждого фидера можно судить, сопоставляя наблюдаемый ток нулевой последовательности в начале фидера и нормальный ток, определяемый в модели нулевой последовательности. В случае если фидер не поврежден, будет иметь место небольшое различие токов, обусловленное погрешностями интерполяции и неадекватностью модели объекта. В случае если фидер поврежден, между токами будет наблюдаться принципиальное различие.

Рассмотрим данный критерий на базе описанного выше примера. Модель неповрежденного фидера по нулевой последовательности представляет собой двухпроводную длинную линию с разомкнутым концом. На основе разностных уравнений (1.1) при помощи Z -преобразования¹ с учетом граничного условия можно получить описание модели неповрежденного фидера, которое применительно к задаче контроля фидера как в установившемся, так и в переходном режиме, записано ниже в виде рекуррентной формулы нормального тока, оцениваемого в качестве реакции на наблюдаемое напряжение $u_0(t)$:

¹ Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z -преобразования. – Изд. – во «Наука», 1971. – 288 с.

$$i_{0\text{HM}}(t) = \frac{1}{a_0} \left[u_0(t) - \frac{a_0 - b_0}{a_0} u_0(t - \tau_0) - \frac{b_0}{a_0} u_0(t - 2\tau_0) \right] + \frac{1}{a_0^2} \left[(a_0 - b_0)^2 i_{0\text{HM}}(t - \tau_0) + b_0^2 i_{0\text{HM}}(t - 2\tau_0) \right]. \quad (2.2)$$

Результаты наблюдений (рисунок 2.2) подвергаются дискретизации с частотой f_d и последующей линейной интерполяции. Нормальный ток каждого фидера, оцениваемый по алгоритму (2.2), сравнивается далее с соответствующим наблюдаемым током.

На рисунке 2.5 $i_0^a(t)$ и $i_0^b(t)$ – наблюдаемые токи нулевой последовательности после их записи в имитационной модели, дискретизации и линейной интерполяции, а $i_{0\text{HM}}^a(t)$ и $i_{0\text{HM}}^b(t)$ – те же токи, но определенные рекуррентно в соответствии с (2.2) по напряжению $u_0(t)$, также подвергнутому дискретизации и линейной интерполяции. Расхождение между токами $i_0^a(t)$ и $i_{0\text{HM}}^a(t)$ в масштабе рисунка 2.5 оказалось неощутимым. Что же касается поврежденного фидера, то здесь токи $i_0^b(t)$ и $i_{0\text{HM}}^b(t)$ оказываются разнонаправленными. Обнаруженные признаки обусловлены тем, что алгоритм (2.2) адекватен модели неповрежденного фидера и неадекватен модели того фидера, в котором произошло замыкание вне зависимости от места замыкания на землю и от переходного сопротивления в месте замыкания, что иллюстрируется рисунком 2.6. Аналогичная картина наблюдается при увеличении количества присоединений или при изменении первичных параметров любого из присоединений (рисунок 2.7а). Таким образом, в сети с изолированной нейтралью сравниваемые токи отличаются как по уровню, так и по фазе.

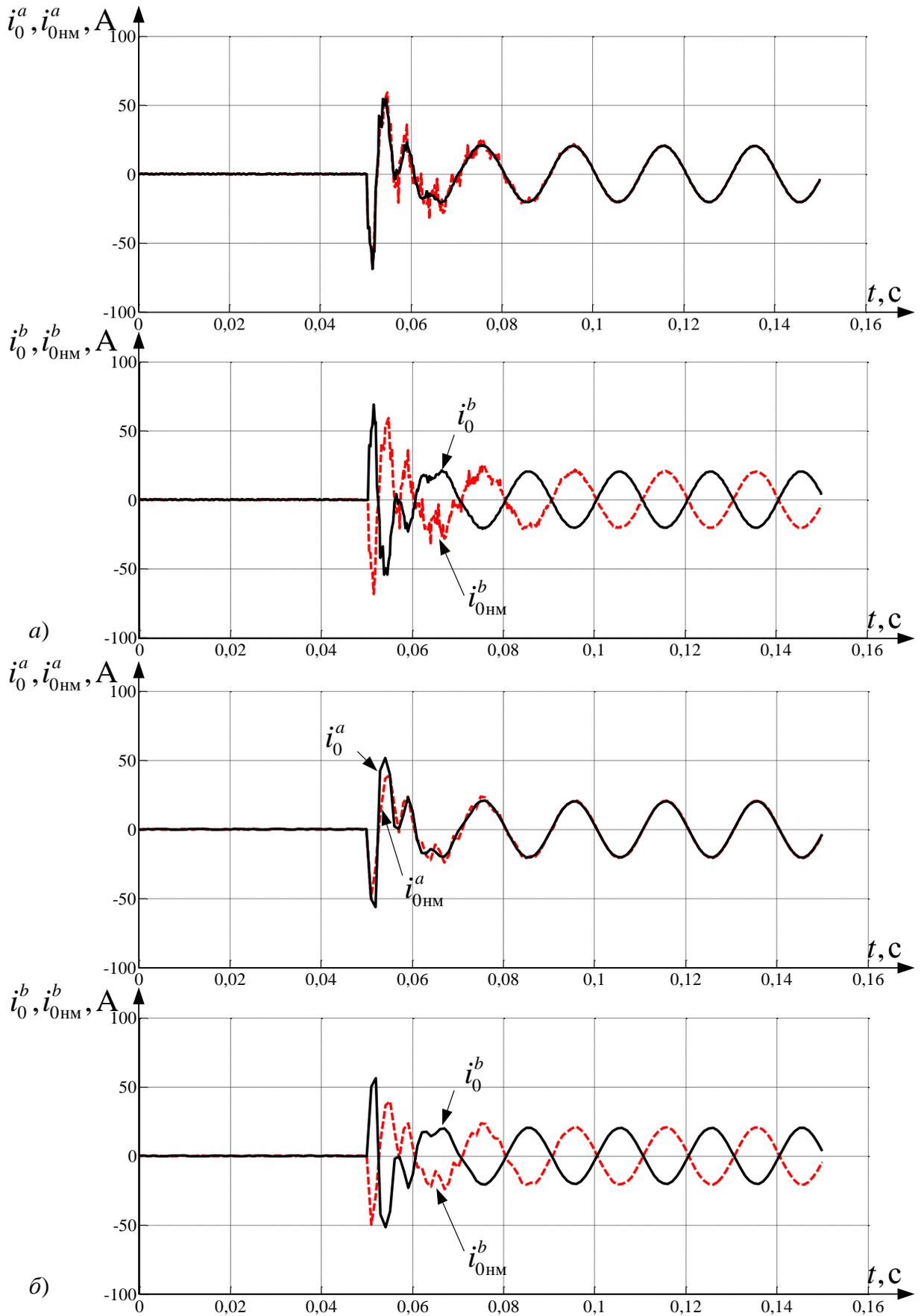


Рисунок 2.5 – Сравнение наблюдаемого и нормального токов: *a* – для частоты дискретизации $f_d = 4$ кГц; *б* – для $f_d = 1$ кГц

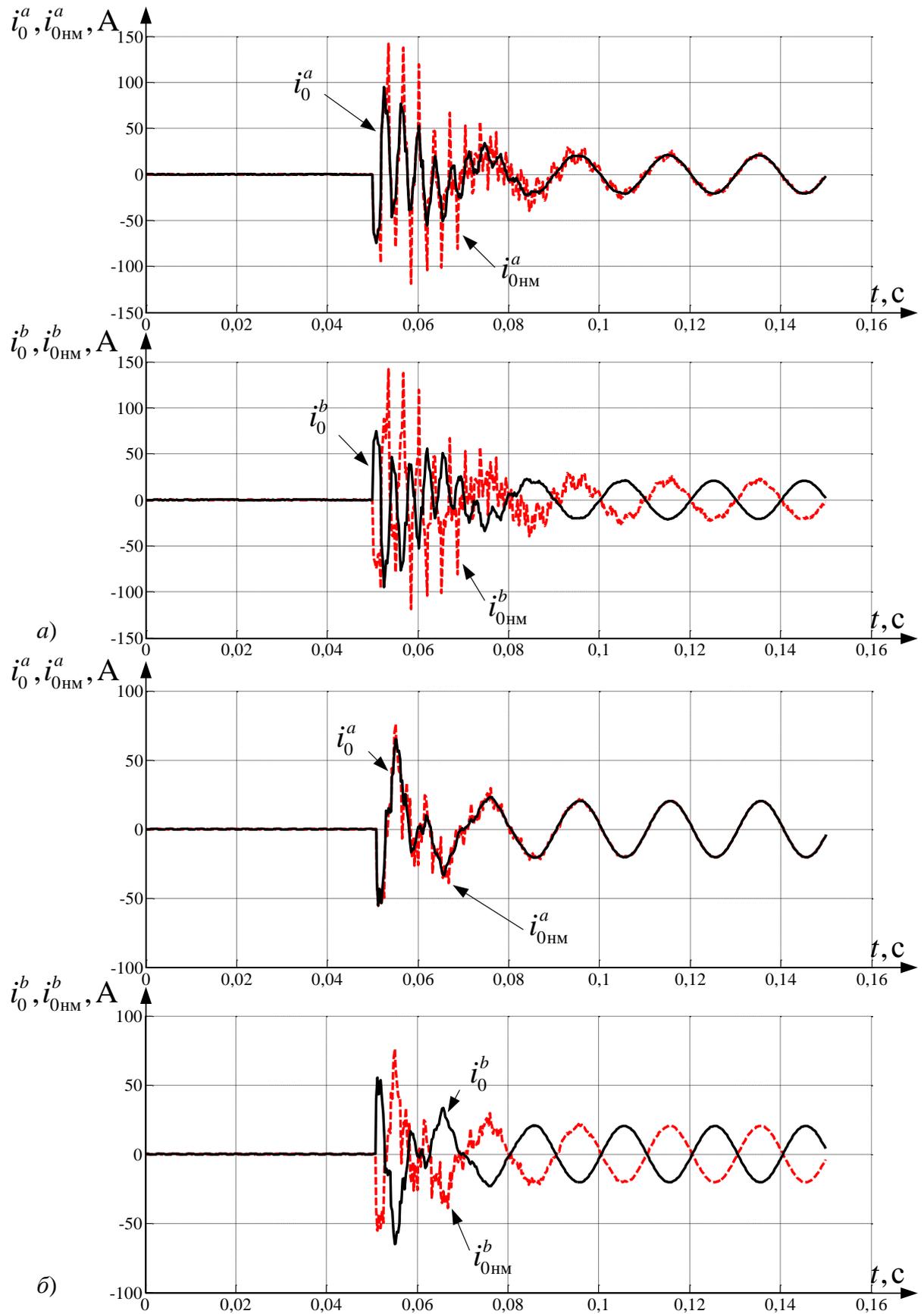


Рисунок 2.6 – Сравнение наблюдаемого и нормального токов для частоты дискретизации $f_d = 4$ кГц: а – $x_f = 0,5$ км, $R_f = 0,5$ Ом; б – $x_f = 19$ км, $R_f = 2$ Ом

В сети с компенсацией тока замыкания на землю ситуация несколько сложнее. В режимах недокомпенсации и полной компенсации ситуация аналогична рассмотренной выше и сравниваемые токи различаются как по уровню, так и по фазе. Но в режиме перекомпенсации может наблюдаться полное совпадение токов в установившемся режиме, однако в переходном также будет наблюдаться принципиальное различие. Пример реализации такого критерия для сети с перекомпенсацией представлен на рисунке 2.7б.

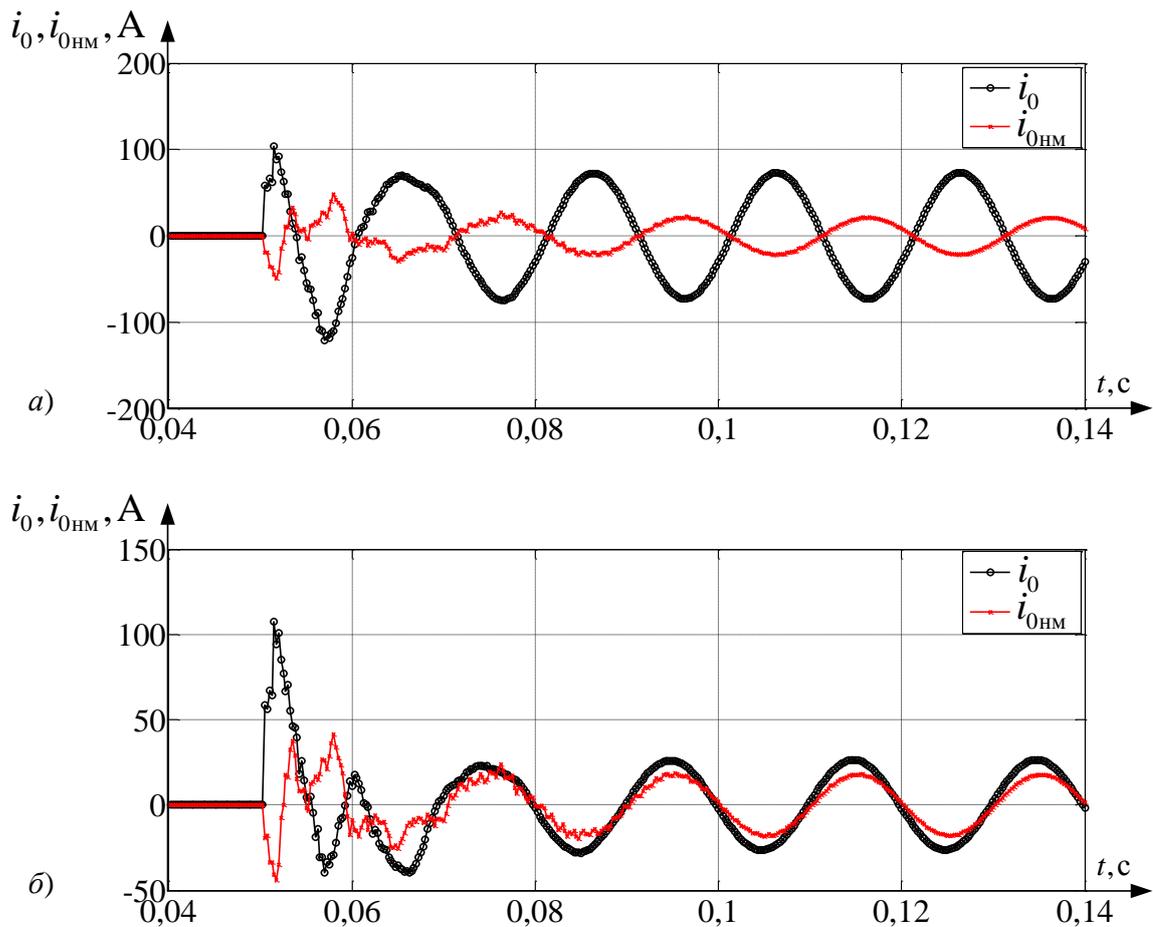


Рисунок 2.7 – Сравнение наблюдаемого и нормального токов:
 а – в сети с изолированной нейтралью, б – в сети с ДГР

2.3 Использование локального режима наблюдаемого объекта

Наиболее общий подход к определению повреждённого присоединения несут в себе модели локальных режимов. В случае одностороннего наблюдения можно построить модель локального режима для нулевой последовательности и по локальным токам распознать замыкание на фидере. В модели локального

режима (рисунок 2.8) шунт в месте наблюдения освобождает неповрежденный фидер a от влияния источника тока i_f в месте повреждения.

На рисунке 2.9 показаны локальные токи двухфидерной сети с изолированной нейтралью при устойчивом замыкании на землю. Значительный уровень тока на фидере b свидетельствует о его повреждении. В случае неустойчивых замыканий значительный уровень тока будет наблюдаться только во время существования замыкания. Так как локальные и нормальные токи неразрывно связаны, в сети с компенсацией тока замыкания на землю наблюдается аналогичная ситуация. В режимах недокомпенсации и полной компенсации сохраняется установленная закономерность. В режиме перекомпенсации может наблюдаться нулевой уровень локального тока в установившемся режиме, как на неповрежденном, так и на поврежденном присоединении, однако во время переходного процесса на поврежденном фидере будет наблюдаться значительный уровень локального тока, в то время как на неповрежденном сохранится нулевой уровень.

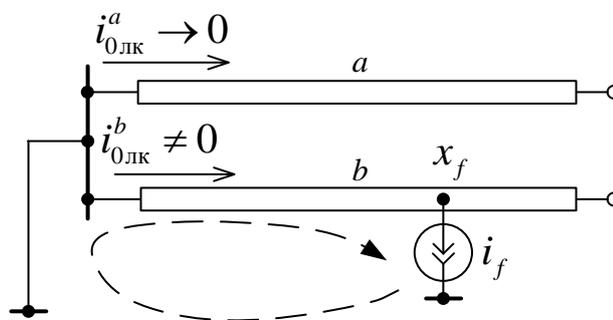


Рисунок 2.8 – Модель локального режима двухфидерной сети в режиме ОЗЗ

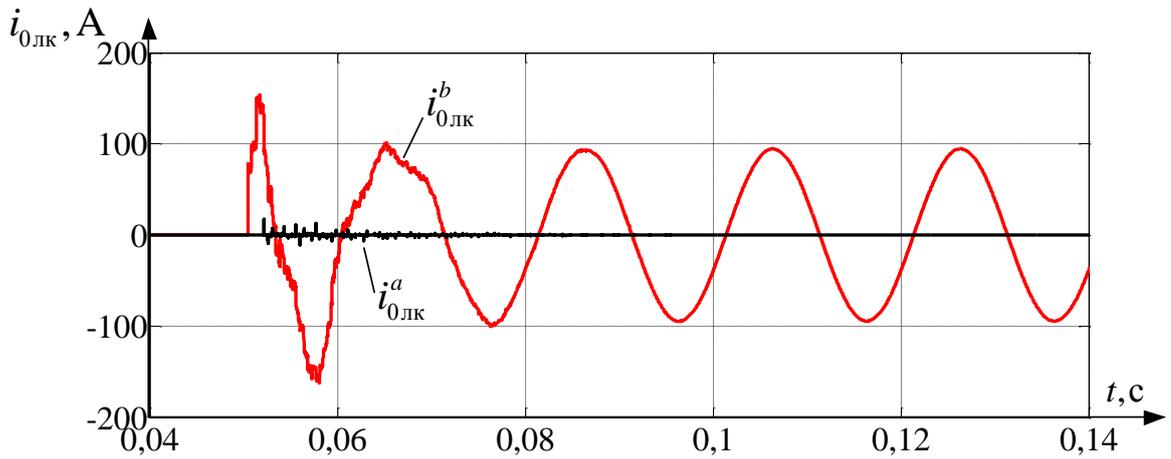


Рисунок 2.9 – Локальные токи двухфидерной сети в режиме ОЗЗ

Опираясь на установленные признаки, можно построить плоскость замеров, позволяющую разделить замеры неповрежденного и поврежденного фидера (рисунок 2.10). В качестве её координат выступают текущие среднеквадратические величины наблюдаемого тока (по оси ординат) и локального тока (по оси абсцисс). Величины могут определяться на всем протяжении процесса для сетей с изолированной нейтралью либо на окне, соответствующем переходному процессу. На плоскости представлены замеры для различных замыканий фидера на землю; варьировались место замыкания и переходное сопротивление. На основе данной плоскости может быть реализована характеристика срабатывания защиты от замыканий на землю.

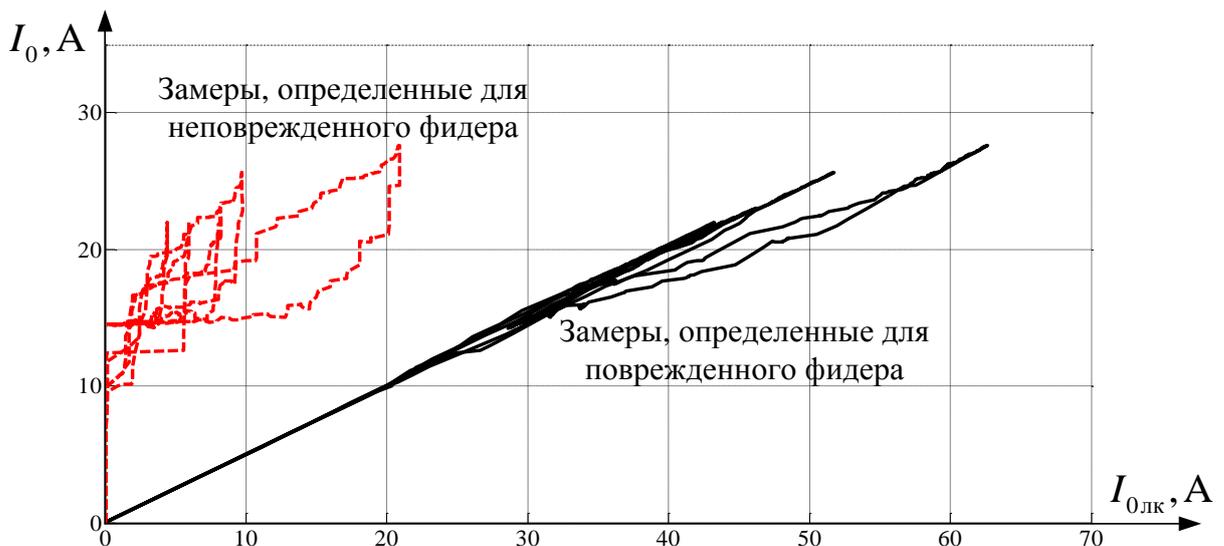


Рисунок 2.10 – Плоскость замеров защиты, среднеквадратические замеры взяты на текущем интервале в 40 мс.

2.4 Определение поврежденного участка разветвленной сети

Увеличение информационной базы, а именно привлечение результатов наблюдения со всех сторон, позволяет решить более общую задачу – определение поврежденного участка разветвленной сети. Процесс поиска участка с повреждением производится методом локализации поэтапно с постепенным исключением неповрежденных частей и укорочением модели сети. Всякий раз, когда шунт, перемещаясь от входа модели к одному из выходов, попадает на очередной узел, из всех неповрежденных ветвей этого узла устраняются локальные токи, и лишь в той ветви, которая сама повреждена либо ведет к месту повреждения, обнаруживается локальный ток ненулевого уровня. Разумеется, недостаточно знать путь, ведущий к месту повреждения. Надлежит вычленивать из общего направления истинно поврежденный участок. Именно по этой причине приходится наблюдать сеть не только на входе, но и на выходах. Если на своем пути к очередному узлу шунт перейдет через место замыкания, то на всех выходах ветвей, идущих от этого узла, обнаружатся ненулевые локальные токи, что прямо указывает на повреждение ветви, по которой перемещался шунт.

Более конкретно поясним на примере. На рисунке Б.1 приведена структурная схема наблюдаемой распределительной сети, включающая в себя подстанцию 1, питающую общие шины 2, показанные в однолинейном варианте. От общих шин отходят фидеры 3-5. Фидеры разветвляются. Подробно показано ветвление фидера 3, потому что на его ответвлении 8 произошло замыкание в месте с координатой x_f . Замыкание сопровождается током i_f . От фидера 3 отходят ветви 6 и 7, а от каждой ветви – ещё по три ответвления: 8-10 от ветви 6 и 11-13 от ветви 7. В структуру фидеров с их ветвями и ответвлениями входят узлы 14-16. Местам наблюдения присвоены индексы a, b, c, d, e , первые три – на входах фидеров 3-5, последние – на выходах ответвлений 8-13 от ветвей 6, 7 фидера 3. Выходам ответвлений присвоены свои номера: $d1, d2, d3$ – выходы ответвлений 8-10; $e1, e2, e3$ – ответвлений 11-13. На шинах 2 наблюдается напряжение u , общее для всех фидеров 3-5. Кроме того на входах фидеров

наблюдаются токи i_a, i_b, i_c . На выходах ответвлений 8-13 наблюдаются токи $i_{d1}^{(0)}, i_{d2}^{(0)}, i_{d3}^{(0)}, i_{e1}^{(0)}, i_{e2}^{(0)}, i_{e3}^{(0)}$, где верхний индекс указывает этап преобразования модели сети. Нулевой индекс соответствует начальному этапу. На каждом последующем этапе модель становится короче, пока не сократится до размера поврежденного участка. Всего для преобразования рассматриваемой сети потребуется три этапа – начальный (нулевой), первый и заключительный второй.

На рисунке Б.2 приведена модель нормального режима, определяющая, соответственно, нормальные токи $i_{a,нм}, i_{b,нм}, i_{c,нм}, i_{d1,нм}^{(0)}, i_{d2,нм}^{(0)}, i_{d3,нм}^{(0)}, i_{e1,нм}^{(0)}, i_{e2,нм}^{(0)}, i_{e3,нм}^{(0)}$. Входные токи i_a, i_b, i_c не нуждаются в указании этапа преобразований, так как свою роль они выполняют только на одном, а именно на начальном этапе.

Шунт 24 на шинах 2, появляющийся при переходе к локальной модели (рисунок Б.3), лишает тока неповрежденные фидеры 4 и 5 –

$$i_{b,лк} \rightarrow 0, i_{c,лк} \rightarrow 0,$$

вследствие чего фидеры 4 и 5 перестают оказывать какое-либо влияние на распределение тока i_f и появляется возможность устранить их из модели, произведя первое её укорочение.

Вход фидера 3 тоже зашунтирован, но в нем протекает ток $i_{a,лк}$, поступающий из поврежденной части сети. Ток $i_{a,лк}$ определяет состояние узла 14, так как напряжение u_{de} этого узла и подтекающий к нему ток i_{de} при зашунтированном входе фидера 3 зависят только от входного тока $i_{a,лк}$.

В следующий этап модель сети входит не только без фидеров 4 и 5, но и без фидера 3 (рисунок Б.5). Шунты 25-30 остаются на своих местах, место действия тока i_f и он сам по-прежнему неизвестны, зато известны квазинаблюдаемые величины i_{de} и u_{de} , а еще третьи токи в выходных шунтах 25-30 $i_{d1,лк}^{(0)}, i_{d2,лк}^{(0)}, i_{d3,лк}^{(0)}, i_{e1,лк}^{(0)}, i_{e2,лк}^{(0)}, i_{e3,лк}^{(0)}$, на значение которых укорочение модели не повлияло. На следующем этапе преобразований этим токам отводится та же роль, которую

играли наблюдаемые токи на выходе исходной модели. Поэтому для них теперь вводятся новые обозначения

$$i_{dv,лк}^{(0)} = i_{dv}^{(1)}, i_{ev,лк}^{(0)} = i_{ev}^{(1)},$$

$$v = 1, 2, 3,$$

где первый верхний индекс говорит о типе тока, а второй является номером этапа.

Напряжение u_{de} на этом очередном этапе – единственное известное напряжение модели. Именно оно определяет ЭДС 31, создающую в нормальной, хотя и укороченной модели сети режим вторых токов $i_{de,нм}$, $i_{dv,нм}^{(1)}$ и $i_{ev,нм}^{(1)}$ (рисунок Б.6). Режим третьих токов, определяемых как

$$i_{de,лк} = i_{de} - i_{de,нм},$$

$$i_{dv,лк}^{(1)} = i_{dv}^{(1)} - i_{dv,нм}^{(1)},$$

$$i_{ev,лк}^{(1)} = i_{ev}^{(1)} - i_{ev,нм}^{(1)},$$

имеет место в модели, где источник 31 заменен шунтом 32, а модель активируется током повреждения i_f (рисунок Б.7). В этой модели наблюдается то же самое явление, которое произошло с фидерами 4, 5 в модели локальных токов по рисунку Б.3 В последнем случае шунтирование узла 14 приводит к тому, что лишаются путей протекания токов ветвь 7 и ответвления 11-13:

$$i_{ev,лк}^{(1)} \rightarrow 0.$$

В результате модель еще более локализуется относительно поврежденного участка. Коль скоро становится известно, что весь ток $i_{de,лк}$ устремляется в ветвь 6, появляется возможность определить напряжение u_{dd} узла 15 и подходящий к нему ток i_{dd} (рисунок Б.8).

К следующему этапу (со вторым номером) модель сети подходит еще более укороченной, без ветвей 6, 7 и ответвлений 11-13 (рисунок Б.9). Токи переобозначаются по принятой форме

$$i_{dv,лк}^{(1)} = i_{dv}^{(2)},$$

т.е. локальные токи первого этапа преобразования модели на втором этапе начинают выполнять роль первых, квазинаблюдаемых токов. Вторые токи нового этапа определяются реакцией нормальной модели сети, укороченной до трех ответвлений 8-10 (рисунок Б.10), на действие источника u_{dd} . Реакциями будут четыре тока – входной ток $i_{dd,нм}$ и выходные $i_{dv,нм}^{(2)}$. Далее следует очередной переход к локальному режиму с очередными локальными токами

$$i_{dd,лк} = i_{dd} - i_{dd,нм},$$

$$i_{dv,лк}^{(2)} = i_{dv}^{(2)} - i_{dv,нм}^{(2)},$$

которые протекают в модели с шунтом 34 вместо ЭДС 33 и единственным источником i_f (рисунок Б.11). Все неповрежденные ответвления 9, 10 в этой модели оказываются зашунтированными с обеих сторон, вследствие чего они оказываются обесточенными

$$i_{d2,лк}^{(2)} \rightarrow 0, i_{d3,лк}^{(2)} \rightarrow 0.$$

После изъятия обесточенных ветвей 9, 10 в модели сети остается единственный участок (рисунок Б.12), что решает поставленную задачу поиска поврежденного участка. Его модель 8 полностью подготовлена для решения очередной задачи – определения координаты x_f : на входе и выходе установлены шунты 34 и 25, в которых протекают известные токи $i_{dd,лк}$ и $i_{d1,лк}^{(2)}$.

Таким образом, разработанный способ включает в себя несколько однотипных операций, совершаемых в определенной последовательности. Им предшествуют подготовительные операции фиксации токов и напряжений, наблюдаемых на входах и выходах сети. В сети по рисунку Б.1 наблюдаются напряжение u на шинах 2 подстанции 1, токи i_a, i_b, i_c на входах фидеров 3-5, напряжения u_{dv}, u_{ev} и токи $i_{dv}^{(0)}, i_{ev}^{(0)}$ на выходах сети. Наблюдаемые величины фиксируются в цифровой форме и сохраняются в памяти микропроцессорной системы релейной защиты. Из зафиксированных величин выделяют информационные составляющие – величины нулевой последовательности i_0, u_0 или фазные безнулевые компоненты аварийных составляющих

$$i'_{\sigma,ав} = i'_{\sigma,ав} - i_0, u'_{\sigma,ав} = u'_{\sigma,ав} - u_0,$$

$$i_{\sigma,ав}(t) = i_{\sigma,тк}(t) - \hat{i}_{\sigma,пд}(t),$$

$$u_{\sigma,ав}(t) = u_{\sigma,тк}(t) - \hat{u}_{\sigma,пд}(t),$$

$\sigma = A, B, C$ – обозначение фазы, индексы «пд» и «тк» обозначают величины режимов, предшествовавшего замыканию и наступившего после замыкания. Верхний крышеобразный символ отмечает величины предшествующего режима, экстраполированные на время после замыкания. Индексы «0», σ , «ав» далее опускаются, и все величины, указанные на рисунках Б.1-Б.12, представляют свои информационные составляющие.

В распоряжении микропроцессорной системы релейной защиты имеется двухпроводная модель сети, представленная в базисе информационных составляющих с пассивными параметрами нулевой или прямой последовательности, соответственно для величин i_0, u_0 или $i'_{\sigma,ав}, u'_{\sigma,ав}$.

На начальном этапе работы системы релейной защиты напряжения и первые токи даёт наблюдение реальной сети. Далее выполняют операции с моделью сети. Модель неповрежденной сети имеется в распоряжении релейной защиты. Нормальные токи фиксируют в точках модели, соответствующих местам наблюдения сети, где определяют локальные токи. Следующая операция – контроль уровня каждого из третьих токов, выявление фидеров с нулевыми токами.

К очередному этапу реализации способа модель упрощают. На новом этапе делается предположение, что следующий участок не поврежден. Если на самом деле он поврежден, это обстоятельство выяснится по завершению этапа. Неповрежденный участок фидера дает возможность определить состояние его выхода. Выходные ток и напряжение участка фидера выражают через ток его зашунтированного входа с помощью алгоритмических моделей, например, с помощью разностной модели (1.20).

На каждом новом этапе поиска поврежденного участка выход предшествующего участка служит входом остающейся модели, на выходах

которой сохраняются шунты и протекающие в них токи. Предстоит выяснить, где произошло замыкание – в отброшенной части фидера или же в направлении одной из следующих ветвей. Для этого в укороченной модели рассчитываются локальные токи. Если выходные локальные токи всех ответвлений ненулевого уровня, то это говорит о том, что замыкание находится в отброшенной на предыдущем этапе части фидера, и гипотеза, на основании которой производились операции, неверна. Если же ненулевой уровень токов обнаруживается лишь в направлении одной из следующих ветвей, то гипотеза была верна, и обнаружится признак – нулевой уровень токов в неповрежденных участках.

К следующему этапу модель упрощают еще больше. Выполняют те же операции до тех пор, пока модель не упростится до вида рисунка Б.12.

Таким образом, доказано, что использование локальных компонент приводит к регулярному способу выявления поврежденного участка разветвленной распределительной сети. Существенно, что при этом нет каких-либо ограничений, обусловленных характером наблюдаемых процессов.

2.5 Выводы

1. В диссертационном исследовании проработаны критерии контроля исправного состояния присоединений. Разработаны способы определения поврежденного присоединения, основанные на контроле сопротивления фидера по нулевой последовательности и позволяющие селективно определять повреждённое присоединение независимо от режима работы нейтрали.

2. Обнаруженные нормальные и локальные составляющие несут информацию о месте повреждения. На основе данных составляющих может быть реализованы алгоритмы определения поврежденного присоединения по результатам одностороннего наблюдения.

3. Привлечение результатов наблюдения со всех сторон разветвленной сети при построении локальной модели позволяет решить более общую задачу поиска поврежденного участка. Для этого применяется метод локализации.

ГЛАВА 3 ПОИСК МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В настоящее время развитие алгоритмов ОМП ведется по разным направлениям: развитие алгоритмического моделирования¹, развитие волновых алгоритмов², развитие дистанционных методов³, развитие принципов распределенных измерений⁴, развитие критериев повреждения⁵. Под критерием повреждения понимается условие, связывающее токи и напряжения в месте предполагаемого повреждения с его координатой. Наиболее общий критерий, который можно назвать энергетическим, основывался на принципе резистивности повреждения, из чего вытекает, что реактивная мощность повреждения равна нулю⁶.

Энергетический критерий повреждения прошёл двадцатилетнюю апробацию в программном комплексе DISAN/LOCATOR⁷; он применяется также в автономных локаторах повреждений разных производителей. Однако в прямом виде он не может использоваться при поиске места ОЗЗ, так как процессы, протекающие при ОЗЗ, не всегда позволяют перейти к комплексным величинам.

Аналогично, большая часть алгоритмов ОМП, использующихся в сетях высокого напряжения, оказывается неприменима для целей определения мест замыканий на землю. Требуется разработка алгоритмов, пригодных для определения мест замыканий на землю и не зависящих ни от режима нейтрали, ни от характера повреждения.

¹ Бычков Ю.В., Васильев Д.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели в релейной защите // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26-31.

² Куликов А. Л. Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждений ЛЭП 6-35 кВ методами активного зондирования. - Москва Энергоатомиздат, 2009. – 161 с.

³ Бычков Ю.В. Развитие и приложения дистанционного метода определения места повреждения линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2012.

⁴ Jen-Hao Teng, Wei-Hao Huang. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators. – IEEE Trans. on Power Systems, 2014, V. 29, № 4, P. 1653-1662.

⁵ Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи // Электричество, 1996, №12, С. 2-7.

⁶ Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием её моделей // Патент РФ №2033622, 1989.

⁷ Efremov V.A., Liamets Y.Y., Podshivalin N.V., Iljin V.A., Nudelman G.S. Program set for the analysis of disturbances and fault location in transmission lines DISAN/LOCATOR // CIGRE SC 34 Colloquium, Italy, Florence, 1999, P. 1-7.

3.1 Применение дискретно-аналоговых моделей

Использование дискретно-аналогового алгоритмического моделирования, представленного в пункте 1.3, представляет локацию повреждения как поиск минимума невязки (1.27) при использовании модели поврежденного фидера В модель поврежденного фидера входят аварийные параметры $x_{f,АЛ}$ – расстояние до места предполагаемого замыкания и $R_{f,АЛ}$ – переходное сопротивление в месте предполагаемого замыкания. В момент времени t_0 моделируется замыкание в дискретно-аналоговой модели. Определяется реакция модели в виде токов, которые далее используются при построении невязки.

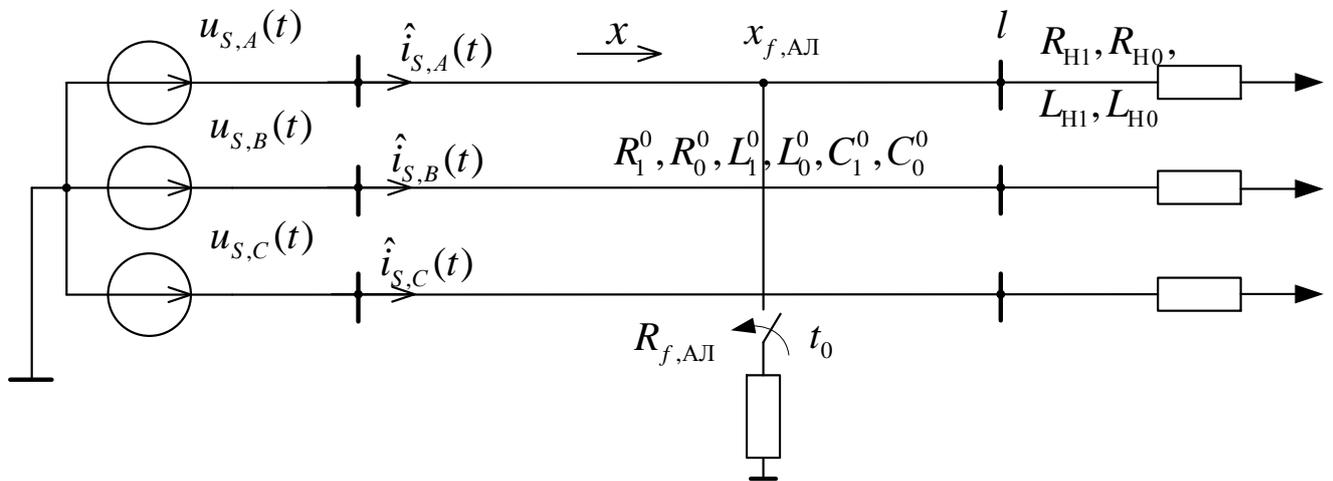


Рисунок 3.1 – Модель поврежденного фидера

Невязка выступает критерием определения насколько точно алгоритмическая модель поврежденного фидера соответствует реальному состоянию энергообъекта. Поэтому строится зависимость невязки от аварийных параметров модели. В общем случае при рассмотрении бесконечного числа режимов, график представляет собой поверхность. При конечном переборе параметров поверхность вырождается в семейство кривых. Зависимость значения невязки от аварийных параметров представлена на рисунке 3.2.

Задача состоит в поиске минимального экстремума данной поверхности. Для этого можно воспользоваться функциями минимизации, но и без использования данных функций при достаточно частом переборе аварийных параметров можно получить вполне удовлетворительный результат. Далее представлены проекции полученной поверхности на плоскости $x_{f,АЛ}$ (рисунок 3.3)

и $R_{f,AL}$ (рисунок 3.4) для случая замыкания на расстоянии 4 км через переходное сопротивление 1 Ом.

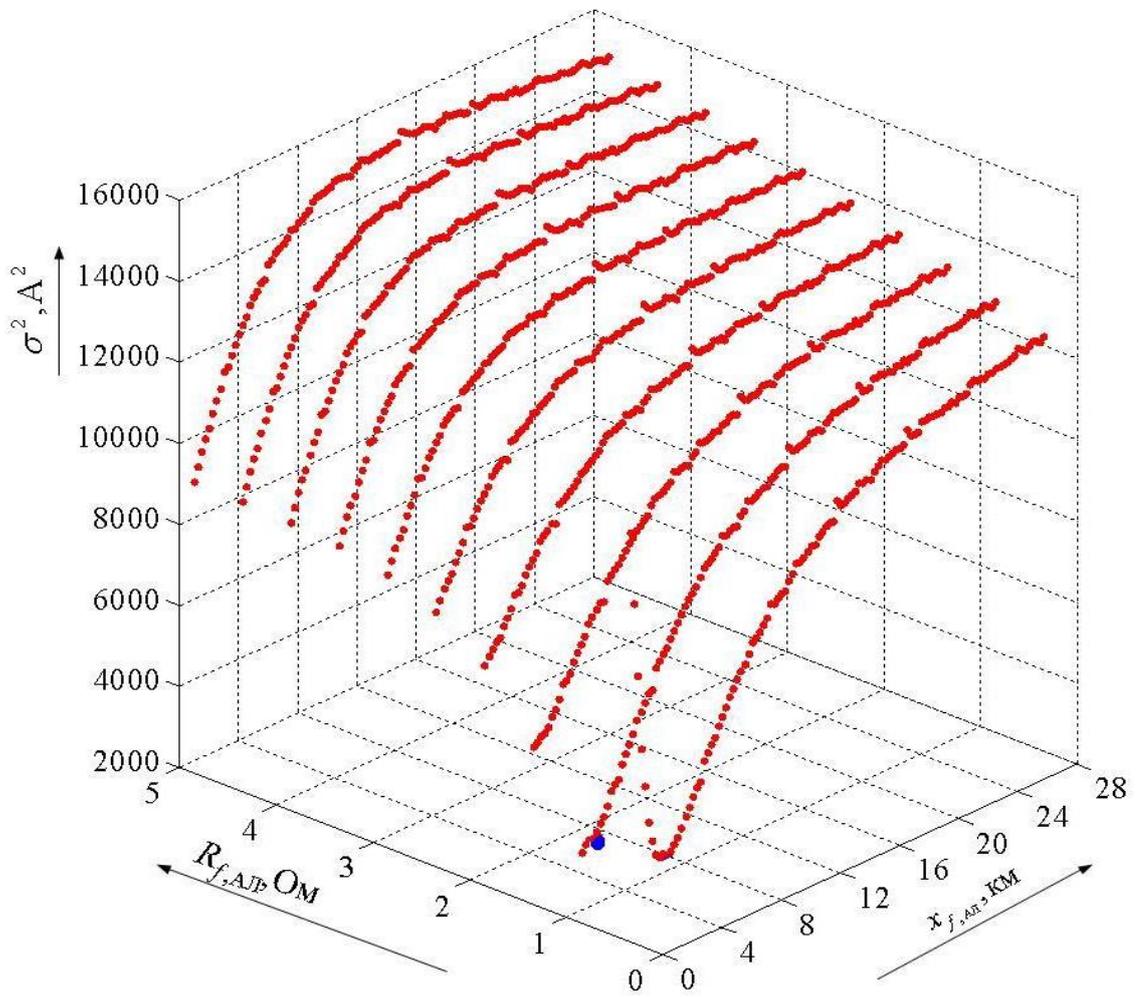


Рисунок 3.2 – Зависимость невязки от аварийных параметров

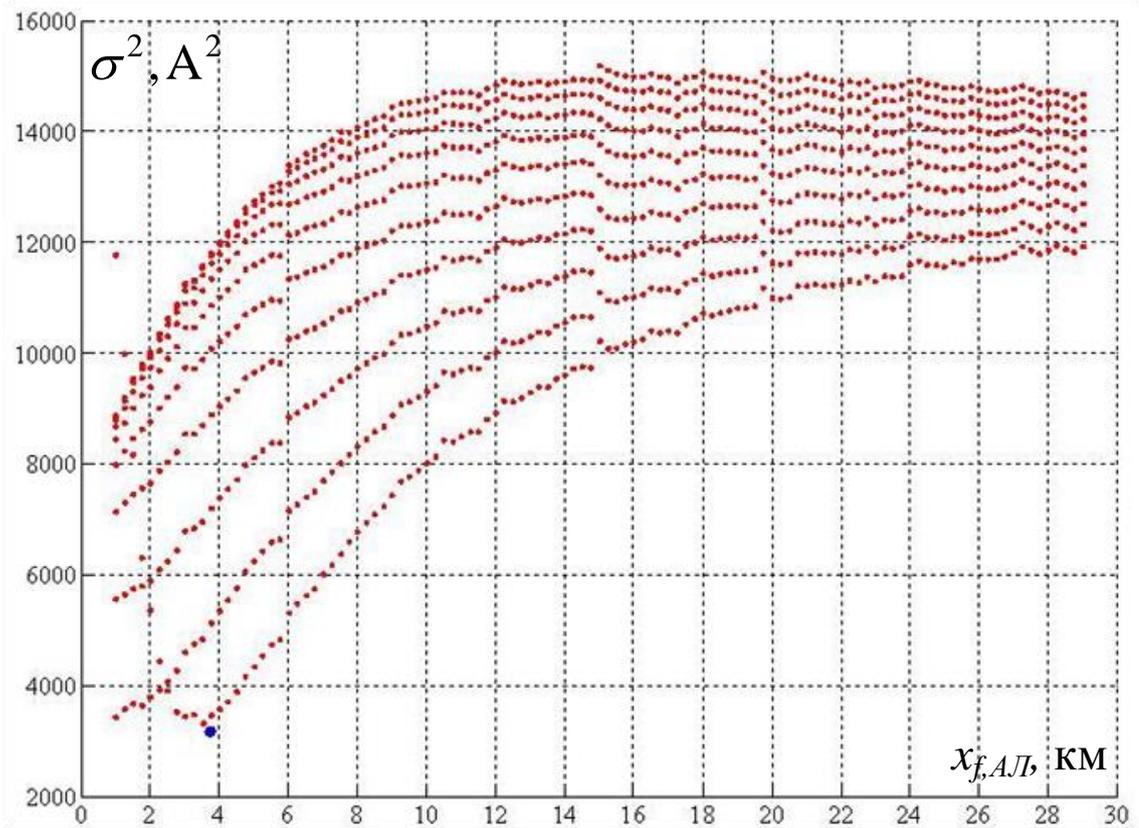


Рисунок 3.3 – Проекция графика невязки на плоскость $x_{f,AL}$

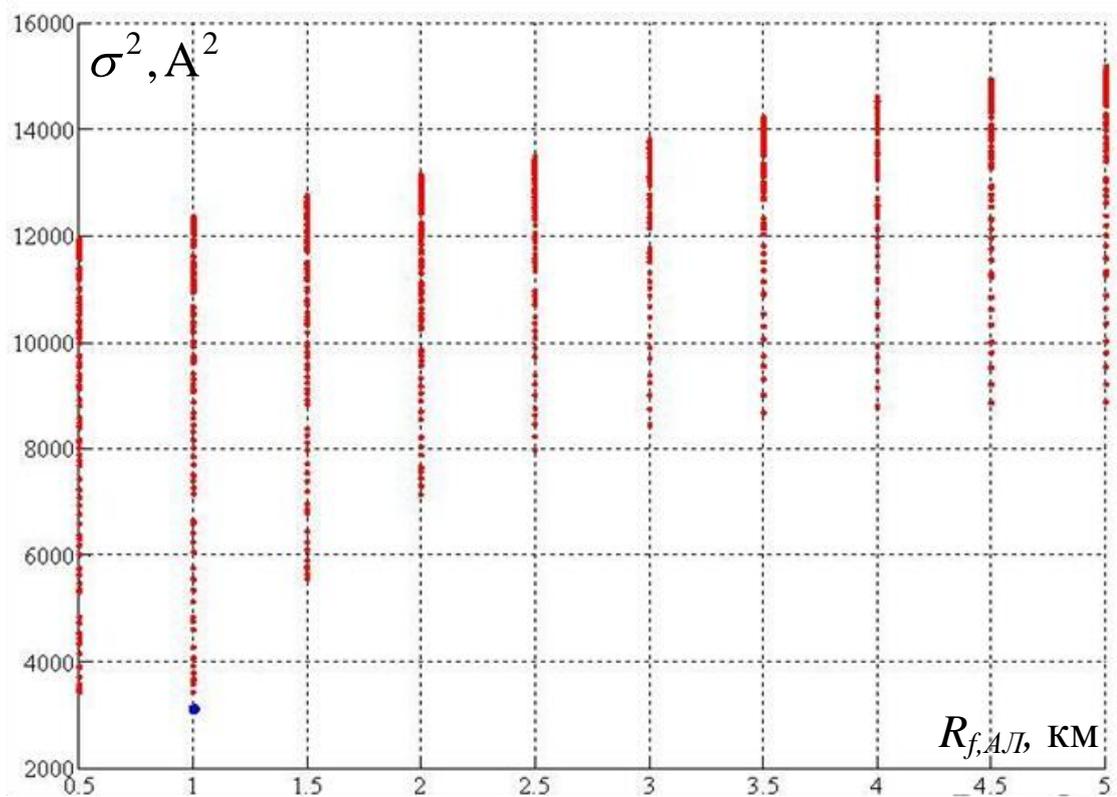


Рисунок 3.4 – Проекция графика невязки на плоскость $R_{f,AL}$

Если применить те же самые рассуждения, но в качестве исходных данных взять ток неповрежденного фидера, то получится следующая картина (рисунок 3.5).

Данная зависимость не имеет ярко выраженного экстремума, что подтверждается на проекциях данного графика (рисунки 3.6-3.7). Это явление свидетельствует о неповрежденном состоянии контролируемого присоединения и может использоваться для реализации защиты от ОЗЗ, однако связано со сложной реализацией.

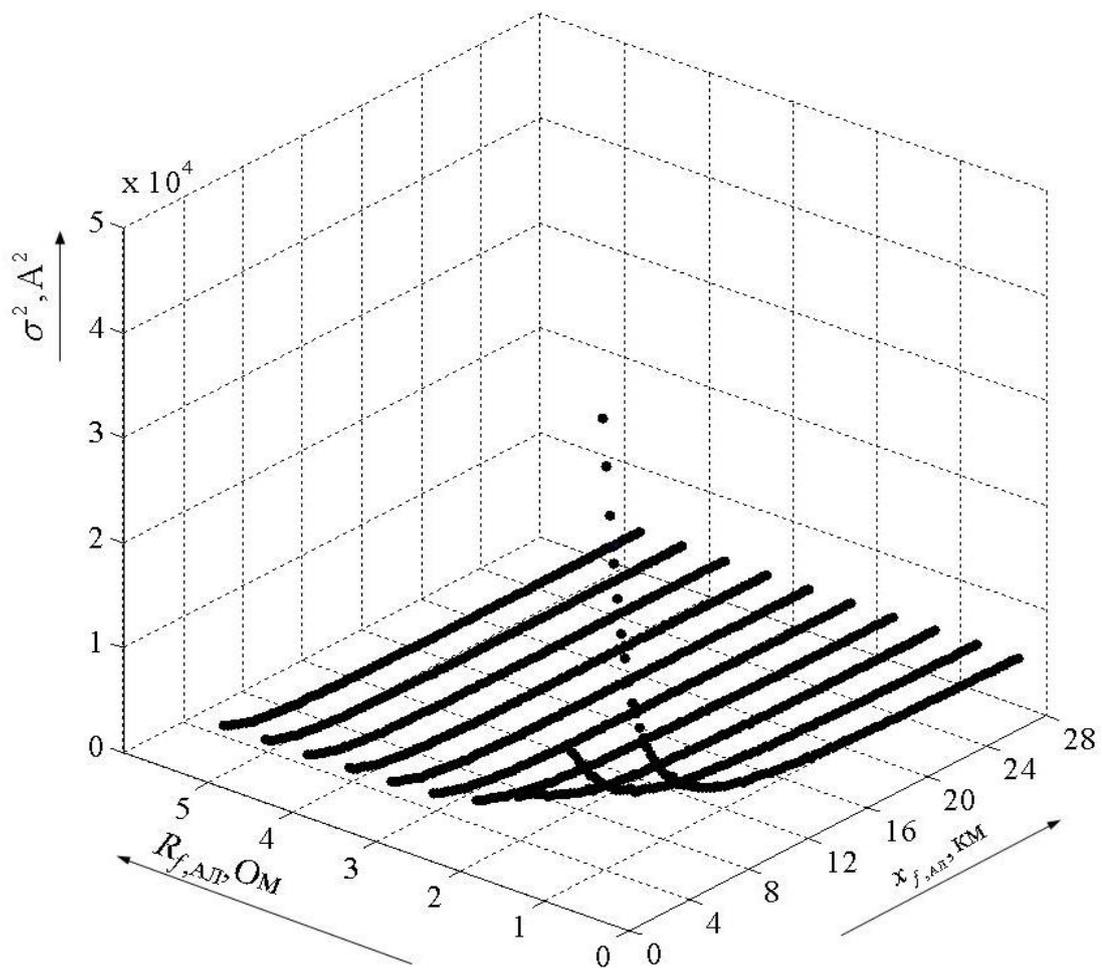


Рисунок 3.5 – Зависимость невязки от аварийных параметров в случае неповрежденного фидера

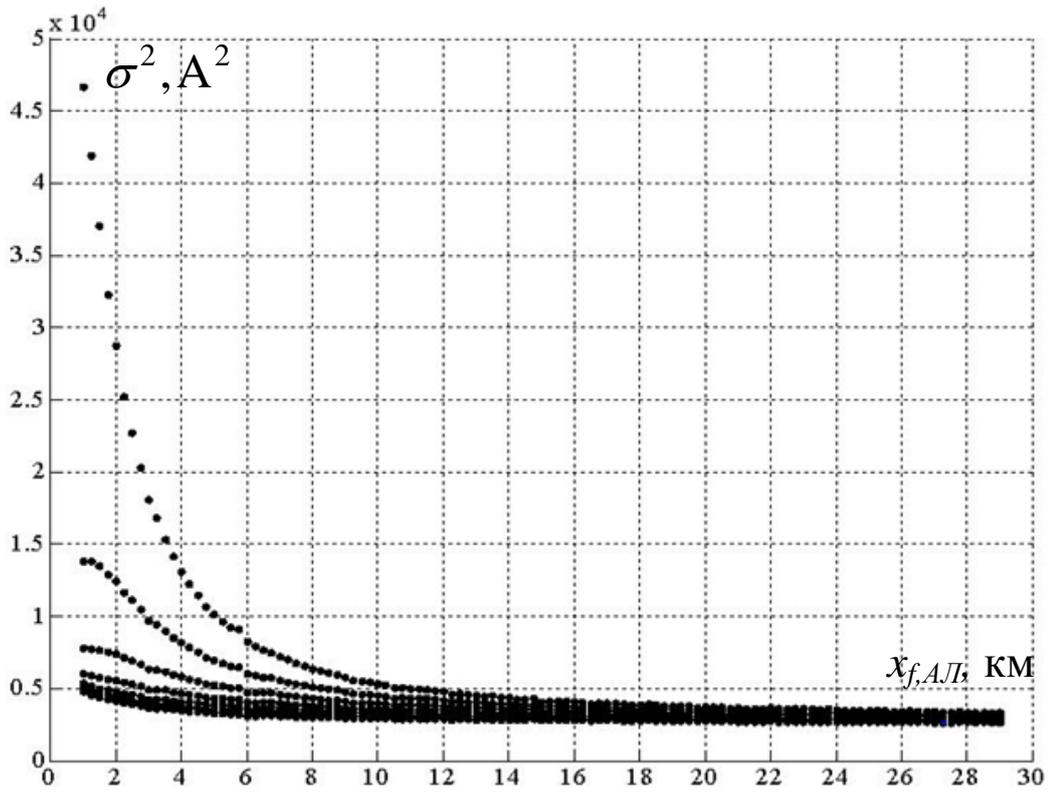


Рисунок 3.6 – Проекция графика невязки на плоскость $x_{f,AL}$

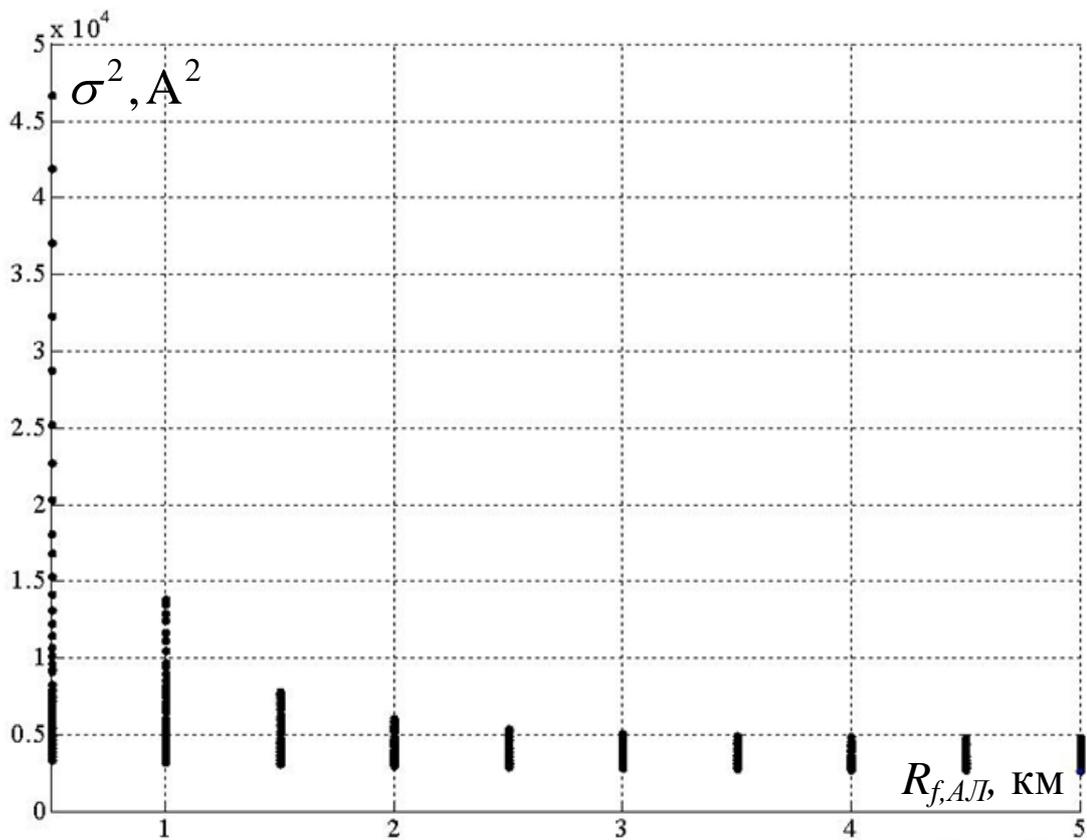


Рисунок 3.7 – Проекция графика невязки на плоскость $R_{f,AL}$

Данный способ имеет один явный недостаток, который заключается в необходимости учета модели повреждения при построении дискретно-аналоговой модели. Так как замыкания на землю носят разнообразный характер¹, модель повреждения оказывается достаточно сложной для реализации.

3.2 Энергетический критерий

Более общим подходом является использование критериев повреждения, которые исходят из принципа резистивности замыкания. В этом случае алгоритмическая модель представляет собой соединение трех отдельных частей (рисунок 3.8): модели Π_1 неповрежденного участка до места предполагаемого замыкания, модели замыкания $З$ и модели неповрежденного участка Π_2 после места замыкания. Так как модель замыкания неизвестна, то алгоритм локализации нацелен на определение электрических величин по обе стороны повреждения и оценку по данным величинам характера повреждения. В таблице 3.1 приведены этапы поиска места замыкания на землю, а на рисунках 3.9-3.11 приведены модели, в которых они выполняются.

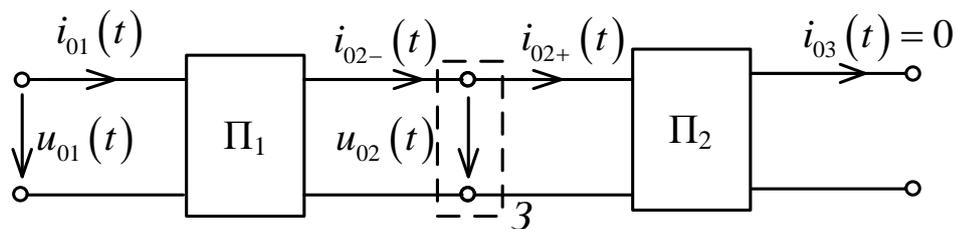


Рисунок 3.8 – Алгоритмическая модель поврежденного фидера по нулевой последовательности

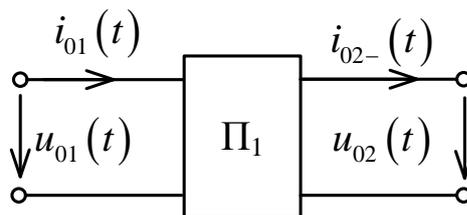


Рисунок 3.9 – Модель неповрежденной части фидера до повреждения по нулевой последовательности

¹ Шалин А.И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1 (31).

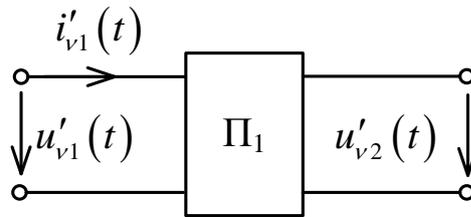


Рисунок 3.10 – Модель неповрежденной части фидера до повреждения по прямой последовательности

Таблица 3.1 – Процедура поиска места замыкания

Модель	Исходная информация	Выполняемые операции
Неповреждённый участок П ₁ до повреждения	Наблюдаемые токи и напряжения в начале фидера	<p>1. Определение напряжения нулевой последовательности в месте предполагаемого повреждения:</p> $u_{02}(t) = (1/2R_{в01})[a_{01}u_{01}(t + \tau_{01}) + b_{01}u_{01}(t - \tau_{01}) - a_{01}^2i_{01}(t + \tau_{01}) + b_{01}^2i_{01}(t - \tau_{01})];$ <p>2. Определение тока нулевой последовательности, втекающего в модель повреждения:</p> $i_{02-}(t) = (1/2R_{в01})[-u_{01}(t + \tau_{01}) + u_{01}(t - \tau_{01}) + a_{01}i_{01}(t + \tau_{01}) + b_{01}i_{01}(t - \tau_{01})];$ <p>3. Определение по безнулевым составляющим наблюдаемых величин безнулевой составляющей напряжения повреждённой фазы в месте предполагаемого повреждения:</p> $u'_{n2}(t) = (1/2R_{в1})[a_1u'_{n1}(t + \tau_1) + b_1u'_{n1}(t - \tau_1) - a_1^2i'_{n1}(t + \tau_1) + b_1^2i'_{n1}(t - \tau_1)];$ <p>4. Определение фазного напряжения повреждённой фазы в месте предполагаемого повреждения:</p> $u_{n2}(t) = u_{02}(t) + u'_{n2}(t);$
Неповреждённый участок П ₂ после повреждения	$u_2(t)$, учитывается, что $i_3(t) = 0$	<p>5. Определение тока нулевой последовательности, отходящего от модели повреждения:</p> $i_{02+}(t) = \frac{1}{a_{02}} \left[u_{02}(t) - \frac{a_{02} - b_{02}}{a_{02}} u_{02}(t - \tau_{02}) - \frac{b_{02}}{a_{02}} u_{02}(t - 2\tau_{02}) \right] + \left(\frac{1}{a_{02}} \right)^2 \left[\frac{1}{2} (a_{02} - b_{02})^2 i_{02+}(t - \tau_{02}) - b_{02}^2 i_{02+}(t - 2\tau_{02}) \right];$

Модель	Исходная информация	Выполняемые операции
Модель замыкания З	$u_{n2}(t), i_{02-}(t),$ $i_{02+}(t)$	<p>6. Определение тока предполагаемого замыкания:</p> $i_{n2}(t) = 3(i_{02-}(t) - i_{02+}(t));$ <p>7. Определение мгновенной мощности ветви однофазного замыкания</p> $p(t) = u_{n2}(t)i_{n2}(t);$ <p>8. По характеру изменения мгновенной мощности делается вывод о наличии повреждения в проверяемом месте.</p>

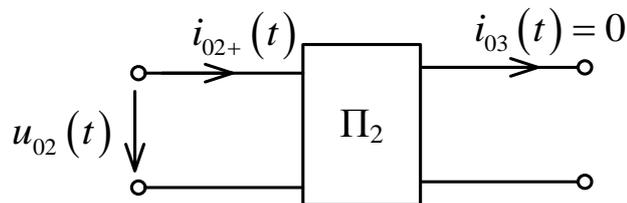


Рисунок 3.11 – Модель неповрежденной части фидера после повреждения по нулевой последовательности

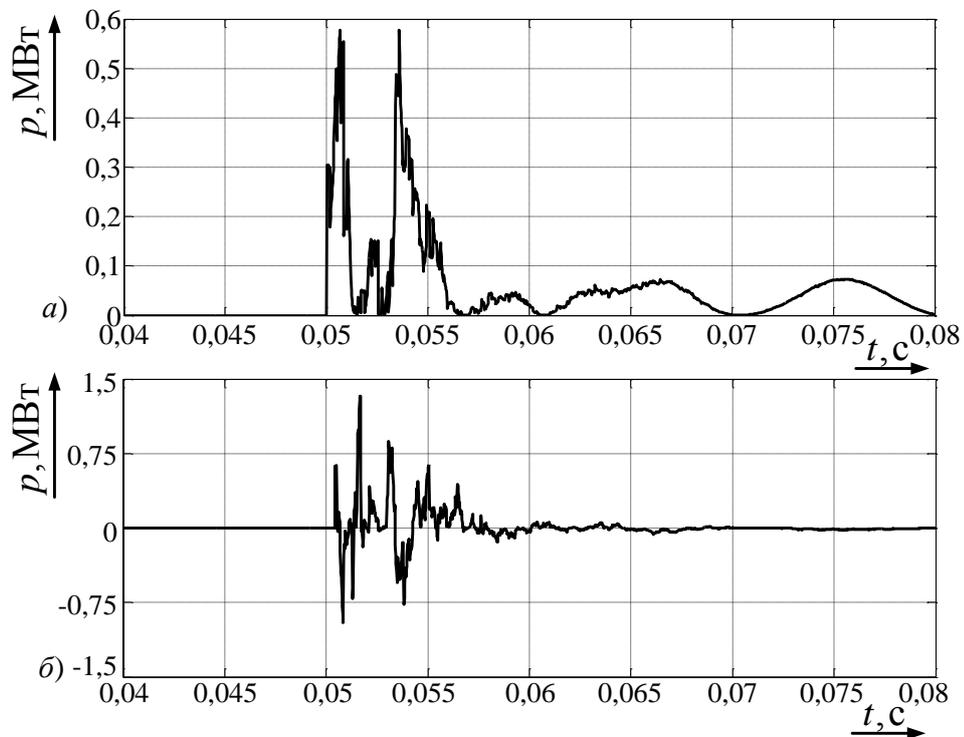


Рисунок 3.12 – Мгновенная мощность повреждения:
 а – истинного; б – предполагаемого

На рисунке 3.12 представлены результаты вычисления мгновенной мощности по описанному алгоритму для случая совпадения места предполагаемого замыкания на землю с реальным местом замыкания на землю (рисунок 3.12а) и для несовпадения этих мест (рисунок 3.12б).

3.3 Распознавание ОЗЗ по методу локализации

Метод локализации эффективно решает задачу локации повреждения при полном двухстороннем наблюдении объекта. Перемещаясь вдоль длины фидера, шунты приходят в место замыкания (рисунок 3.13), вследствие чего исчезают локальные токи всех ветвей, кроме одной – шунта, замкнувшего источник тока в месте повреждения.

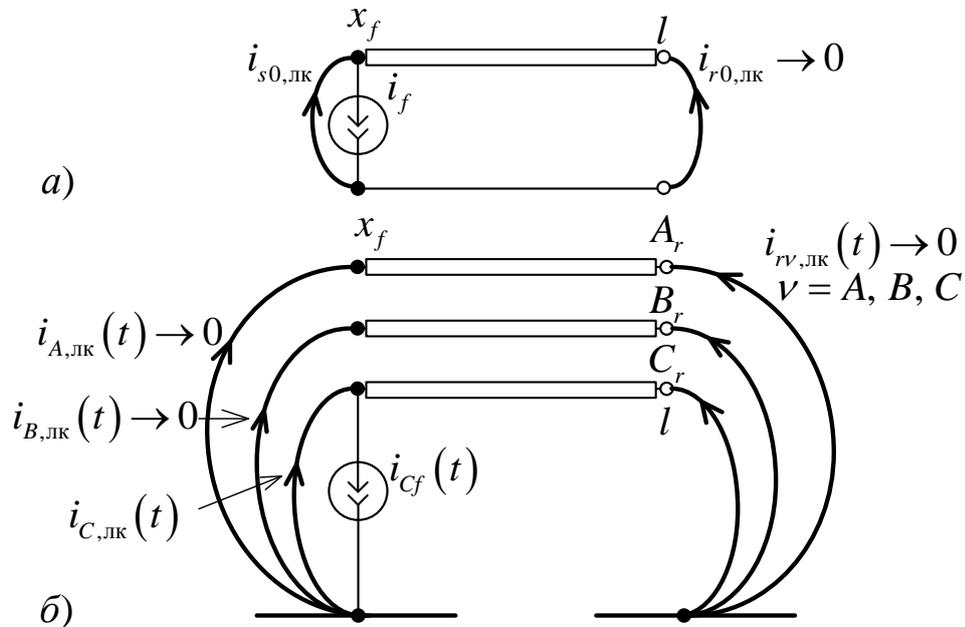


Рисунок 3.13 – Локальные токи в модели при перемещении шунта в место замыкания: а – при наблюдении нулевой последовательности; б – при полном наблюдении фазных величин

Реализация данного подхода предполагает постепенный расчет локальных токов и укорочение модели до определения точки замыкания. В сетях с большими уровнями токов замыканий на землю переход к модели локального режима позволяет определить место повреждения из соотношения комплексных значений локальных токов в установившемся режиме по обеим сторонам фидера:

$x_{fv} = l / (k_v + 1)$, где l – длина фидера, $k_v = \operatorname{Re} \left[\underline{I}_{sv,лк} / \underline{I}_{rv,лк} \right]$ – реальная часть отношения комплексных значений локальных токов поврежденной фазы слева и справа, v – поврежденная фаза. Применить данный критерий в сетях с компенсацией тока замыкания на землю не представляется возможным ввиду малого уровня тока в установившемся режиме ОЗЗ, однако по соотношению локальных токов слева и справа в переходном процессе можно определить в какой из половин фидера располагается точка замыкания. Так, если локальные токи совпадают, то точка замыкания располагается посередине фидера, если один из токов равен нулю, то точка замыкания располагается на противоположном конце, если оба тока имеют ненулевое значение, то точка замыкания располагается ближе к той стороне, где локальный ток имеет больший уровень. Используя эти свойства можно организовать итерационную процедуру поиска места замыкания, заключающуюся на каждом этапе в разделении фидера пополам, определении по локальным токам в какой из половин произошло замыкание, отбрасывании неповрежденной части и расчету нового локального режима в оставшейся половине. Для этого вводятся критерий, способный свидетельствовать об идентичности локальных токов по разным сторонам. Воспользуемся критерием наименьших квадратов в двух вариантах, записанным для дискретных значений токов

$$\sum_{k=0}^N \left[\lambda_s i_{s,лк}(t_k) - i_{r,лк}(t_k) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

$$\sum_{k=0}^N \left[i_{s,лк}(t_k) - \lambda_r i_{r,лк}(t_k) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

где N – номер последнего наблюдавшегося отсчёта, λ_s и λ_r – параметры идентичности, определяемые из (9) и (10) как

$$\lambda_s = \frac{\sum_{k=0}^N i_{s,лк}(t_k) i_{r,лк}(t_k)}{\sum_{k=0}^N \left[i_{s,лк}(t_k) \right]^2},$$

$$\lambda_r = \frac{\sum_{k=0}^N i_{s,\text{лк}}(t_k) i_{r,\text{лк}}(t_k)}{\sum_{k=0}^N [i_{r,\text{лк}}(t_k)]^2}.$$

Таким образом, можно записать описанные выше свойства в виде математических выражений. Если замыкание близко к началу модели, то $i_{r,\text{лк}} \rightarrow 0$, и тогда

$$\lambda_s = 0, \quad (3.3)$$

в то время как параметр λ_r становится неопределённым. В противоположной ситуации, когда замыкание близко к концу модели, то $i_{s,\text{лк}} \rightarrow 0$, и как следствие

$$\lambda_r = 0, \quad (3.4)$$

а неопределён параметр λ_s . Наконец, при замыкании в середине фидера имеет место равенство

$$\lambda_s \approx \lambda_r \approx 1. \quad (3.5)$$

Если же не выполняется ни одно из условий (3.3)–(3.5), то в общем случае по соотношению параметров λ_s и λ_r определить координату x_f не удаётся, однако можно судить о том, в какой из двух половин фидера находится место замыкания. При $\lambda_r > 1 > \lambda_s$ повреждена половина с s -ым входом, а при $\lambda_s > 1 > \lambda_r$ – с r -ым. Характеристика определения места замыкания по параметрам идентичности представлена на рисунке 3.14.

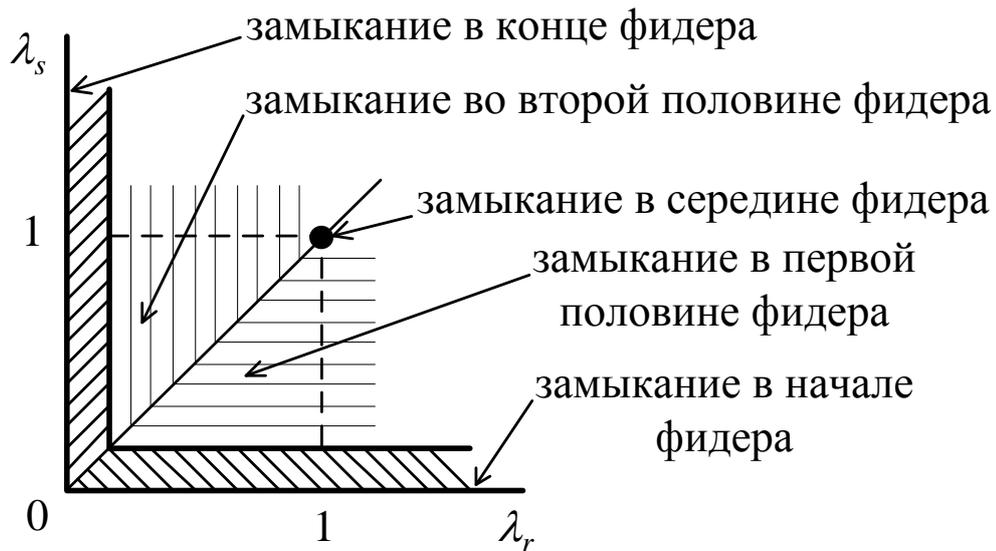


Рисунок 3.14 – Характеристика определения места замыкания по параметрам идентичности

Данный подход позволяет относительно просто решить задачу поиска места однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в распределительной сети. Однако двухстороннее наблюдение в распределительных сетях встречается довольно редко, в связи с чем метод локализации должен быть приспособлен к одностороннему наблюдению. Задача решается с привлечением информации о параметрах нагрузки удаленного конца на этапе построения моделей нормального и локального режимов (рисунок 3.15). О приходе шунта в место повреждения будет свидетельствовать исчезновение локальных токов в неповрежденных фазах. Уровни токов могут оцениваться по действующему значению в установившемся режиме (в сетях с высокими уровнями токов ОЗЗ) или по среднеквадратическому значению токов в переходном процессе. Пример реализации такого подхода для ОЗЗ на расстоянии 20 км от начала линии приведен на рисунке 3.16. Значительный уровень тока фазы С свидетельствует о наличии повреждения в этой фазе. Равенство локальных токов фаз А и В нулю на расстоянии 20 км указывает на место повреждения.

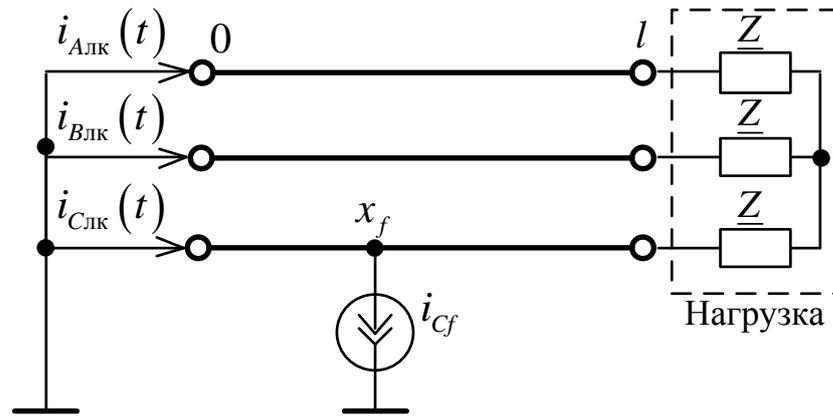


Рисунок 3.15 – Модель локального режима при одностороннем наблюдении

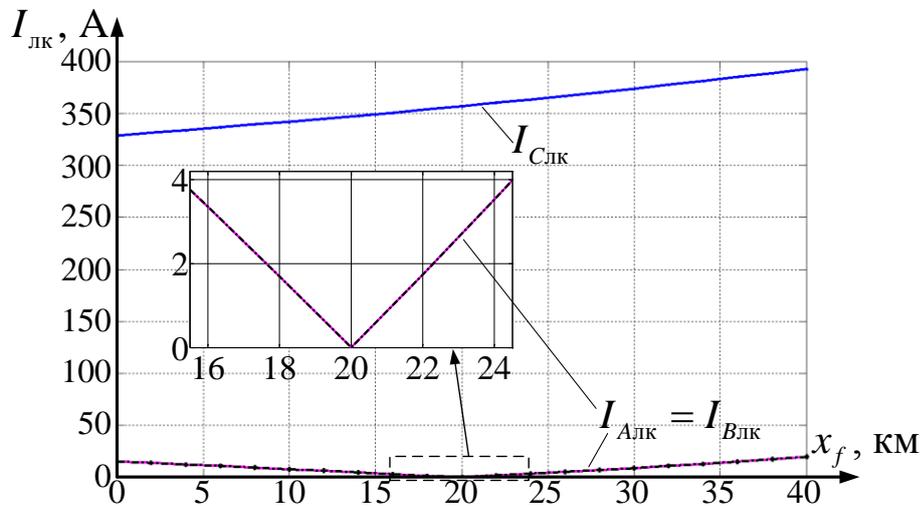


Рисунок 3.16 – Локальные фазные токи

3.4 Распознавание двойных замыканий на землю по методу локализации

Рассмотрим применение метода локализации повреждений в электрической сети для случая двойного замыкания на землю. Двойные замыкания на землю сопровождаются большими уровнями токов, поэтому можно оперировать комплексными величинами. Если места замыканий будут находиться на разных фидерах, шунт, появившийся в месте наблюдения при переходе к локальной модели сети, разделит сеть на две части: неповреждённую и повреждённую, которая в свою очередь будет состоять из двух фидеров с однофазными замыканиями на землю. Благодаря шунтам, повреждённые фидеры можно рассматривать по отдельности. Таким образом, локация двойного замыкания сводится к определению координат ОЗЗ в двух моделях локального режима, что

описано в предыдущем параграфе. Поэтому здесь мы остановимся на тех случаях, когда точки замыканий находятся на одном фидере.

При полном двухстороннем наблюдении переход к модели локального режима (рисунок 3.17) сразу упрощенно с большой точностью определяет токи повреждений:

$$\underline{I}_{fB} = \underline{I}'_{Влк} + \underline{I}''_{Влк} \text{ и } \underline{I}_{fC} = \underline{I}'_{Слк} + \underline{I}''_{Слк}.$$

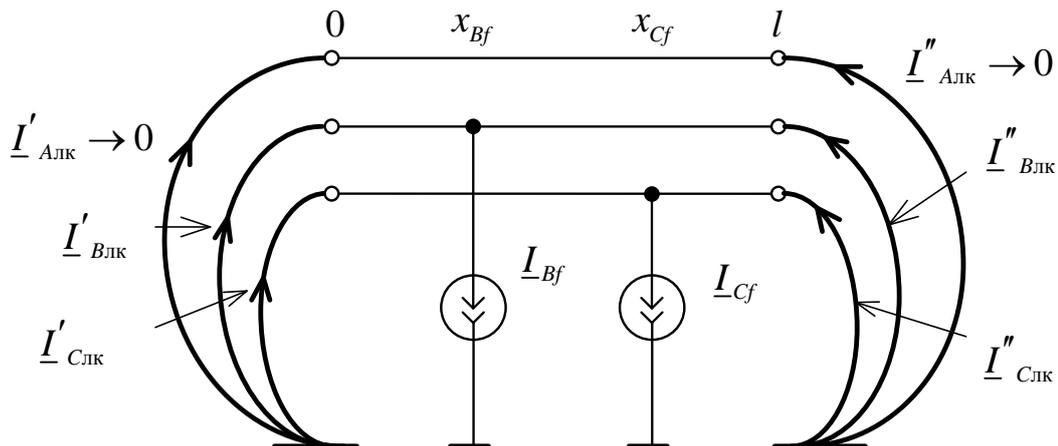


Рисунок 3.17 – Модель локального режима фидера при двухстороннем наблюдении

Если участок фидера однородный, то места повреждений можно определить из соотношения токов в установившемся режиме. Расстояние от начала фидера до места замыкания определяется по формуле: $x_{fv} = l / (k_v + 1)$, где l – длина фидера,

$k_v = \text{Re} \left[\frac{\underline{I}'_{vлк}}{\underline{I}''_{vлк}} \right]$ – реальная часть отношения комплексных значений локальных токов слева и справа, $v = B, C$ – поврежденные фазы.

Как и при поиске места ОЗЗ, при известных параметрах нагрузки локация двойных замыканий на землю возможна по результатам одностороннего наблюдения. Однако в отличие от локации ОЗЗ необходимо использование информационных параметров, которые формируются по критерию резистивности повреждения. В месте реального замыкания они принимают нулевое значение. В качестве такого параметра может быть использована разность фаз между фазным напряжением и током предполагаемого замыкания, реактивная мощность и реактивное сопротивление предполагаемого повреждения.

Известен способ распознавания двойного замыкания в фидере при одностороннем его наблюдении¹. Здесь также используется модель объекта, фиксируются фазные токи и напряжения в виде комплексных входных величин. Входные величины преобразуются в реактивные параметры двух мест предполагаемых повреждений. Замыкания констатируются в тех местах, где реактивные параметры переходят через нулевые значения. Данному способу присущи два недостатка. Во-первых, он не решает задачу определения фазы фидера, в которой место замыкания располагается ближе к началу фидера, чем в другой поврежденной фазе. Во-вторых, не располагает возможностью поочередного выявления мест замыканий. Координаты этих мест определяются из решения системы нелинейных уравнений, куда помимо двух координат входят ещё и некоторые комплексные электрические величины.

Здесь же поиск токов и мест замыкания выполняется также по методу локализации с учётом связи между источниками через нагрузку. Учет токораспределения источников, приведенного на рисунке 3.18, позволяет определить ток в месте первого повреждения, в данном случае в фазе В:

$$\underline{I}_{Bf} = \underline{I}_{Влк} (x_{Bf}) - \underline{I}_{Алк} (x_{Bf}).$$

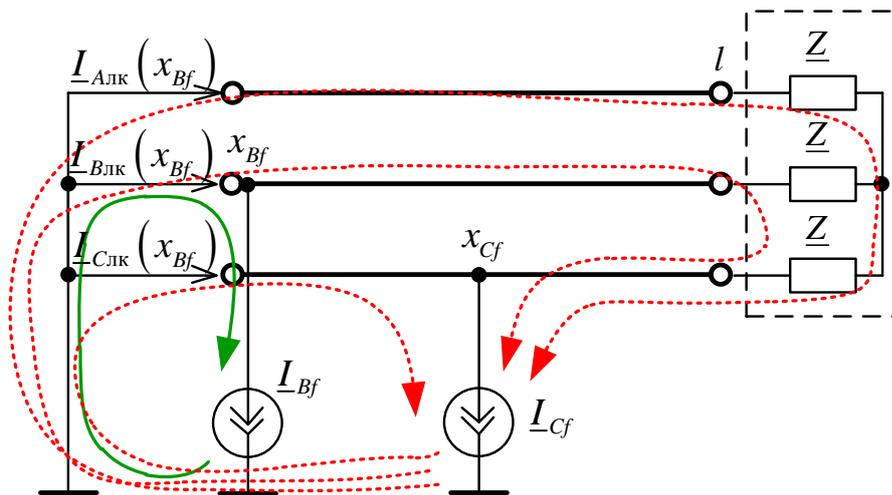


Рисунок 3.18 – Токораспределение источников повреждения в локальной модели

¹ Иванов С.В., Кержаев Д.В. Определение мест повреждения двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью, – Материалы международной конф. «Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation», Москва, 2009.

Принимая во внимание указанную закономерность, в каждой точке x предполагаемого повреждения определяются локальные токи $\hat{I}_{Bf}(x) = \underline{I}_{Bлк}(x) - \underline{I}_{Aлк}(x)$, $\hat{I}_{Cf}(x) = \underline{I}_{Cлк}(x) - \underline{I}_{Aлк}(x)$. Полученные оценки токов предполагаемых повреждений совместно с фазными напряжениями используются в критерии повреждения. Первая точка, в которой критерий выполняется, определяют координату и фазу ближайшего повреждения (рисунок 3.19).

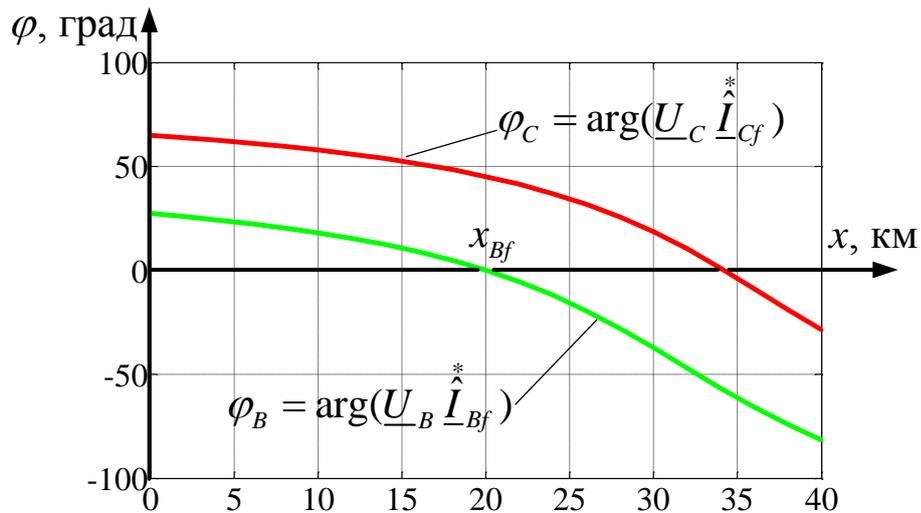


Рисунок 3.19 – Поиск первой точки двойного замыкания

С учетом полученной координаты и тока первого замыкания для поиска второго замыкания строится модель локального режима части фидера за первым замыканием. Задача поиска второй точки вновь сводится к локации ОЗЗ в модели локального режима. Применение метода локализации позволяет определить места замыканий без методической погрешности.

3.5 Выводы

1. Развитие идей алгоритмического моделирования привели к разработке регулярных способов определения мест замыканий на землю в распределительных сетях.

2. Разработан способ определения места замыкания на землю с использованием двух алгоритмических моделей, описывающих фидер до повреждения и после повреждения, с целью определения тока в месте

повреждения и определения мгновенной мощности. Данный способ принят к внедрению в ООО «Исследовательский центр «Бреслер».

3. Разработанный способ определения места повреждения при земляных замыканиях с использованием модели локального режима фидера позволяет определять место каждого замыкания без методической погрешности. Данный способ принят к внедрению в ООО «Исследовательский центр «Бреслер».

ГЛАВА 4 ВНЕДРЕНИЕ

Приведённые в диссертации теоретические положения были применены в разработке микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики, принятых к внедрению или внедрённых в ООО «Исследовательский центр (ИЦ) «Бреслер» (г. Чебоксары).

4.1 Селективная защита от замыканий на землю ТОР 110-ИЗН

До недавнего времени реализация алгоритмов, реагирующих на волновые переходные процессы с использованием микропроцессорной техники, не представлялась возможной из-за ее недостаточной производительности. Также отсутствовали аналогово-цифровые преобразователи, которые бы обеспечивали регистрацию переходного процесса с достаточной точностью. Выход последних на рынок привел к появлению волновых устройств определения места повреждения, а также способствовал проведению исследований по разработке устройств определения мест ОЗЗ и селективной защиты от ОЗЗ. В процессе реализации этих исследований в рамках совместной работы ОАО «Тюменьэнерго», ОАО «ЭНИН» и ООО «Исследовательский центр «Бреслер» в 2012 году было разработано устройство «ИЗН-01», которое по результатам натурных испытаний было доработано и получило название «ТОР 110 ИЗН».

Указанное устройство использует контроль направления распространения волн переходного процесса от места возникновения ОЗЗ к концам линии (пунктам установки защиты) путем сравнения и запоминания первоначального знака напряжения и тока этих волн в канале «фаза – земля» ($3U_0$ и $3I_0$) в течение времени до изменения этого знака. В устройстве при несовпадении знаков $3U_0$ и $3I_0$ фиксируется ОЗЗ в защищаемом направлении, при совпадении – внешнее ОЗЗ. Факт установления ОЗЗ подтверждается контролем в защите заданного уровня напряжения нулевой последовательности $3U_0$ промышленной частоты.

Устройство «ТОР 110 ИЗН» (ИЗН-01), являющееся индивидуальным, устанавливается на защищаемой линии и подключается к вторичной обмотке трансформатора тока (ТТ) нулевой последовательности защищаемой линии и к

обмотке трансформатора напряжения (ТН) шин, соединенной в разомкнутый треугольник, в соответствии с рисунком 4.1а. При отсутствии ТТ нулевой последовательности устройство может подключаться на сумму токов трех фаз ТТ линии в соответствии с рисунком 4.1б.

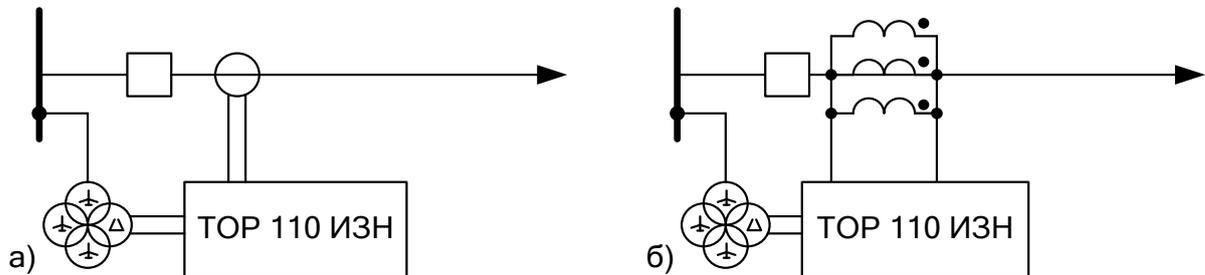


Рисунок 4.1 – Схема подключения устройства TOP 110 ИЗН

(а – к ТТ нулевой последовательности, б – на сумму фазных токов ТТ)

Устройство «ТОР 110 ИЗН» (ИЗН-01), внешний вид которого представлен на рисунке 4.2, обеспечивает

- селективную защиту от замыканий на землю воздушных, кабельных и смешанных линий в сети 6-35кВ независимо от режима заземления ее нейтрали (с действием на сигнал или отключение без необходимости изменения параметров срабатывания устройства в процессе эксплуатации);
- контроль состояния цепей ТН;
- собственное осциллографирование и регистрацию ОЗЗ и переключений с организацией базы данных аварийных осциллограмм;
- контроль правильности ориентирования устройства в заданном направлении (фазировки);
- индикация тока и напряжения нулевой последовательности и фазного тока;
- интеграцию в АСУ по протоколу IEC 60870-103.

Устройство обладает малыми габаритами и весом и может устанавливаться, в частности, на дверь релейного отсека, как показано на рисунке 4.3.

Частота дискретизации устройства составляет 16 кГц, остальные технические данные приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические данные «ТОР 110-ИЗН»

Наименование параметра	Значение
Рабочий диапазон переменного/постоянного напряжения оперативного тока цепей питания, В	От 88 до 264
Рабочий диапазон по цепям переменного тока, А	От 0,005 до 10
Рабочий диапазон по цепям переменного напряжения, В	От 0,05 до 120
Допустимая перегрузка по цепям переменного тока	100 А в течение 1с
Номинальное переменное напряжение цепей измерения, В	100
Номинальная частота, Гц	50
Потребление: цепей переменного напряжения, ВА цепей переменного тока, ВА цепей оперативного тока в состоянии покоя/ срабатывания, Вт, не более	0,07 0,03 3,6/3,9
Установочные размеры (ширина, высота, глубина), мм	90x90x175
Диапазон рабочих температур, °С	От – 40 до + 55
Масса устройства, кг, не более	1,6

Важной функцией направленной защиты является проверка правильности подключения измерительных цепей. В случае защит, реагирующих на параметры обратной или нулевой последовательностей это особенно важно, так как составляющие данных последовательностей появляются лишь в аварийном режиме. Для реализации данной функции был исследован переходный процесс, возникающий при вводе контролируемого присоединения в работу за счет разновременности замыкания контактов выключателя. В программном комплексе Matlab\Simulink была реализована ИМО для исследования переходного процесса. Проведенный анализ показал, что вне зависимости от конфигурации сети и режима нейтрали первые волны напряжения и тока нулевой последовательности в месте наблюдения находятся в противофазе (рисунок 4.4). Таким образом, для

контроля правильности ориентирования защиты в заданном направлении (фазировки), а также для проверки устройства под нагрузкой в устройстве предусмотрена тестовая функция, по направлению мгновенной мощности переходного процесса. Для отстройки от небаланса токов и напряжений используются аварийные составляющие тока и напряжения нулевой последовательности, определяемые как $v_{ав}(t) = v(t) - v(t-T)$. В ходе последующей опытной эксплуатации работоспособность данного алгоритма была подтверждена.



Рисунок 4.2 – Устройство TOP 110-ИЗН (внешний вид)



Рисунок 4.3 – Устройство TOP 110-ИЗН, установленное в ячейке 19 на ПС «Олимпийская» в г. Волгограде

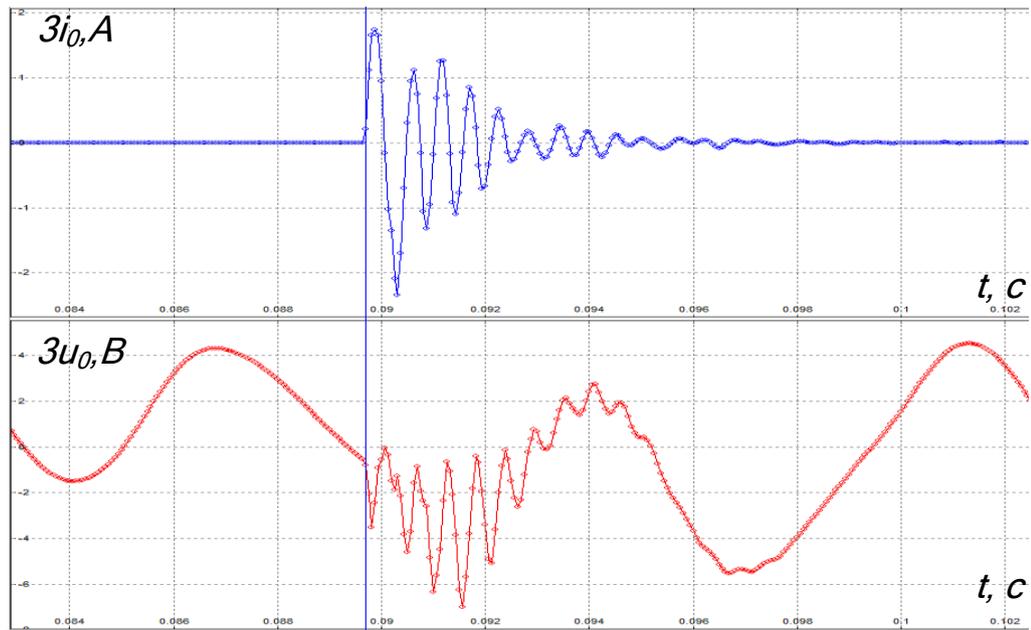


Рисунок 4.4 – Осциллограмма токов и напряжений нулевой последовательности при включении выключателя линии

Натурные испытания устройств ИЗН-01 проводились в мае 2012года в электрической сети 10 кВ подстанции (ПС) Ханты-Мансийская ОАО «Тюменьэнерго» при установке этих устройств на линиях РП-12-1, РП-12-2, РП-15-1 и Базьяны. Схема сети 10 кВ представлена на рисунке 4.5.

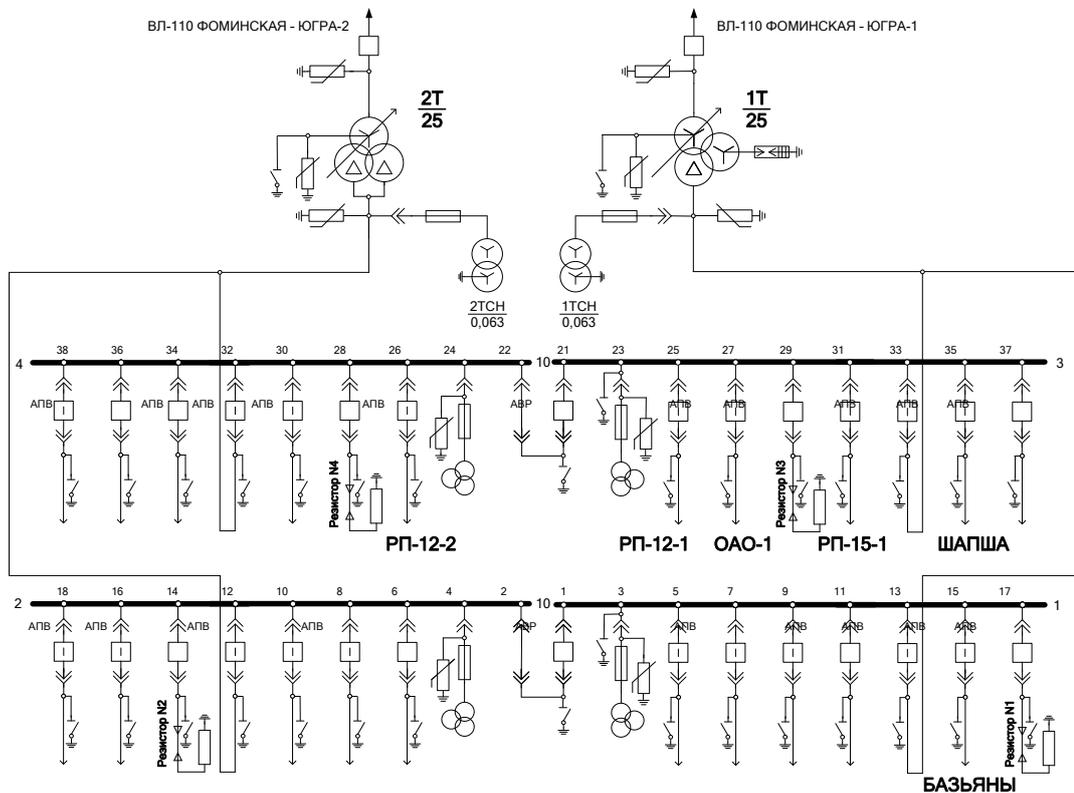


Рисунок 4.5 – Схема сети 10 кВ ПС Ханты-Мансийская

Сеть состоит преимущественно из воздушных линий, подключение которых к шинам 10 кВ осуществлено через кабельные вставки. При этом городские линии, спустя несколько километров, переходят в кабельные. Секции 1 и 3, а также секции 2 и 4 работают параллельно. На ПС осуществляется кратковременное подключение резисторов к соответствующим секциям шин 10 кВ через 500 мс после возникновения ОЗЗ.

При натурных испытаниях искусственные ОЗЗ осуществлялись путем включения выключателя линии на предварительно установленное в конце линии устройство переносного заземления. Всего было проведено 21 искусственное ОЗЗ. Кроме того, в промежутке между натурными испытаниями было зафиксировано одно реальное ОЗЗ. При всех ОЗЗ устройства ИЗН-01 работали правильно.

Осциллограммы токов и напряжений искусственного ОЗЗ на ЛЭП РП-12-1 приведены на рисунке 4.6 (а и б – осциллограммы, записанные устройствами ИЗН-01, установленными соответственно на линии РП-12-1 и на линии Базьяны). При этом значительные искажения напряжения ТН третьей секции шин 10 кВ, вызванные некорректным подключением антирезонансной обмотки ТН. Тем не менее, это не привело к неселективной работе устройства.

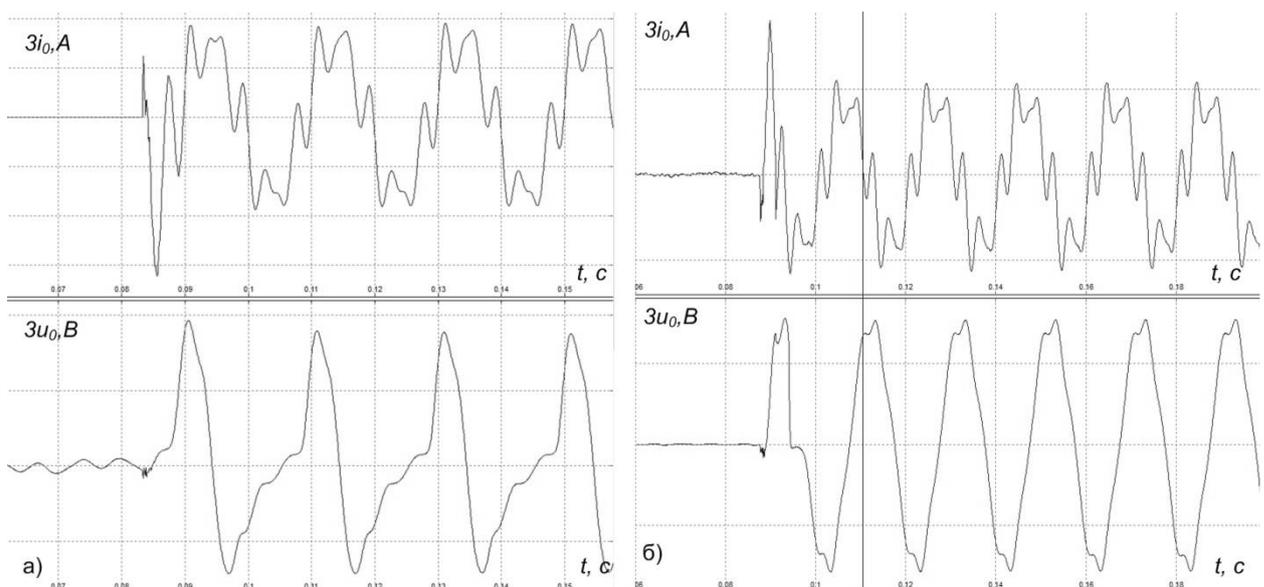


Рисунок 4.6 – Осциллограммы искусственного замыкания на линии РП-12-1, записанные на линиях РП-12-1(а) и Базьяны(б)

В процессе эксплуатации защиты с мая по июль 2012 года на линиях 10 кВ ПС Ханты-Мансийская было зафиксировано 97 ОЗЗ, большая часть которых носила самоустраняющийся (кратковременный) характер. Среди этих кратковременных ОЗЗ было зафиксировано 7 неселективных срабатываний устройств ИЗН-01, вызванных предшествующими кратковременными пробоями на смежных фидерах. В качестве меры преодоления обнаружившейся проблемы предложено ввести цифровую фильтрацию тока и напряжения нулевой последовательности. Применён фильтр нижних частот Баттерворта 4 порядка с частотой среза 2 кГц, обеспечивший подавление сигнала предшествующего пробоя при сохранении сигнала основного пробоя (рисунок 4.7), необходимого для распознавания замыкания. По результатам проведенных испытаний алгоритм волнового органа направления мощности был доработан блоком фильтрации, позволяющим избежать неселективного срабатывания устройства при наличии предшествующих частичных пробоев.

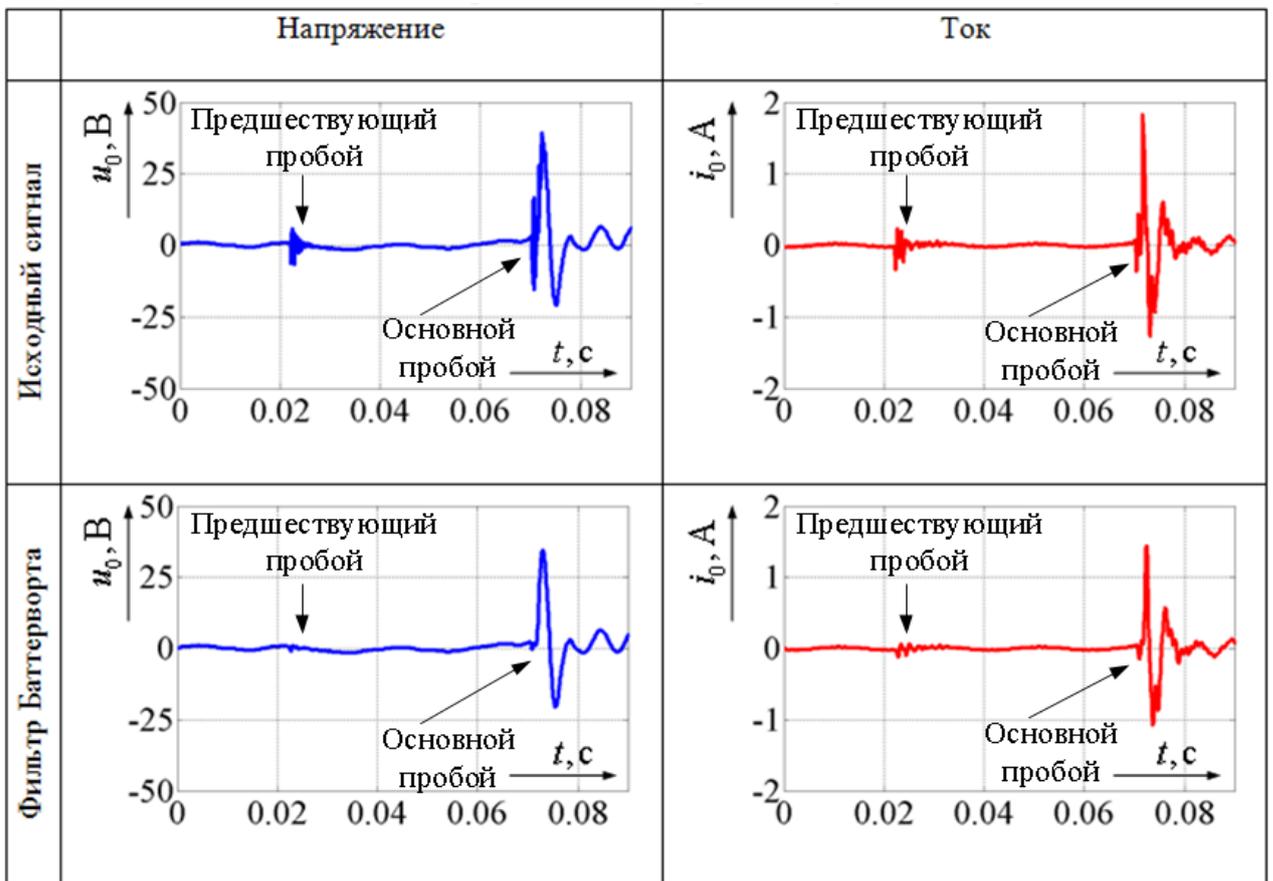


Рисунок 4.7 – Влияние фильтрации на предшествующий пробой

Дополнительно в устройстве было реализовано реле направления мощности по нулевой последовательности, и с 2013 г. устройство «ТОР 110-ИЗН» внедрено в серийное производство. На сегодняшний день реализовано и находится в опытной эксплуатации более 250 устройств.

4.2 Анализ осциллограмм реальных замыканий на землю

В 2013 г. автором установлены в опытную эксплуатацию устройства «ТОР 110-ИЗН» на подстанциях «Новошешминская» (г. Чистополь), «Олимпийская» (г. Волгоград), «Рубин» и «Туменская» (г. Коломна). Опытная эксплуатация устройств подтвердила, что процессы возникновения и развития ОЗЗ носят разнообразный характер. В настоящий момент компания ООО «ИЦ «Бреслер» обладает банком осциллограмм ОЗЗ, который был накоплен за период эксплуатации устройств ТОР 110-ИЗН на объектах ЕНЭС России. Подробные исследования процессов, возникающих в распределительных сетях 6-35 кВ при замыканиях на землю были описаны уже в 80¹-90² годах. Тогда же было показано, что большинству устойчивых ОЗЗ предшествуют кратковременные неустойчивые пробой изоляции длительностью от 1 до 10 мс, сопровождающиеся значительными по продолжительности бестоковыми паузами³. Несмотря на то, что распределительные сети эксплуатируются на протяжении длительного времени, вопросы классификации замыканий на землю остаются актуальными и по сей день⁴. Возможности микропроцессорной техники по осциллографированию токов и напряжений с большой разрешающей способностью, обусловленной увеличением частоты дискретизации, совершенствованием аналого-цифровых преобразователей, позволяет более детально изучить процессы ОЗЗ. Из анализа имеющегося банка осциллограмм

¹ Лихачёв Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

² Чапенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М.: Энергоатом-издат, 1986. – 128 с.

³ Шуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 151 с.

⁴ Широковец А.И. Классификация замыканий на землю и оценка устойчивости сети к феррорезонансу на основе результатов регистрации аварийных событий. – Релейная защита и автоматизация. – 2013. – №03(12). – С. 26-30.

установлено, что большая часть замыканий носила самоустраняющийся характер (90%), отличающийся достаточно быстрым пробоем изоляции с ее либо весьма непродолжительным восстановлением, либо с существованием ОЗЗ в течении времени до нескольких сотен миллисекунд.

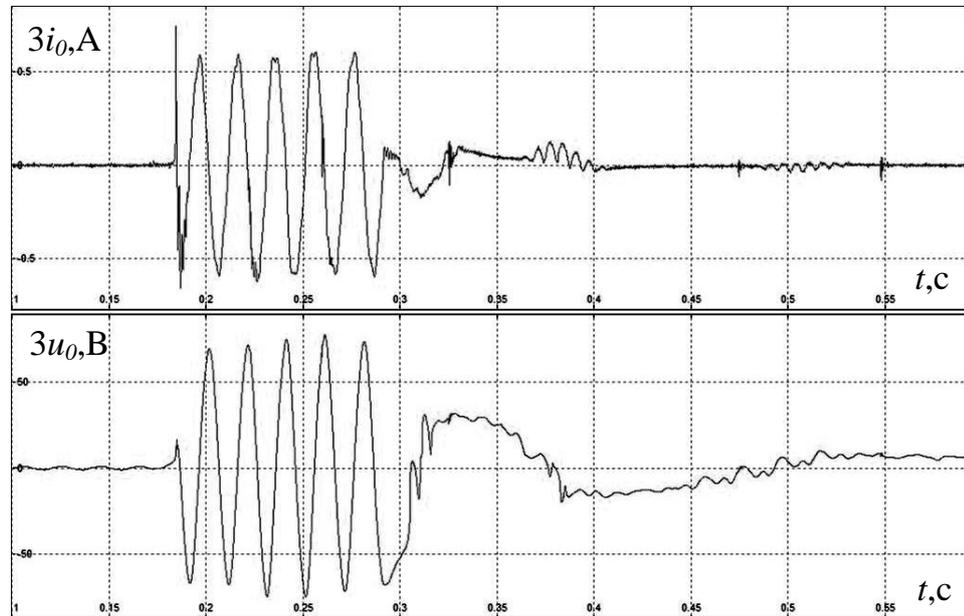


Рисунок 4.8 – Самоустраняющееся однофазное замыкание

Менее частыми являются устойчивые замыкания (9%). В зависимости от характера повреждения устойчивые замыкания также делятся на 2 вида. К первому – относятся медленно развивающиеся замыкания (рис. 5а), вызванные пробоем воздушного промежутка с возникновением стримера, плавно перетекающего в устойчивый пробой. Второй вид характеризуется быстрым установлением ОЗЗ (рис. 5б), но при этом до возникновения устойчивого ОЗЗ также фиксируются частичные пробои изоляции в месте замыкания.

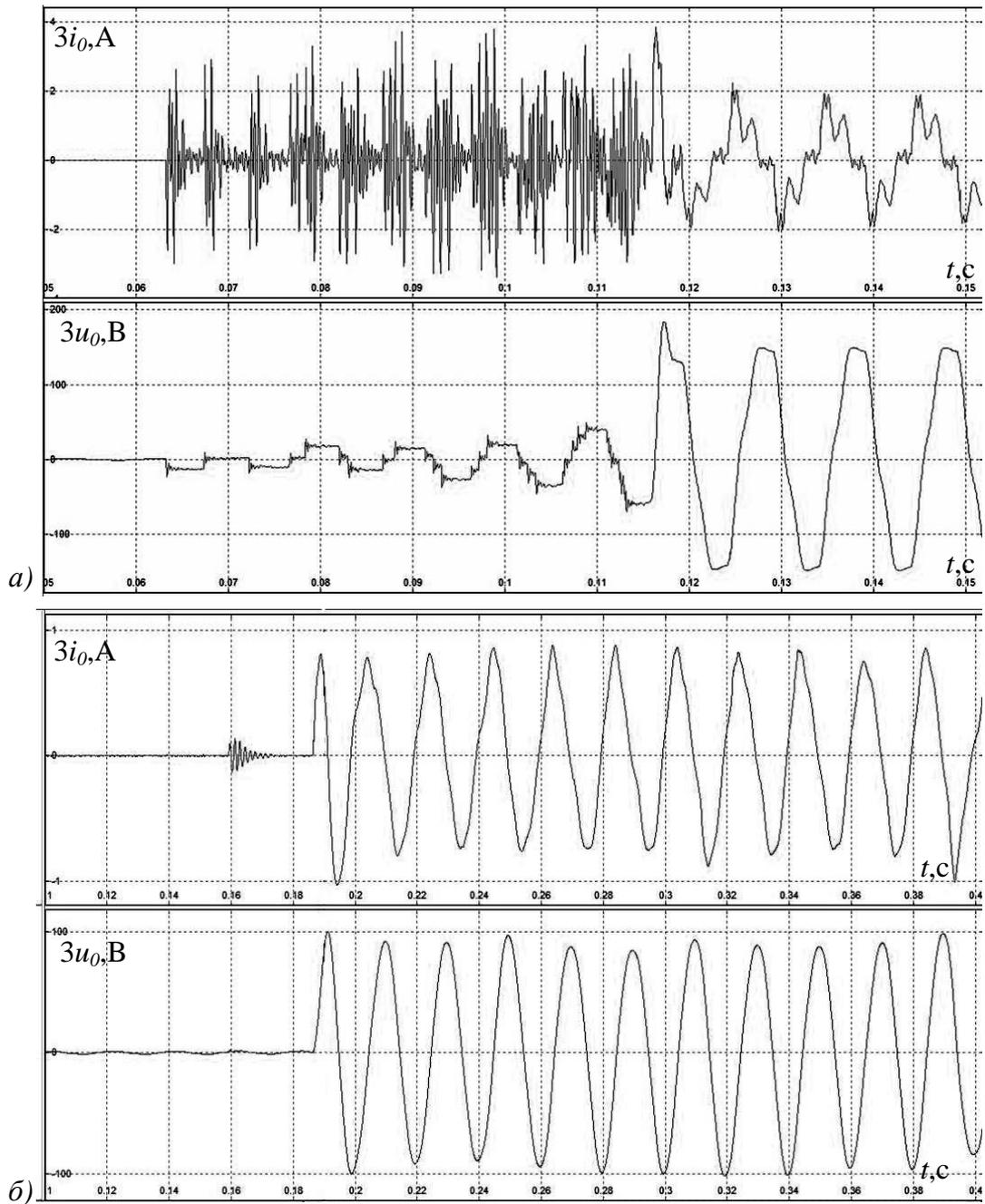


Рисунок 4.9 – Устойчивые однофазные замыкания

Третьим, не менее интересным видом ОЗЗ, но гораздо реже встречающимся (менее 1%), являются перемежающиеся замыкания (рис. 6). Здесь фиксируется возникновение ОЗЗ каждые 10 мс. Процесс перемежающегося ОЗЗ может носить длительный характер, постепенно переходя в устойчивое замыкание.

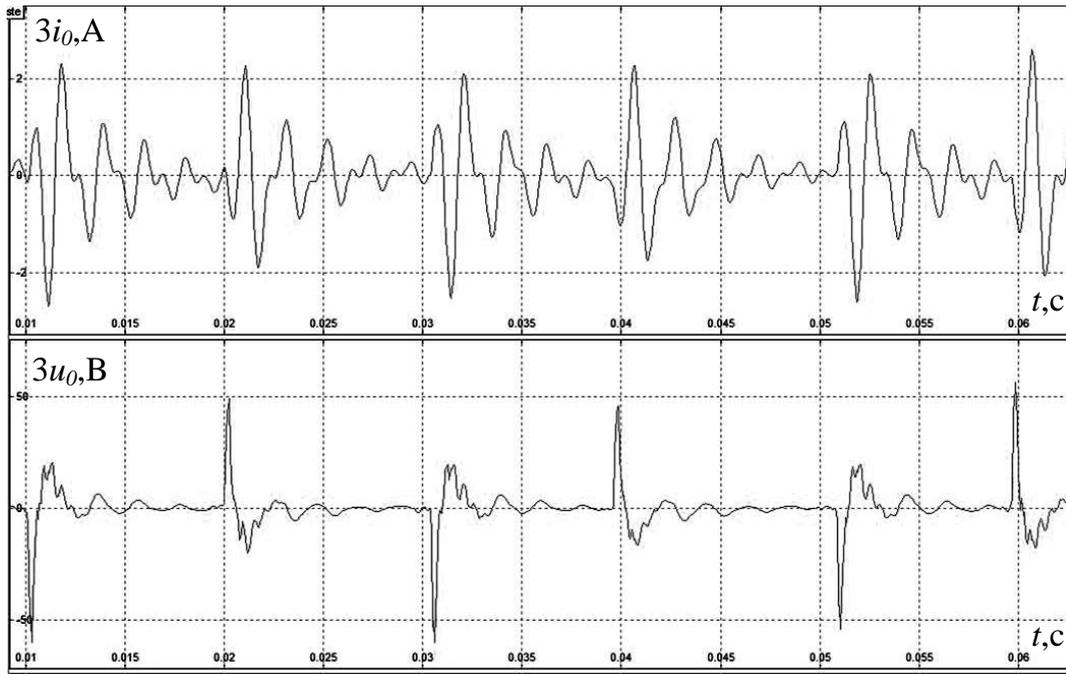


Рисунок 4.10 – Перемежающееся однофазное замыкание

Полученные процентные соотношения различных видов замыканий на землю расходятся с данными, встречающимися в литературе. Это обусловлено подавляющим влиянием данных с подстанции «Ханты-Мансийская» (более 70% имеющегося банка осциллограмм), в которой дуговые замыкания встречаются очень редко¹.

4.3 Апробация алгоритма определения поврежденного фидера по нормальным и локальным компонентам

Благодаря натурным испытаниям устройства «ТОР 110-ИЗН» появилась возможность провести испытания алгоритма определения поврежденного присоединения с использованием теории локальных режимов. В пункте 2.3 рассмотрены основные теоретические положения построения алгоритма определения поврежденного фидера при замыкании на землю с использованием

¹ Горюнов В.А. Исследования и разработка алгоритмов микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю с учетом электромагнитной совместимости: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Новосиб. гос. техн. университет, Новосибирск, 2011. – 22 с.

локальной модели объекта. Здесь приводятся дальнейшие исследования указанного алгоритма в условиях реальных замыканий на землю.

В качестве объекта исследования был выбран фидер РП-12-2 сети 10 кВ подстанции «Ханты-Мансийская» (рисунок 4.5), структурная схема которого представлена на рисунке 4.11. Наличие известной структурной схемы является обязательным условием качественного построения АМО. Для каждого участка фидера, исходя из заданной марки кабеля и опираясь на руководящие указания¹, был произведен инженерный расчет удельных параметров нулевой последовательности (R^0 , L^0 , C^0). Полученные данные представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Удельные параметры нулевой последовательности

Наименование кабеля	R_0 , Ом/км	X_{L0} , Ом/км	b_0 , кВАр
ЦААПл 3Х240-10	0,77	0,3	107,5
ААПЛУ 3Х185-10	0,99	0,308	100
ЦААПл 3Х185-10	0,99	0,308	100
ААБЛУ 3Х240-10	0,77	0,3	107,5
АБЛГ 3Х185-10	0,99	0,308	100
АСУ 120	1,53	0,344	84,5

¹ Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

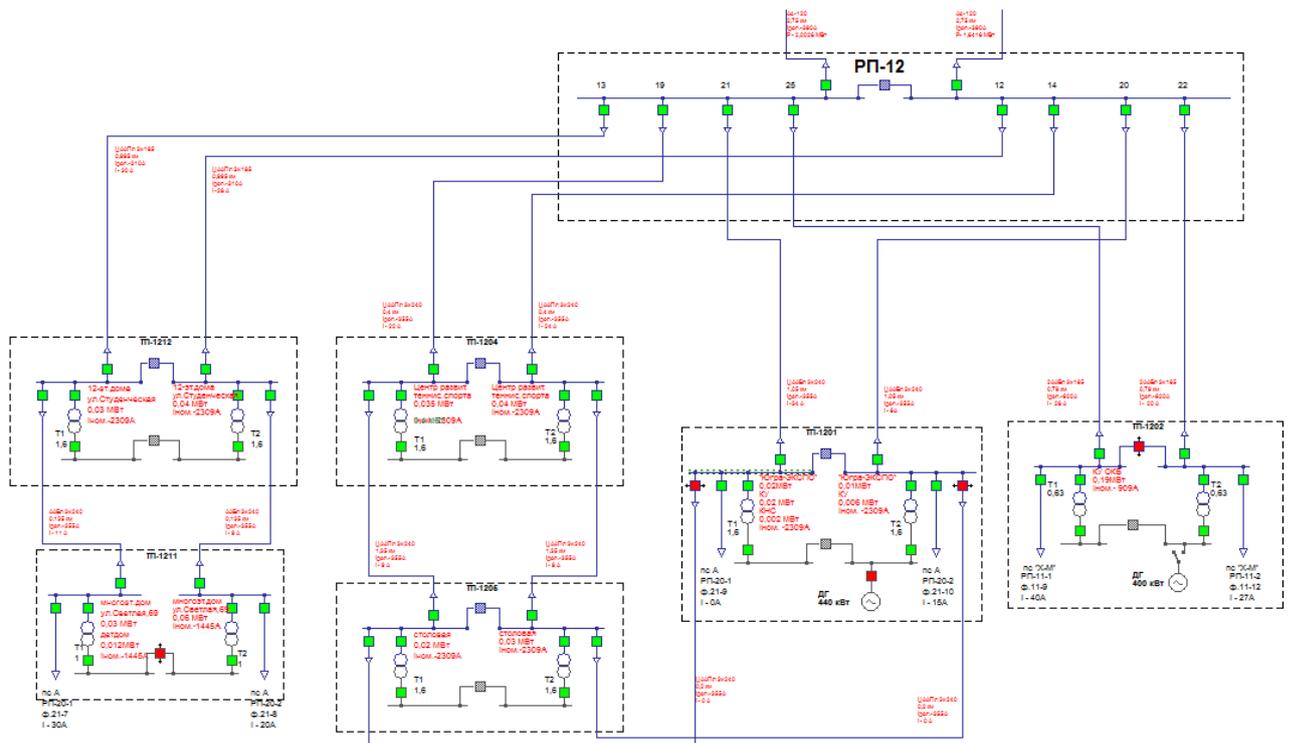


Рисунок 4.11 – Нормальная схема электрических соединений фидера 10 кВ РП-12

Накопленный банк осциллограмм реальных замыканий на землю использовался в качестве исходной информации: напряжение использовалось в качестве задающего воздействия в алгоритмической модели, а нормальный ток выступал критерием оценки адекватности построенной модели реальному состоянию фидера в конкретный момент времени (время конкретного замыкания на землю).

Согласно положениям, описанным в пункте 1.4, и имеющейся исходной информации была построена алгоритмическая модель нормального режима фидера РП-12-2 по нулевой последовательности (рисунок 4.12). Каждый участок фидера представлен на рисунке прямоугольником.

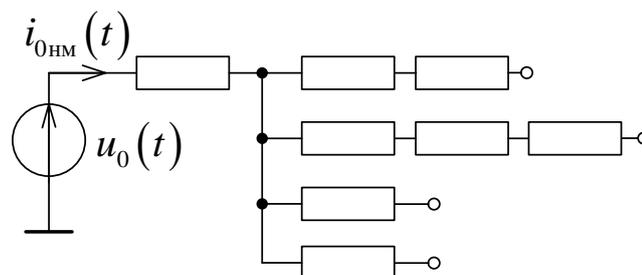


Рисунок 4.12 – Алгоритмическая модель фидера РП-12-2

В данной модели определяется нормальный ток в начале фидера $i_{0\text{нм}}(t)$ как реакция модели фидера на напряжение нулевой последовательности $u_0(t)$, взятое из осциллограммы реального замыкания на землю. На данном этапе исследования не ставилось задачи организации аналитического расчета, поэтому указанные вычисления производились в моделирующем программном комплексе MatLab/Simulink.

В ходе исследования были рассмотрены десять осциллограмм: восемь осциллограмм предположительно для неповрежденного состояния фидера, и две – для поврежденного. Для неповрежденного состояния фидера подтверждено, что нормальный ток и ток, взятый из осциллограммы, практически совпадают, что проиллюстрировано на рисунке 4.13. Расхождение между токами обусловлено неточностью при расчете удельных параметров модели, а также линейной интерполяцией напряжения $u_0(t)$. В то время как для поврежденного состояния фидера токи различаются как по величине, так и по фазе, а именно, находятся в противофазе, как показано на рисунке 4.14.

Как описано в пункте 2.3, можно построить плоскость замеров, которая позволит разделить замеры неповрежденного и поврежденного состояния фидера (рисунок 4.15). На плоскости можно начертить условную линию, которая разграничит эти замеры. Этот факт может быть использован при реализации защиты фидера от замыкания на землю.

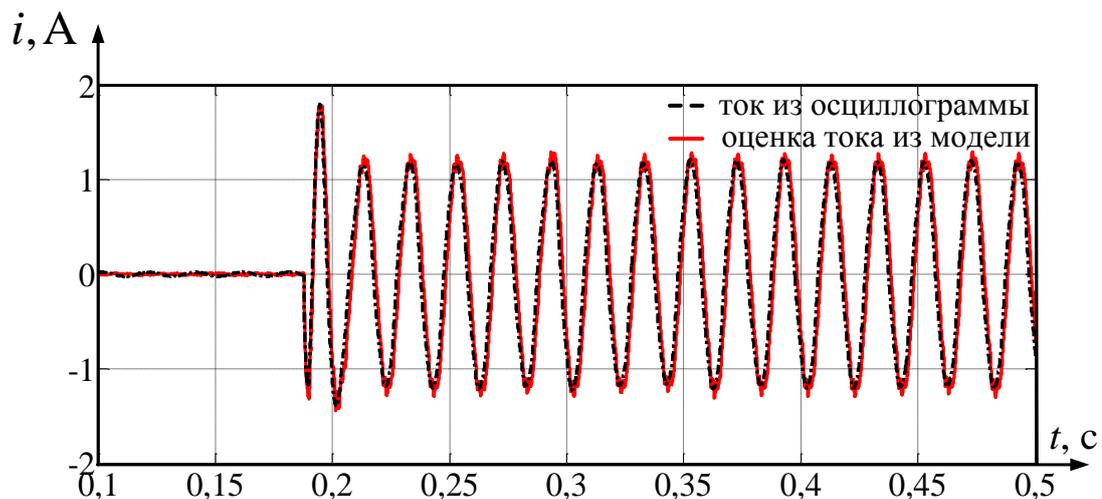


Рисунок 4.13 – Сравнение токов неповрежденного фидера

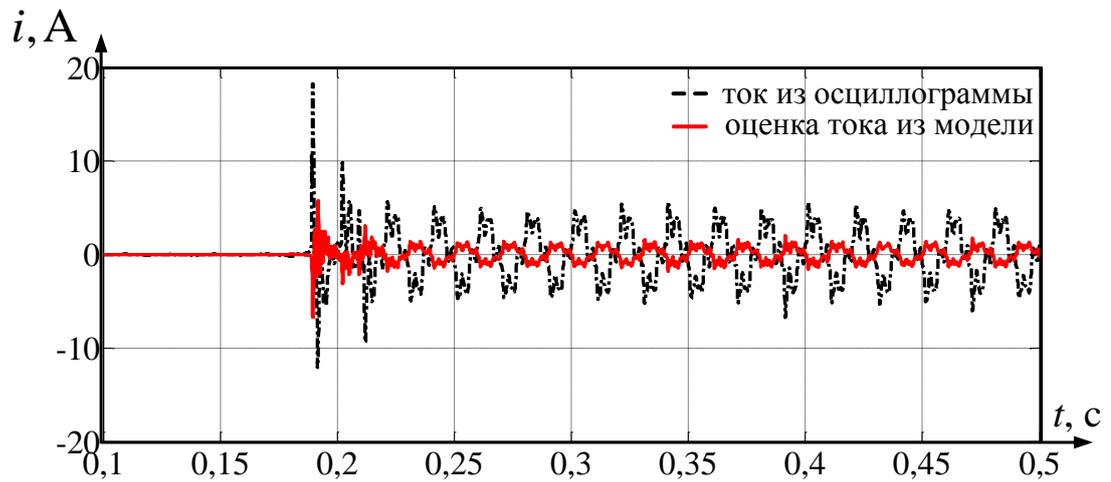


Рисунок 4.14 – Сравнение токов поврежденного фидера

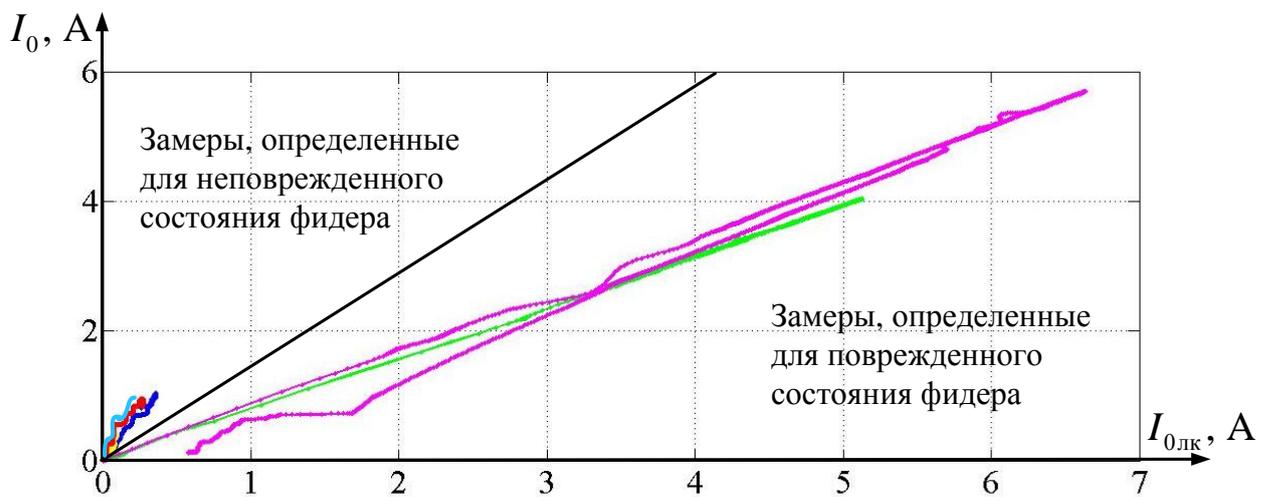


Рисунок 4.15 – Плоскость замеров

4.4 Выводы

1. Алгоритмы отстройки от предшествующих пробоев и анализа первых волн переходного процесса при вводе линии в работу внедрены в устройстве селективной защиты воздушных и кабельных линий сетей 6-35 кВ «ТОР 110-ИЗН».

2. На сегодняшний день реализовано и находится в опытной эксплуатации более 250 устройств. Получены положительные отзывы на работу устройства.

3. На основе полученных в результате эксплуатации ТОР 110-ИЗН осциллограмм замыканий на землю проведены испытания алгоритма определения поврежденного присоединения с использованием теории нормальных и локальных режимов. Проведенные испытания доказали работоспособность алгоритма и информационную значимость обнаруженных составляющих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Разработаны алгоритмические модели фидера распределительной сети в переходном режиме, позволяющие преобразовывать мгновенные значения наблюдаемых величин. Данные модели могут использоваться при анализе переходного процесса, возникающего при замыканиях на землю.

2. В ходе диссертационного исследования обнаружены новые информационные составляющие, названные нормальными и локальными. Раскрыта физическая сущность локального режима полностью наблюдаемой сети (регистрация и токов, и напряжений) и разработана методика построения модели объекта в локальном режиме. Разработана методика перемещения шунта в локальной модели.

3. Разработаны способы определения поврежденного присоединения, основанные на контроле сопротивления фидера по нулевой последовательности и позволяющие селективно определять повреждённое присоединение независимо от режима работы нейтрали. О состоянии фидера можно судить по уровню тока нулевой последовательности на выходе его алгоритмической модели, по уровням нормальных и локальных токов.

4. Разработан способ определения поврежденного присоединения с использованием модели фидера в локальном режиме при одностороннем наблюдении. Переход к локальной модели исключает влияние источника повреждения на неповрежденные части сети, что определяется по уровню локальных токов.

5. Разработан алгоритм определения поврежденного участка разветвленной сети с использованием её модели в локальном режиме; физический смысл алгоритма заключается в перемещении шунтов вдоль участков сети с постепенным определением неповрежденных частей сети и исключением их из анализа.

6. Разработан способ определения места замыкания на землю с использованием двух алгоритмических моделей, описывающих фидер до повреждения и после повреждения, с целью определения тока в месте повреждения и определения мгновенной мощности. Данный способ не зависит от характера повреждения и конфигурации сети. Способ принят к внедрению.

7. Разработан способ определения места повреждения при земляных замыканиях с использованием модели локального режима фидера, позволяющий определять место каждого замыкания без методической погрешности. Способ принят к внедрению.

8. Алгоритмы отстройки от предшествующих частичных пробоев и анализа первых волн переходного процесса в токе и напряжении нулевой последовательности, возникающих при вводе линии в работу, внедрены в терминале «ТОР 110-ИЗН», разработанном при участии автора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Монографии и учебные пособия

1. Аржанников, Е. А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов / Под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г. И. Атабеков. М.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.
3. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем: Пер. с польск. / С. Бернас, З. Цёк – М.: Энергоиздат. – 1982. – 312 с.
4. Дьяконов, В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2008. – 708 с.
5. Караев, Р. И. Переходные процессы в линиях большой протяженности / Р. И. Караев М.: Энергия. – 1978. – 191 с.
6. Куликов, А. Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования / А. Л. Куликов. М.: Энергоатомиздат, 2006. – 148 с.
7. Куликов, А. Л. Определение мест повреждений ЛЭП 6-35 кВ методами активного зондирования / А. Л. Куликов, М. Ш. Мисриханов, А. А. Петрухин. М.: Энергоатомиздат, 2009. – 161 с.
8. Лихачёв, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов / Ф. А. Лихачёв. М.: Энергия, 1971. – 152 с.
9. Лямец Ю. Я. Теоретические основы электротехники с элементами электроэнергетики и релейной защиты. Многопроводные системы: Учеб. пособие / Ю. Я. Лямец [и др.]. Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 160 с.
10. Неклепаев, Б. Н. Методы ограничения токов короткого замыкания в энергосистемах / Б. Н. Неклепаев. М.: Энергия, 1978. – 52 с.
11. Попов, И. Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И. Н. Попов, В. Ф. Лачугин, Г. В. Соколова М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 246 с.

12. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С. А. Ульянов. М.: Энергия, 1970. – 519 с.
13. Цапенко, Е. Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ / Е. Ф. Цапенко. М.: Энергоатом-издат, 1986. – 128 с.
14. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
15. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
16. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
17. Шуин, В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. / В. А. Шуин, А. В. Гусенков / Библиотечка электротехника; Вып. 11(35). – М.: НТФ «Энергопрогресс». – 104 с.
18. Шуин, В. А. Режимы заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю электрических сетей 3–35 кВ / В. А. Шуин, А. В. Гусенков, А. Ю. Мурзин / Иваново: ИГЭУ, 2001 г. - 92 с.
19. Шуцкий, В. И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В. И. Шуцкий, В. О. Жидков, Ю. Н. Ильин. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 151 с.

Статьи

20. Белянин, А. А., Лямец Ю.Я. Интерполяция процесса в электрической системе / А. А. Белянин, Ю. Я. Лямец // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VIII Всеросс. научн.-техн. конф., Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та, 2012, С. 252-254.
21. Богдан, А. В. Направленная защита повышенной селективности при замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью. / А. В. Богдан, В. В. Калмыков // Известия ВУЗов СССР. "Электро механика". – 1993. – №4. -С. 88-91.

22. 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.

23. Бычков, Ю. В. Алгоритмические модели в релейной защите / Ю. В. Бычков, Д. С. Васильев, А. О. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26-31.

24. Вайнштейн, Р. А. Учет дуговых перемежающихся замыканий при выборе тока срабатывания защиты от замыканий на землю в сети с резистивным заземлением нейтрали / Р. А. Вайнштейн и др. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 115-118. Головкин, С. И. Земляные защиты электрооборудования 6-35 кВ / С. И. Головкин // Новости электротехн. – 2012. – № 5. – С. 52-54.

25. Иванов, С. В. Определение мест повреждения двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / С. В. Иванов, Д. В. Кержаев // Материалы международной конф. «Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation», Москва, 2009.

26. Караев, Р. И. О применении разностных уравнений длинной линии / Р. И. Караев, Ю. Я. Лямец // Электричество. – 1972. – №11. – С. 28-36.

27. Караев, Р. И. Дифференциально-разностные уравнения волнового процесса в длинной линии. / Р. И. Караев, Ю. Я. Лямец // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1973. – №3. – С. 132-138.

28. Кискачи, В. М. Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ / В. М. Кискачи., Ю. Г. Назаров // Труды ВНИИЭ. М.: Госэнергоиздат. – 1963. – вып. 16.- С. 219 - 251.

29. Кужеков, С. Л. Предотвращение многоместных повреждений КЛ 6-10 кВ с помощью кратковременного низкоомного индуктивного заземления нейтрали / С. Л. Кужеков, В. А. Хнычев // Новости ЭлектроТехники. – 2010. – №3(63). – С. 46-48.

30. Куликов, А. Л. Адаптивное волновое определение места повреждения линии электропередач / А. Л. Куликов, В. В. Ананьев // Вестник Ивановского гос. энерг. унив. – 2014. – №4. – С. 21-25.

31. Куликов, А. Л. Адаптивные алгоритмы ОМП ЛЭП на основе имитационного моделирования / А. Л. Куликов, М. Д. Обалин // Совр. напр. разв. систем релейной защиты и автоматики энергосистем, Екатеринбург. – 2013. – С. 1-7.
32. Куликов, А. Л. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи / А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, П. А. Колобанов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – №5. – С. 57-62.
33. Лачугин В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю / В. Ф. Лачугин // Энергетик. – 1997. – № 9. – С. 21.
34. Лачугин, В. Ф. Разработка импульсных защит от замыканий на землю / В. Ф. Лачугин, С. В. Иванов, А. А. Белянин // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №03(08). – С. 50-57.
35. Лачугин, В. Ф. Многофункциональное устройство регистрации процессов контроля качества электроэнергии и определения места повреждения на линиях электропередачи / В. Ф. Лачугин [и др.] // Электрические станции. – 2013. – №8. – С. 29-36.
36. Лихачев, Ф. А. Повышение надежности распределительных сетей 6-10 кВ. / Ф. А. Лихачев // Электрические станции, 1990. №6. -С. 64 68.
37. Лямец, Ю. Я. Алгоритмические модели электрических систем / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов // Труды АЭН ЧР. – 1999. – №1-2. – С. 10-21.
38. Лямец, Ю. Я. Алгоритмическое моделирование фидера в переходном режиме / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Изв. вузов. Электромеханика, 2013, № 5, С. 49-56.
39. Лямец, Ю. Я. Анализ переходных процессов в длинной линии в базисе дискретного и непрерывного времени / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2012. – №5. – С. 11–16.
40. Лямец, Ю. Я. Диагностика линий электропередачи / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электротехн. микропроц. устр. и сист. Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та. – 1992. – С. 9-32.

41. Лямец, Ю. Я. К анализу переходных процессов в трёхфазных цепях методом симметричных составляющих / Ю. Я. Лямец // Электричество. – 1988. – №12. – С. 57-60.
42. Лямец, Ю. Я. Локация повреждений многопроводной сети при двухстороннем наблюдении / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов // Изв. РАН. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 96-107.
43. Лямец, Ю. Я. Модификации аварийных составляющих наблюдаемых токов и напряжений / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Электротехника. – 2015. – №2. – С. 22-28.
44. Лямец, Ю. Я. Мониторинг процессов в электрической системе. Ч.1. Преобразование, селекция и фильтрация / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, Д. В. Зиновьев // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 2-10.
45. Лямец, Ю. Я. Мониторинг процессов в электрической системе. Ч.1. Цифровая обработка осциллограмм токов короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, Д. В. Зиновьев // Электричество. – 2006. – № 11. – С. 2-10.
46. Лямец, Ю. Я. Об информационной теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец [и др.] // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2009. – № 1. – С. 32-44.
47. Лямец, Ю. Я. Об информационной теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман // Релейщик. – 2009. – № 3. – С. 36-37.
48. Лямец, Ю. Я. Описание линии 6-35 кВ при распознавании замыкания на землю в распределительной сети / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин // Электротехника, 2014, № 3, С. 2-7.
49. Лямец, Ю. Я. Оптимизационный алгоритм контроля состояния электрической сети / Ю. Я. Лямец, В. И. Антонов, Г. С. Нудельман // Изв. РАН. Энергетика. – 1994. – №2. – С. 100-110.
50. Лямец, Ю. Я. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи / Ю. Я. Лямец, В. А. Ильин, Н. В. Подшивалин // Электричество. – 1996. – № 12. – С. 2-7.

51. Лямец, Ю. Я. Слагаемые свободного процесса в длинной линии. / Ю. Я. Лямец // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1978. – №1. – С. 11-17.
52. Лямец, Ю. Я. Фильтры информационных составляющих тока и напряжения электрической сети / Ю. Я. Лямец, В. А. Ильин // Изв. РАН. Энергетика. – 1995. – №3. – С. 174-189.
53. Лямец, Ю. Я. Эволюция дистанционной релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов // Электричество. – 1999. – № 3. – С. 8-15.
54. Мухаметшин, Р. Я. Устройство адаптивной токовой защиты электрических сетей от однофазных замыканий на землю / Р. Я. Мухаметшин, Д. Я. Пеленев // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: Тезисы докладов 5 Всероссийской конференции. – Пермь. – 2012. – С. 137.
55. Роженцова, Н. В. Разработка алгоритма работы защит от замыканий на основе нечеткой логики / Н. В. Роженцова, Г. В. Вагапов, М. З Нургалиев // Федоровские чтения - 2012: 42 Всеросс. науч.-практ. конф. – Москва. – 2012. – С. 120-122.
56. Павлов А.О. Определение места повреждения в схемах с многосторонним питанием / А. О. Павлов, Ю. В. Бычков // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 2. – С.33-38.
57. Ступель, А. И. Моделирование на ЦВМ частотных характеристик линий при расчете переходных процессов волновым методом / А. И. Ступель, Ю. Н. Львов, Л. С. Левина // Электричество. – 1972. – №1. – С. 25-28.
58. Хо, Д. Новый принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения /Д. Хо [и др.]// Электричество. – 2015. – №2. – С. 17–22
59. Шалин, А. И. Защита от замыканий на землю в сетях 6...35кВ с резистивным заземлением нейтрали / А. И. Шалин, Е. Н. Политов// Электроэнергетика. – 2002. – Ч.1. – С. 45-54.

60. Шалин, А. И. Замыкания на землю в линиях электропередачи 6–35 кВ. Особенности возникновения и приборы защиты / А. И. Шалин // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1 (31).

61. Широковец, А. И. Классификация замыканий на землю и оценка устойчивости сети к феррорезонансу на основе результатов регистрации аварийных событий / А. И. Широковец // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – №03(12). – С. 26-30.

62. Шуин, В. А. Влияние электромагнитных переходных процессов на функционирование токовых защит от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ / В. А. Шуин, О. А. Сарбеева, Е. С. Чугрова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2009. – № 4. – С. 84-91.

63. Шуин, В. А. Особенности использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6-10 кВ / В. А. Шуин, Д. И. Ганджаев, О. А. Сарбеева, Е. С. Шагурина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – № 1. – С. 32-41.

64. Efremov, V.A. Program set for the analysis of disturbances and fault location in transmission lines DISAN/LOCATOR / V. A. Efremov [et al.] // CIGRE SC 34 Colloquium, Italy, Florence. – 1999. – P. 1-7.

65. Izykowski, J. Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements / J. Izykowski [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – V. 21. – № 2. – P. 627-633.

66. Liu, Y. A traveling wave fault location method for earth faults based on mode propagation time delays of multi-measuring points / Y. Liu, G. Sheng, Z. He, X. Jiang // Prz. elektrotechn. – 2012. – Vol.88. – № 3a. – С. 254-258.

67. Mechraoui, A. A New Principle for High Resistance Earth Fault Detection During Fast Power Swings for Distance Protection / A. Mechraoui, D. W. P. Thomas // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – V. 12. – №4. – P. 1452-1457.

68. Rahideh, A. A Fault Location Technique for Transmission Lines Using Phasor Measurements / A. Rahideh, M. Gitizadeh, S. Mohammadi // International Journal of Engineering and Advanced Technology. – 2013. – V. 3. – №1. – P. 241-248.

69. Shuin, V.A. Selective signalling system and protection of grounds faults in 6 - 10 kv compensated electric networks / Shuin, V.A., Gusenkov A.V. // IEEE Russia Power Tech. – PowerTech St. Petersburg. – 2005.

70. Teng J.-H. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators. / Teng, W.-H. Huang. // IEEE Trans. on Power Systems, 2014, V. 29, № 4, P. 1653-1662.

71. Tziouvaras, D. A. New Multi-Ended Fault Location Design for Two- or Three-Terminal Lines / D. A. Tziouvaras, J. Roberts, G. Benmouyal // Developments in Power System Protection, 7th International Conference on (IEE). – 2001. – P. 395-398.

72. Wiszniewski, A. Accurate fault impedance locating algorithm / A. Wiszniewski // Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C. – 1983. – V. 130. – №6. – P. 311-314.

73. Устройство направленной волновой защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ типа УЗС-01. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Казань: Энергосоюз, 1998.

74. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

75. Вайнштейн, Р. А. Исследование и разработка быстродействующей защиты от замыкания на землю в компенсированных сетях / Р. А. Вайнштейн [и др.] // Копия отчета оНИР. М.: 1983. – 86 с.

Патенты

76. Измеритель расстояния до мест коротких замыканий [Текст] : авт. свид. 1019375 СССР : МПК G01R31/08 / Кошкин Ю. Л., Островский В. А. ; заявитель и патентообладатель Моск. ордена Трудового Красного Знамени инст. инж. сельскохоз. произв. – № 3362509/18-21 ; заявл. 09.12.1981 ; опубл. 23.05.1983, Бюл. № 19. – 3 с.

77. Способ защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю [Текст] : пат. 2121744 Российская Федерация : МПК H02H3/16 / Булычев А. В., Ванин В. К. ; заявитель и патентообладатель Булычев А. В., Ванин В. К.. – № 95117700/09 ; заявл. 28.09.1995 ; опубл. 10.11.1998.

78. Способ определения места и характера повреждения в электрической системе с использованием моделей входящих в неё линий электропередачи [Текст] : пат. 2033623 Российская Федерация : МПК G01R31/11, H02H3/28 / Лямец Ю. Я., Антонов В. И., Нудельман Г. С. ; заявитель и патентообладатель Чувашский гос. унив. им. И. Н. Ульянова. – № 4687847/63 ; заявл. 12.05.1989 ; опубл. 20.04.1995. – 9 с.

79. Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием её моделей [Текст] : пат. 2033622 Российская Федерация : МПК G01R31/11, H02H3/28 / Лямец Ю. Я., Антонов В. И., Ефремов В. А., Нудельман Г. С., Подшивалин Н. В. ; заявитель и патентообладатель Чувашский гос. унив. им. И. Н. Ульянова. – № 4685872/63 ; заявл. 03.05.1989 ; опубл. 20.04.1995. – 7 с.

80. Способ определения места повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении [Текст] : пат. 2492565 Российская Федерация : МПК H02H3/28 / Лямец Ю. Я., Воронов П.И. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2012130712/07 ; заявл. 17.07.2012 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 12 с.

81. Способ определения поврежденного присоединения и места однофазного замыкания в сети с изолированной нейтралью [Текст] : пат. 2174690 Российская Федерация : МПК G01R31/08 / Авданин В. В., Никитин К. И., Тупуреин В. Ю. ; заявитель и патентообладатель Омский государственный технический университет. – № 99120522/09 ; заявл. 28.09.1999 ; опубл. 10.10.2001.

82. Способ определения расстояния до мест двойных замыканий на землю [Текст] : авт. свид. 1569753 СССР : МПК G01R31/08 / Ванзанович Э. П.,

Саухатас А. С., Гловацкий В. Г. ; заявитель и патентообладатель Рижский политехнический институт им. А. Я. Пельше – № 4425697 ; заявл. 16.05.1988.

83. Способ определения расстояния до места однофазного замыкания на землю в радиальных распределительных сетях [Текст] : пат. 2250472 Российская Федерация : МПК G01R31/08 / Качесов В. Е. ; заявитель и патентообладатель Новосибирский государственный технический университет. – № 2003120823/28 ; заявл. 07.07.2003 ; опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 7 с.

84. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи [Текст] : пат. 2472169 Российская Федерация : МПК G01R31/08 / Лачугин В. Ф. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Энерг. инст. им. Г.М. Кржижановского». – № 2011121762/28 ; заявл. 31.05.2011 ; опубл. 10.01.2013, Бюл. № 1. – 7 с.

85. Устройство диагностики и направленной защиты от однофазных замыканий в электрических сетях [Текст] : пат. на полезную модель 128027 Российская федерация : МПК H02H3/16 / Куликов А. Л., Шуин В. А., Петрухин А. А. ; заявитель и патентообладатель ОАО «МРСК Центра и Приволжья» – № 2012146536/07 ; заявл. 31.10.2012 ; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 2 с.

86. Устройство для защиты линии электропередачи от короткого замыкания [Текст] : авт. свид. 688946 СССР / Барабанов Ю. А. ; заявитель и патентообладатель Московский ордена Ленина энерг. инст. – заявл. 21.06.76. – 3 с.

87. Double adaptive complex impedance ground distance protection [Text] : пат. 87100595 КНР : МПК H02H7/26 / Wei E. W. ; заявитель и патентообладатель Ministry of Water Resources Electric Power Research Institute ; заявл. 09.02.1987 ; опубл. 19.10.1988. – 14 с.

88. Fault location using travelling waves [Text] : пат. 8655609 США : МПК G01R13/06, G01R13/02, G01R13/04, G01R13/08 / E. Schweitzer ; заявитель и патентообладатель Schweitzer Engineering Laboratories Inc. ; заявл. 12.10.2012 ; опубл. 18.02.2014. – 22 с.

89. Method and a device for fault location in the event of a fault on a power transmission line [Text] : пат. 4906937 США : МПК G01R31/08 / K. Wikstrom, L. Angquist ; заявитель и патентообладатель Asea Brown Boveri AB ; заявл. 22.03.1989 ; опубл. 06.03.1990. – 5 с.

90. Method and device for locating a fault point on a three-phase power transmission line [Text] : пат. 4559491 США : МПК G01R31/08 / Saha M. ; заявитель и патентообладатель ASEA Aktiebolag ; заявл. 31.08.1983 ; опубл. 17.12.1985. – 13 с.

91. Method for locating a fault point on a transmission line [Text] : пат. 4314199 США : МПК G01R31/08 / M. Yamaura, Y. Yamakoshi ; заявитель и патентообладатель Tokyo Shibaura Denki Kabushiki ; заявл. 24.10.1979 ; опубл. 02.02.1982. – 13 с.

92. Method of locating the position of a fault on a power transmission [Text] : пат. 5825189 США : МПК G01R31/08 / A. T. Johns ; заявитель и патентообладатель GEC Alstom Limited ; заявл. 13.08.1996 ; опубл. 20.10.1998. – 15 с.

Авторефераты диссертаций

93. Бычков, Ю. В. Развитие и приложения дистанционного метода определения места повреждения линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2012. – 24 с.

94. Горюнов В.А. Исследования и разработка алгоритмов микропроцессорной защиты от однофазных замыканий на землю с учетом электромагнитной совместимости: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Новосиб. гос. техн. университет, Новосибирск, 2011. – 22 с.

95. Ефимов, Е. Б. Оптимальная фазовая селекция коротких замыканий в линиях электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2002. – 20 с.

96. Иванов, С. В. Информационный анализ линий электропередачи и способов их защиты: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2005. – 20 с.

97. Квришвили, Л. В. Исследование и разработка методов локации однофазных замыканий на землю в распределительных сетях: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Новосиб. гос. техн. университет, Томск, 2012. – 22 с.

98. Лямец, Ю. Я. Анализ дискретных процессов в электрических цепях: автореф. дис. ... к-та техн. наук. МИИТ, М., 1973. – 24 с.

99. Мартынов, М. В. Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2014. – 24 с.

100. Павлов, А. О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2002. – 20 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОПИСАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДЛИННЫХ ЛИНИЯХ

Функции токов $i_x(k, \varepsilon)$ и $i_y(n, \nu)$ определены по формулам (1.12), (1.13) (таблица А.1) и (1.18), (1.19) (таблица А.2). В таблице А.2 принято обозначение $I_m = E_m/R_B$. Напомним, что при определении тока в месте коммутации источник задаётся в форме (1.14), (1.16), а на противоположной стороне – в форме (1.15), (1.17).

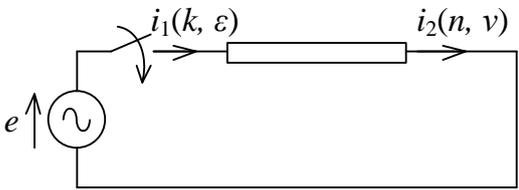
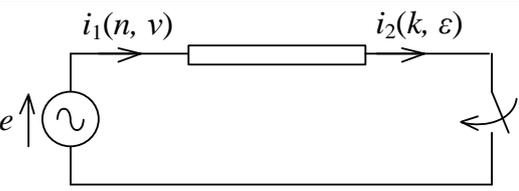
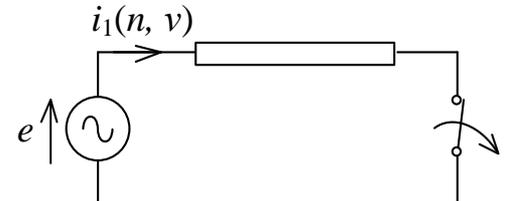
Таблица А.1 – Токи на концах длинной линии без потерь в схемах с постоянным источником

№	Схема	λ	$I_{уст}$	$I_{пд}$	$I_1(0)$	$I_2(0)$
1		$-\frac{R_1 - R_B}{R_1 + R_B}$	$\frac{E}{R_1}$	0	$\frac{I_{уст}}{1 + \frac{R_B}{R_1}}$	0
2					0	$\frac{R_1}{R_B} I_{уст}$
3		-1	0	$\frac{E}{R_2}$	$I_{пд}$	0

Продолжение таблицы А.1

№	$I_{1св}(0)$	$I_{2св}(0)$	$I_1(k), I_1(n)$	$I_2(n), I_2(k)$
1	$-\frac{I_{уст}}{1 + \frac{R_1}{R_B}}$	$-I_{уст}$	$I_{уст} \left(1 - \frac{R_B}{R_1 + R_B} \lambda^k \right)$	$I_{уст} (1 - \lambda^n)$
2	$-I_{уст}$	$\frac{I_{уст}}{\frac{R_1}{R_B} - 1}$	$I_{уст} (1 - \lambda^n)$	$I_{уст} \left(1 + \frac{R_1 - R_B}{R_B} \lambda^k \right)$
3	$I_{пд}$	0	$I_{пд} (-1)^n$	0

Таблица А.2 – Токи на концах длинной линии без потерь в схемах с синусоидальным источником

№	Схема	λ	$\underline{I}_{m1 \text{ уст}}$ $\underline{I}_{m2 \text{ уст}}$
1		1	$I_m \text{ctg} \alpha \angle (\psi - \pi/2)$ $(I_m / \sin \alpha) \angle (\psi - \alpha - \pi/2)$
2		1	$I_m \text{ctg} \alpha \angle (\psi - \alpha - \pi/2)$ $(I_m / \sin \alpha) \angle (\psi - \pi/2)$
3		-1	$I_m \text{tg} \alpha \angle (\psi - \alpha - \pi/2)$ 0

Продолжение таблицы А.2

№	$\underline{I}_{m1 \text{ пд}}$ $\underline{I}_{m2 \text{ пд}}$	$\underline{I}_{m1} (0)$ $\underline{I}_{m2} (0)$	$\underline{I}_{m1 \text{ сб}} (0)$ $\underline{I}_{m2 \text{ сб}} (0)$
1	0 0	$I_m \angle \psi$ 0	$I_m \angle (\psi - \alpha + \pi/2)$ $-\underline{I}_{m2 \text{ уст}}$
2	$I_m \text{tg} \alpha \angle (\psi - \alpha - \pi/2)$ 0	$\underline{I}_{m1 \text{ пд}}$ $(I_m / \cos \alpha) \angle \psi$	$(2 I_m / \sin 2 \alpha) \angle (\psi - \alpha + \pi/2)$ $(2 I_m / \sin 2 \alpha) \angle (\psi - \alpha + \pi/2)$
3	$I_m \text{ctg} \alpha \angle (\psi - \alpha - \pi/2)$ -	$\underline{I}_{m1 \text{ пд}}$ 0	$(2 I_m / \sin 2 \alpha) \angle (\psi + \alpha + \pi/2)$ 0

Окончание таблицы А.2

№	$i_1(k, \varepsilon), i_1(n, \nu)$ $i_2(n, \nu), i_2(k, \varepsilon)$
1	$(I_m/\sin\alpha) \left[\cos(2\alpha\varepsilon + \psi - \alpha) - \cos\alpha \cos(2\alpha(k + \varepsilon) + \psi) \right]$ $(I_m/\sin\alpha) \left[\cos(2\alpha\nu + \psi - \alpha) - \cos(2\alpha(n + \nu) + \psi - \alpha) \right]$
2	$(I_m/\sin\alpha) \left[(1/\cos\alpha) \cos(2\alpha\nu + \psi - \alpha) - \cos\alpha \cos(2\alpha(n + \nu) + \psi - \alpha) \right]$ $(I_m/\sin\alpha) \left[(1/\cos\alpha) \cos(2\alpha\varepsilon + \psi - \alpha) - \cos(2\alpha(k + \varepsilon) + \psi) \right]$
3	$(I_m/\cos\alpha) \left[\sin\alpha \cos(2\alpha(n + \nu) + \psi - \alpha) - (1/\sin\alpha)(-1)^n \cos(2\alpha\nu + \psi - \alpha) \right]$ 0

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОГО
УЧАСТКА РАЗВЕТВЛЕННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ**

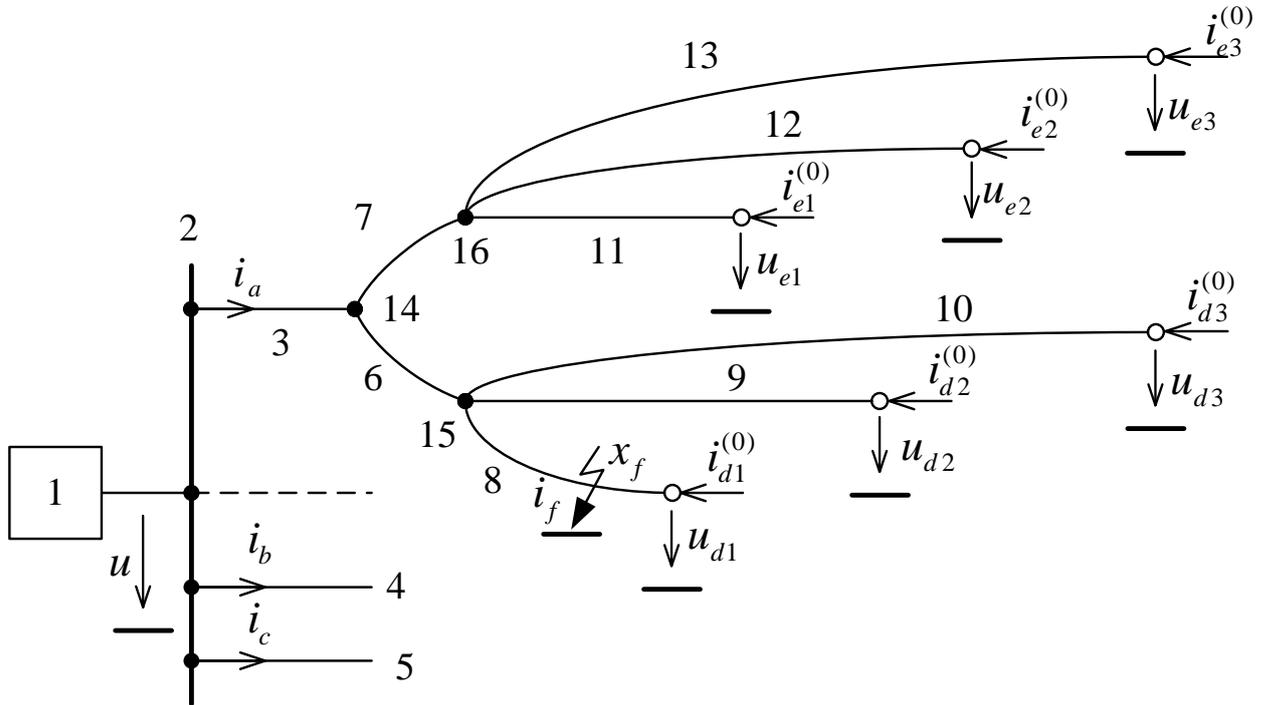


Рисунок Б.1 – Обобщенная модель исходной разветвленной распределительной сети

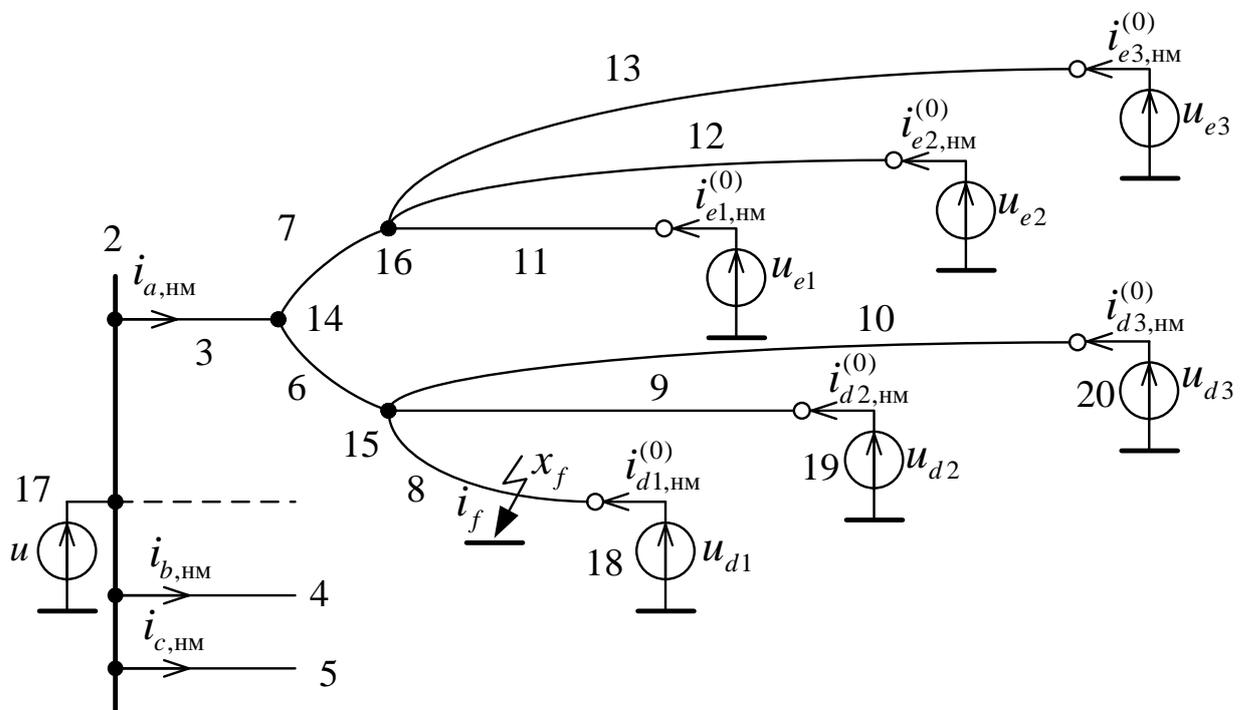


Рисунок Б.2 – Модель нормального режима исходной сети

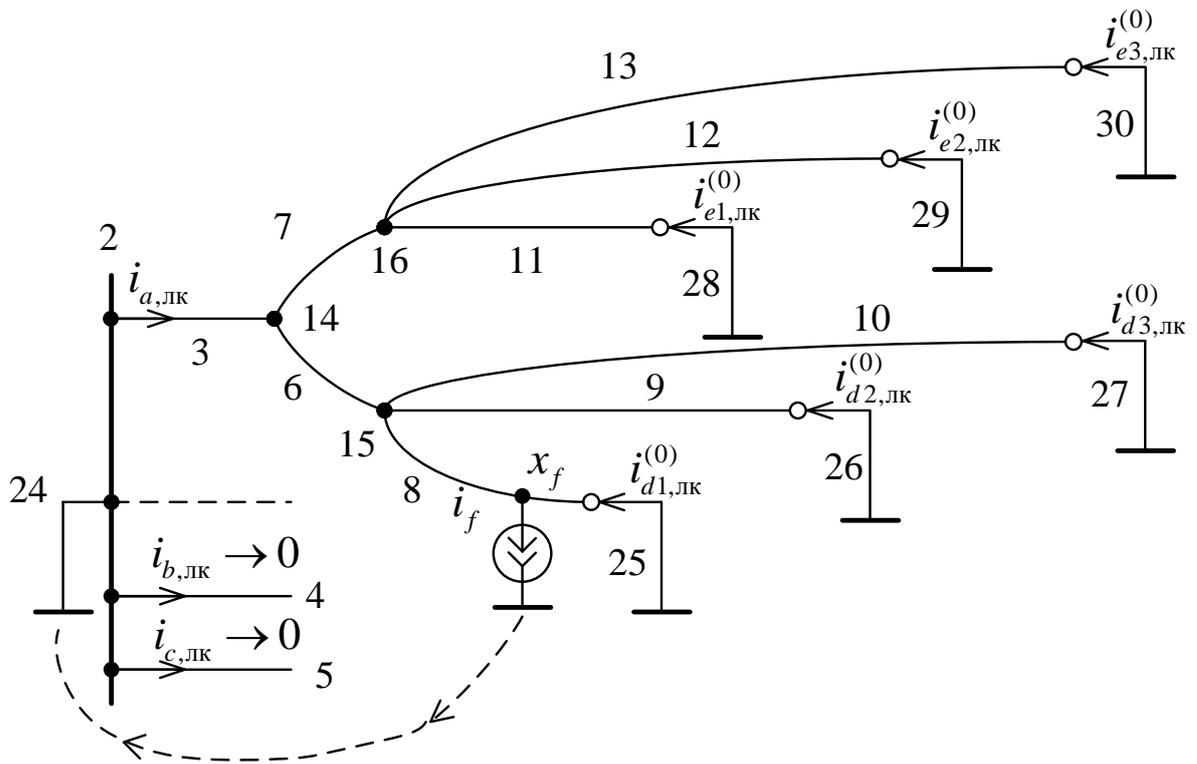


Рисунок Б.3 – Модель локального режима исходной сети

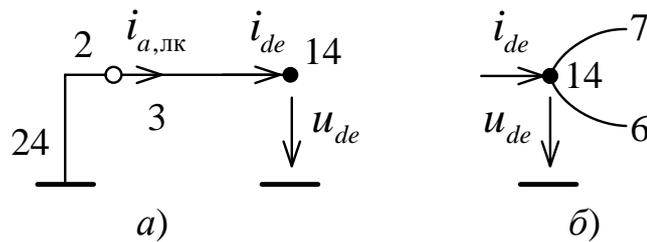


Рисунок Б.4 – Перемещение шунта на первом этапе

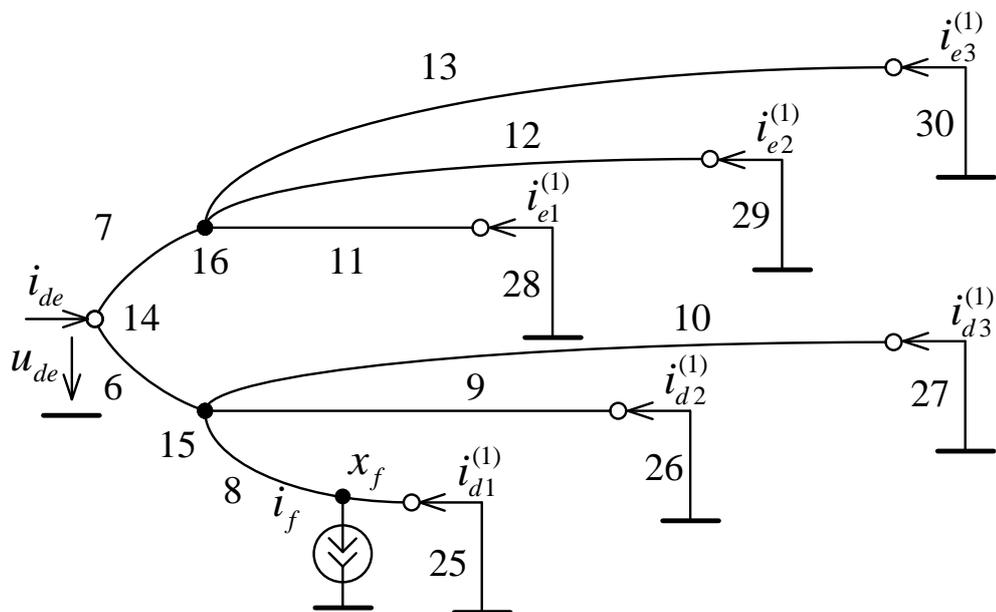


Рисунок Б.5 – Укороченная модель сети после первого этапа

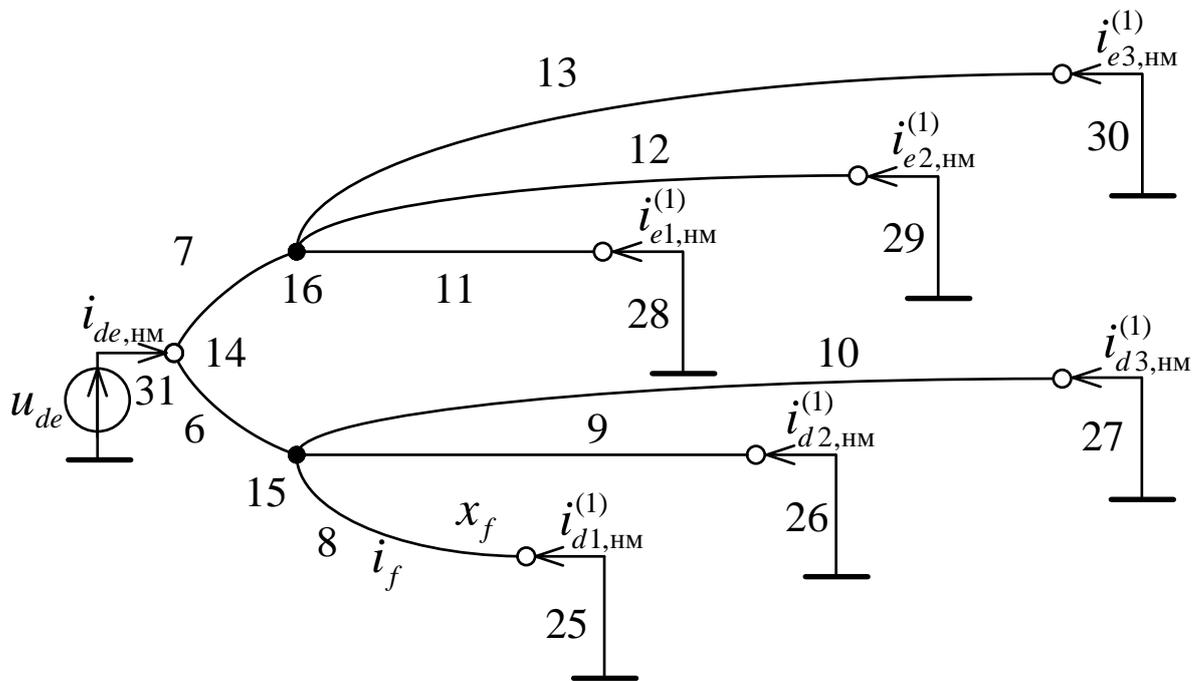


Рисунок Б.6 – Модель нормального режима второго этапа

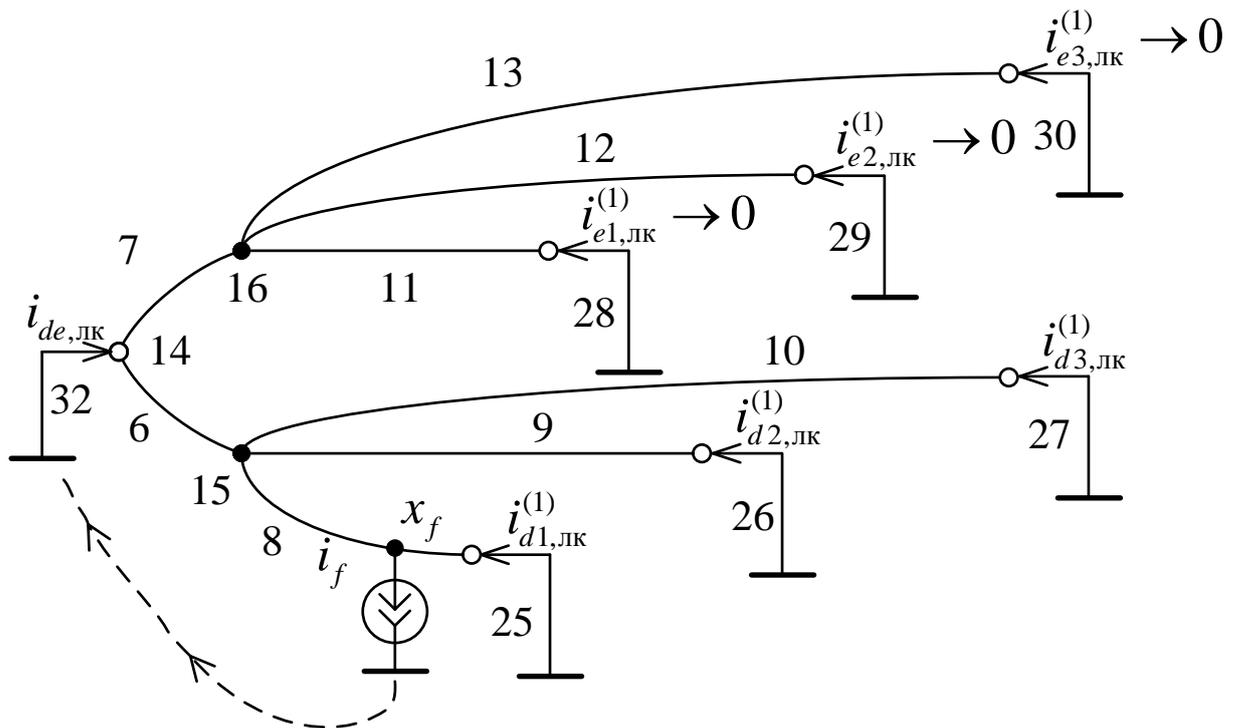


Рисунок Б.7 – Модель локального режима второго этапа

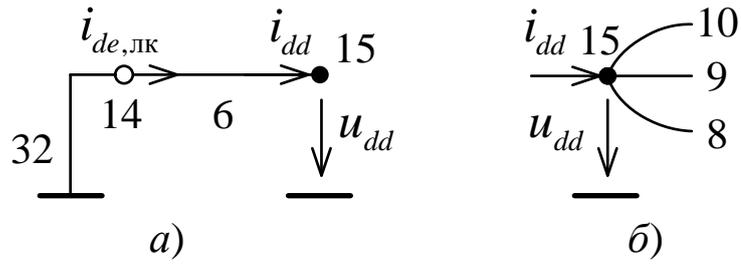


Рисунок Б.8 – Перемещение шунта на втором этапе

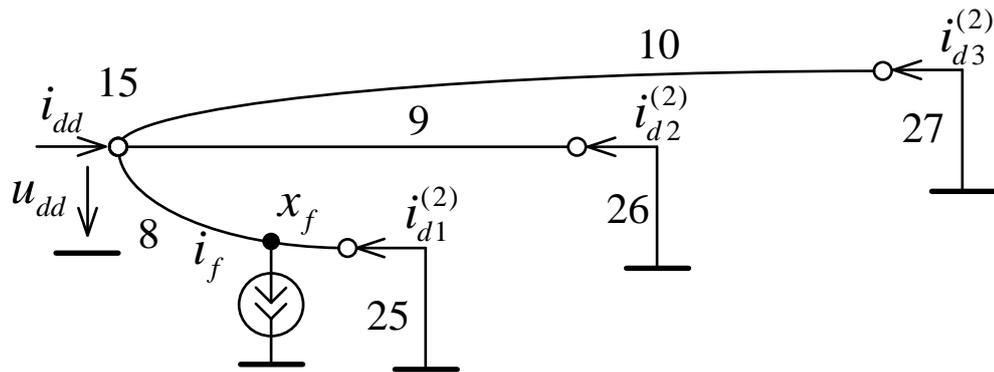


Рисунок Б.9 – Укороченная модель сети после второго этапа

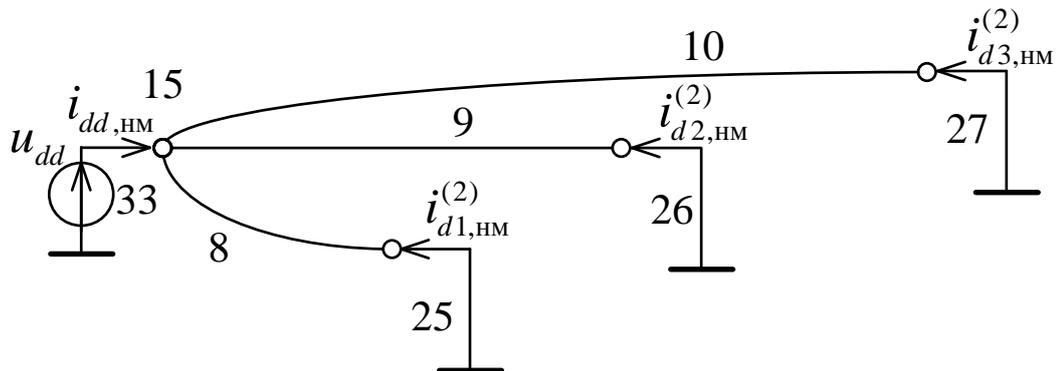


Рисунок Б.10 – Модель нормального режима третьего этапа

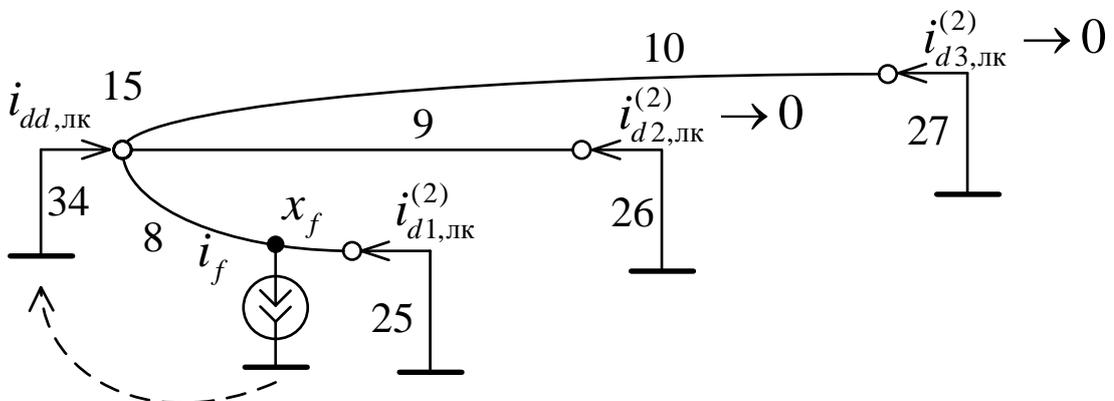


Рисунок Б.11 – Модель локального режима третьего этапа

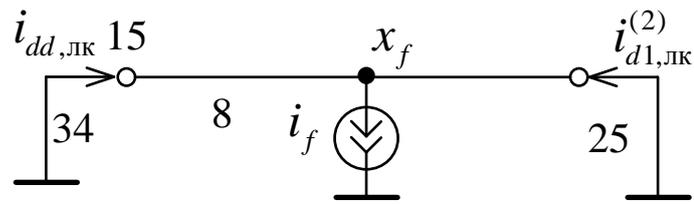


Рисунок Б.12 – Локальная модель поврежденного участка