

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

На правах рукописи

Воронов Павел Ильич

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ И ЛОКАЦИИ
ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ 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 Основные понятия и определения	8
1.1 Обзор литературы	8
1.2 Структура дискретного пространства.....	29
1.3 Нераспознаваемые режимы.....	32
1.4 Выводы	36
Глава 2 Информационные аспекты адаптации	37
2.1 Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи	37
2.2 Постановка задачи.....	38
2.3 Процедуры и результаты обучения реле	39
2.4 Объектные характеристики реле	42
2.5 Дистанционная защита с прямой адаптацией	45
2.6 Результаты обучения неадаптивного и адаптивного реле сопротивления ...	47
2.7 Выводы	52
Глава 3 Информационные аспекты локации повреждений	54
3.1 Короткие замыкания в одном месте без обрыва проводов.....	55
3.2 Энергетический критерий	60
3.3 Короткое замыкание с обрывом фазы.....	64
3.4 Критерий невязки	65
3.5 Двойные замыкания	67
3.6 Применение нормальных и локальных токов	71
3.7 Выводы	79
Глава 4 Информационные аспекты цифровой обработки сигналов	81
4.1 Сингулярный спектральный анализ	82
4.2 Кратномасштабный анализ	90
4.3 Соединение со спектральным анализом (адаптивные фильтры)	98
4.4 Выводы	105
Глава 5 Внедрение.....	107

5.1 Адаптивная дистанционная защита	107
5.2 Локатор повреждений при двухстороннем наблюдении	111
5.3 Автоматика опережающего деления сети	114
5.4 Выводы	122
Заключение	123
Список литературы	125
Приложение А. Способ определения места повреждения при двухстороннем наблюдении	142
Приложение Б. Способ задания условий срабатывания релейной защиты	146

ВВЕДЕНИЕ

Развитие средств связи, внедрение стандарта МЭК 61850 привели к тому, что устройствам релейной защиты и автоматики (РЗА) становится доступным всё больший объём информации, причём не только от измерительных устройств и датчиков, расположенных в том же месте, но и от других устройств РЗА. Устройства на микропроцессорной элементной базе, обладающие памятью и интеллектом, подготовлены для реализации новых более сложных, но и более эффективных алгоритмов релейной защиты и локации повреждений. Таким образом, всю большую актуальность приобретает задача разработки алгоритмов релейной защиты, способных работать с расширяющейся информационной базой.

Данная задача находится в поле зрения ряда отечественных и зарубежных научных школ. В Чувашском государственном университете ей уделяется внимание последние 30 лет, где разрабатывается информационная теория релейной защиты. Релейная защита во всё большей степени становится наукой о распознавании аварийных ситуаций в электрических системах, а микропроцессорные средства защиты становятся всё более интеллектуальными, проявляющими способность к адаптации и обучению. Однако на сегодняшний день всё ещё недостаточно проработаны вопросы, связанные со сбором необходимой информации, выделением известных информационных составляющих и поиском новых, способами адаптации, эффектом нераспознаваемости некоторых коротких замыканий, обусловленным нехваткой информации, оценкой распознающей способности полученных алгоритмов РЗА, определением места сложных повреждений.

Целью диссертации является исследование информационных аспектов релейной защиты и локации повреждений в электрических сетях, разработка на основе результатов теоретических исследований эффективных методов использования всей имеющейся информации и применение их при разработке средств РЗА. Исследуются различные информационные аспекты релейной защиты и локации повреждений, а именно задачи контроля защищаемой зоны (задача дистанционной защиты), явление нераспознаваемости коротких замыканий,

критерии замыканий при двухстороннем наблюдении линии электропередачи, способы дешумизации наблюдаемых процессов, применение многомерного дискретного пространства для целей адаптации защиты.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 146 наименований, двух приложений, 85 рисунков. Общий объем работы в 149 стр. включает: текст диссертации – 124 стр., список литературы – 17 стр. и приложения – 8 стр.

В первой главе приведён обзор литературы по теме диссертации, приведён понятийный аппарат, необходимый для описания информационных аспектов обеспечения селективности, чувствительности и быстродействия релейной защиты. Исследовано явление нераспознаваемости трёхфазных коротких замыканий, в том числе на фоне асинхронного хода при свободной вариации угла передачи. Показано различие в понятиях нераспознаваемости зоны (задача дистанционной защиты) и места (задача определения места повреждения). Выделены два вида адаптации релейной защиты: прямая и косвенная. Для реализации прямой адаптации предложено применение многомерной дискретной структуры для хранения информации. Рассмотрены основные свойства такой структуры.

Во второй главе исследованы информационные аспекты адаптации дистанционной защиты линий электропередачи. Приведено сравнение между собой трёх реле – неадаптивного, реле с прямой адаптацией и косвенной адаптацией. Реле обучаются для работы в режимах коротких замыканий на фоне асинхронного хода. Показано преимущество реле, обученного по способу прямой адаптации, над неадаптивным реле и над реле с косвенной адаптацией. Для реализации адаптивной дистанционной защиты с прямой адаптацией применена многомерная дискретная структура. Показано, что применение прямой адаптации дистанционной защиты совместно с многомерной дискретной структурой позволяет обеспечить селективность при коротких замыканиях на фоне асинхронного хода.

Третья глава посвящена информационным аспектам локации и селекции повреждений в линиях электропередачи при двухстороннем наблюдении. Под локацией понимается определение места повреждения, под селекцией – выявление повреждённых проводов. Описаны понятия алгоритмической модели наблюдаемого объекта и предполагаемого места повреждения. Предложена общая модель повреждения, позволяющая моделировать все виды коротких замыканий, в том числе с обрывами проводов. Приведены критерии повреждения многопроводной системы при двухстороннем наблюдении, связывающие токи и напряжения в месте предполагаемого повреждения с его координатой. Предложен алгоритм поиска мест двойных замыканий. Приведены новые информационные составляющие, названные нормальными и локальными токами. Предложен алгоритм поиска места повреждения при двухстороннем наблюдении с применением этих составляющих.

Четвёртая глава посвящена информационным аспектам цифровой обработки сигналов. Показана актуальность задачи дешумизации наблюдаемых электрических сигналов. Для целей дешумизации применены сингулярный спектральный анализ и кратномасштабный анализ. Показано, что сингулярный спектральный анализ наиболее применим для обработки стационарных сигналов, кратномасштабный анализ – для обработки нестационарных сигналов. Приведены примеры дешумизации реальных и модельных осциллограмм, а также результаты обработки адаптивными фильтрами исходных и обработанных сигналов. Показано, что дешумизация даёт ощутимый эффект.

В пятой главе представлены разработки, в которых нашли применение результаты исследований. Прямая адаптация с использованием многомерной дискретной структуры применены при разработке микропроцессорного устройства адаптивной дистанционной защиты линий электропередачи. Критерии повреждения при двухстороннем наблюдении и сингулярный спектральный анализ применены в разработке локатора повреждений при двухстороннем наблюдении. Кратномасштабный анализ применён в разработке быстродействующего реле, применяемого в качестве основного измерительного

органа автоматике опережающего деления сети. Приведены результаты испытаний автоматике на модельных и реальных осциллограммах тока короткого замыкания.

Автор выражает большую признательность научному руководителю д.т.н. профессору Лямецу Ю.Я. и научным консультантам: к.т.н. Романову Ю.В., к.т.н. доценту Ефремову В.А., к.т.н. Шевелёву А.В., к.т.н. Мартынову М.В.

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1 Обзор литературы

За годы, прошедшие со времени выхода в свет знаменитого труда Г.И. Атабекова¹, релейная защита как научное направление не претерпела значительных изменений. Алгоритмы защиты электроэнергетических объектов (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, реакторов, ошинок и т.д.) остались практически неизменными.

Однако за это время отечественными и зарубежными учёными и инженерами проводилась колоссальная работа по улучшению основных свойств различных защит – селективности, быстродействия, чувствительности, надёжности². За это время образовалось большое количество научных школ во многих ведущих университетах и научных организациях.

В Чебоксарах последние 30 лет разрабатывается информационная теория релейной защиты³. Она состоит из двух больших частей: информационного анализа режимов и информационного анализа процессов. Диссертация является развитием этой теории.

1.1.1 Противостояние режимов

В информационной теории релейной защиты ключевую роль играет представление о противостоящих режимах – отслеживаемых (α -режимы) и альтернативных (β -режимы)⁴. Для обеспечения селективности защита призвана срабатывать в α -режимах, в то время как срабатывание во всех без исключения β -режимах категорически запрещено⁵. Противостояние состоит в том, что второе условие противоречит первому, ограничивая в той или иной мере

¹ Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М., 1957.

² Чернобровов Н.В., Семенов В.А. Релейная защита энергетических систем // М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

³ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Подшивалин А.Н. и др. Об информационной теории релейной защиты // Известия Академии электротехнических наук. – 2009. – № 1. – С. 32-44.

⁴ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С. Об информационной теории релейной защиты // Релейщик. – 2009. – №2. – С. 36-37.

⁵ Лямец Ю.Я. и др. Распознавание противостоящих режимов электрической системы // Нелинейный мир. – 2011. – №9. – Т.9. – С. 600-606.

чувствительность защиты к α -режимам. Именно по этой причине нереально ставить перед защитой задачу срабатывания во всех без исключения α -режимах. Приходится довольствоваться более мягким условием приближения чувствительности защиты к распознаваемости¹ α -режимов. Распознаваемость – физическое свойство наблюдаемого объекта, обеспечивающее принципиальную возможность отличить определённый контролируемый режим от всего множества альтернативных режимов², проявляющееся сильнее или слабее в зависимости от числа варьируемых параметров имитационных моделей объекта, а также от размера и характера информационной базы релейной защиты как его наблюдателя. В качестве информационной базы защиты может выступать не только текущая информация (например, токи и напряжения в месте установки защиты в текущий момент времени), но и априорная и апостериорная информация³. К априорной информации относят информацию о защищаемом объекте, к апостериорной – информацию о предыдущих срабатываниях защиты.

1.1.2 Модели объекта

Обеспечить селективность защиты призвано её обучение с учителем. Исследователями уже решены некоторые граничные задачи обучения: задача построения граничных линий реле, задачи обучения реле сопротивления реле, реле с абсолютной селективностью⁴. В качестве учителей для релейной защиты выступают имитационные модели объекта (ИМО), представляющие собой математическое описание защищаемых объектов для целей построения и тестирования релейной защиты. К этому математическому описанию предъявляются необходимые требования по точности и быстродействию. Вопрос быстродействия актуален потому, что для настройки защиты необходимо

¹ Лямец Ю.Я. Распознаваемость поврежденных электропередачи. Ч. 1. Распознаваемость места повреждений // Электричество. – 2001. – № 2. – С. 16-23.

² Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С. Об информационной теории релейной защиты // Релейщик. – 2009. – №2. – С. 36-37.

³ Лямец Ю.Я. и др. Теоретические основы электротехники с элементами электроэнергетики и релейной защиты. Многопроводные системы: Учеб. пособие // Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 160 с.

⁴ Лямец Ю.Я. и др. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Ч. 1,2,3. // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009, №4, С. 24-30, 2010, №2, С. 53-59, №4, С. 53-58.

смоделировать все возможные режимы в защищаемом объекте для того, чтобы отстроиться от ложного срабатывания защиты.

В настоящее время хорошо развиты моделирующие комплексы (MatLAB/Simulink¹, RTDS, PSCAD и др.), которые могут выступать в качестве ИМО для релейной защиты². Однако, данные комплексы не ориентированы на быстрый расчёт большого количества режимов. Поэтому для целей обучения релейной защиты используются ИМО, построенные в базе фазных координат³, а также ИМО, построенные в базе симметричных составляющих⁴. Одним из вариантов повышения быстродействия является построение более простых, но обладающих теми же свойствами эквивалентных моделей⁵.

Другой вид моделей, используемых в информационной теории релейной защиты, – это алгоритмические модели (АМО)⁶. 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 являются виртуальные реле⁷. Физически таких реле не существует, они реализуются только алгоритмически⁸. Другое применение АМО – задача определения места повреждения (ОМП)⁹.

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

² Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink // М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

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

⁶ Бычков Ю.В., Васильев Д.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели в релейной защите // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26-31.

⁷ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. и др. Многомерная релейная защита. Ч.1. Теоретические предпосылки // Электричество. – 2009. – №10. – С. 17-25.

⁸ Устройство для защиты линии электропередачи от короткого замыкания // Авт. свид. СССР №688946, 1976.

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

1.1.3 Распознающая способность релейной защиты и способы её повышения

После расчёта параметров срабатывания релейной защиты или её обучения необходимо оценить её чувствительность. В релейной защите для оценки чувствительности защиты используется коэффициент чувствительности¹. В информационной теории релейной защиты для оценки чувствительности или распознающей способности используется объектная характеристика². Это зависимость переходного сопротивления от места замыкания $R_f(x_f)$, при которых исследуемая защита будет обеспечивать срабатывание в контролируемых режимах при гарантированной отстройке от альтернативных режимов, то есть при обеспечении селективности релейной защиты.

Задачей повышения распознающей способности занимаются ведущие отечественные и зарубежные научные школы. В информационной теории релейной защиты одним из способов повышения распознающей способности является применение нескольких реле, обученных по методу условного отображения³ в многомерном пространстве⁴.

Ещё одним способом повышения распознающей способности релейной защиты является применение адаптации. Адаптацию релейной защиты можно разделить два вида: на прямую и косвенную. Прямая адаптация подразумевает изменение характеристики срабатывания в зависимости от априорной информации. Косвенная адаптация заключается в формировании замера защиты с использованием априорной информации.

Следует отметить большое количество разработок адаптивных защит ведущими отечественными и зарубежными исследователями. Особую активность

¹ Атабеков Г.И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М., 1957.

² Лямец Ю.Я., Николаева Н.В., Павлов А.О. Объектные характеристики дистанционной защиты // Материалы II Всеросс. научно-техн. конф. «Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике». Чебоксары, Чуваш. ун-т., 1998. – С. 141-144.

³ Лямец Ю.Я. Обучаемая релейная защита. Ч. 1. Методы условных отображений // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 15-19.

⁴ Лямец Ю.Я. и др. Эффекты многомерности при обучении релейной защиты // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 48-54.

можно отметить у китайской фирмы NARI и шведской фирмы ABB, которые публикуются и заявляют свои изобретения на территории США, Китая и других стран. Анализ отобранных идей показал, что разные исследователи понимают адаптацию защиты по-своему: одни – изменение алгоритма защиты в зависимости состояния сети, другие – изменение характеристики срабатывания защиты. Также следует отметить тот факт, что некоторые алгоритмы подразумевают использование моделей наблюдаемых линий электропередачи, другие же обходятся без них.

Так, патент китайской фирмы NARI¹ описывает реализацию адаптивной дистанционной защиты. В защите используется чисто аварийный режим (режим, в котором действует только источник, обусловленный возникновением повреждения в защищаемой линии). Условие срабатывания защиты:

$$|\Delta U_{OP}| > U_Z,$$

где для земляных замыканий

$$\underline{U}_{OP\Phi\Phi} = \underline{U}_{\Phi\Phi} - \underline{I}_{\Phi\Phi} \underline{Z}_{ZD}, \Phi\Phi = AB, BC, CA;$$

для междуфазных замыканий

$$\underline{U}_{OP\Phi} = \underline{U}_{\Phi} - \underline{Z}_{ZD} (\underline{I}_{\Phi} + \underline{K} \times 3\underline{I}_0), \Phi = A, B, C;$$

\underline{Z}_{ZD} – уставка защиты, принимаемая равной $0,8 \div 0,85 \underline{Z}_{\Gamma}$, \underline{Z}_{Γ} – сопротивление защищаемой линии; U_Z – порог срабатывания, принимаемый равным предаварийному рабочему напряжению (номинальному значению).

Суть патента заключается в том, что в чисто аварийном режиме принимают равномерным распределение напряжения по линии. В этом случае возможны три распределения расчётного напряжения, представленные для модели электропередачи рисунка 1.1а: на рисунке 1.1б для замыкания в зоне защиты, на рисунке 1.1в – «за спиной» защиты, на рисунке 1.1г – вне зоны защиты. Из графиков видно, что условие срабатывания защиты будет соблюдаться только при внутреннем коротком замыкании. Недостатком этого способа является то, что он

¹ Distance relay measured by variable of operating frequency // Патент КНР №86107283, 1988.

работоспособен только в том случае, когда на защищаемой линии нет ответвлений.

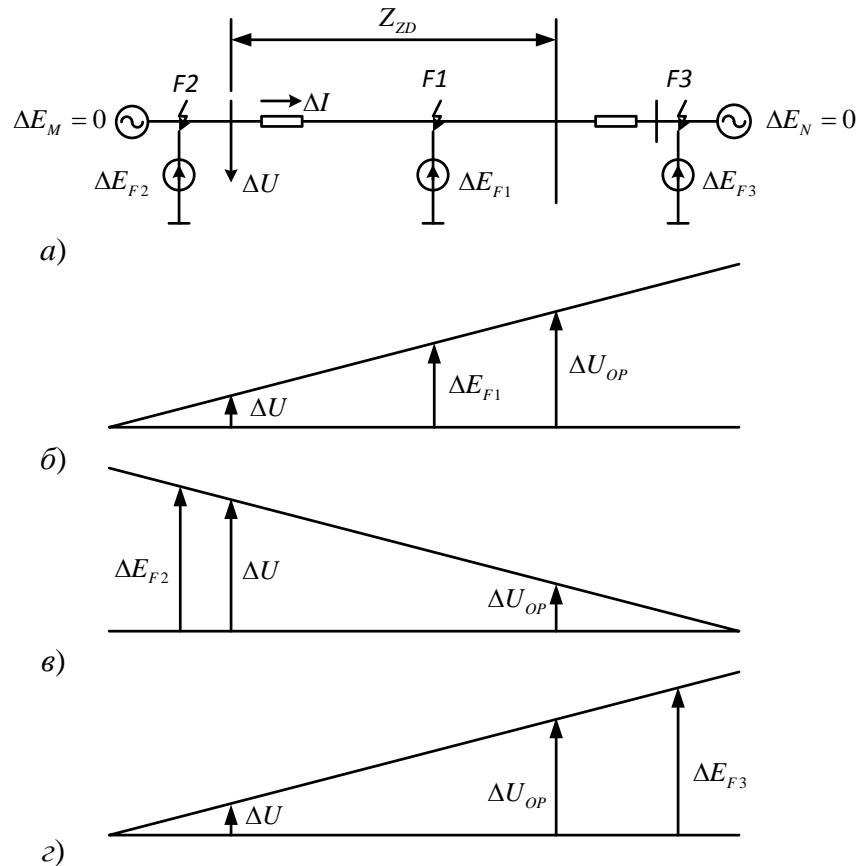


Рисунок 1.1 – Распределение напряжения чисто аварийного режима для модели электропередачи (а): б – при внутреннем замыкании; в – при замыкании «за спиной»; г – при замыкании впереди

Патент шведской фирмы АВВ¹ описывает способ задания адаптивной полигональной характеристики срабатывания дистанционной защиты. Авторы пишут, что патент описывает автоматическую систему локализации повреждений при одностороннем наблюдении. Характеристика срабатывания изменяется за счёт изменения угла α (рисунок 1.2). Угол α определяется из различных соотношений, описанных в патенте. Как пример, этот угол определяется как разность аргументов тока повреждённой фазы и аргумента тока обратной последовательности.

¹ Adaptive quadrilateral characteristic distance relay // Патент США №5796258, 1998.

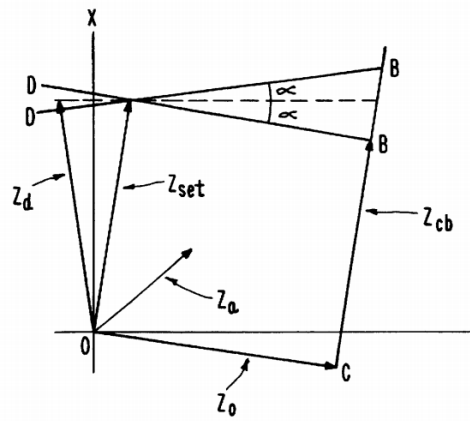


Рисунок 1.2 – Изменение характеристики срабатывания дистанционной защиты

Представленная в следующем патенте фирмы АВВ¹ схема защиты позволяет улучшить характеристики дистанционной защиты линии с обходными связями (двухцепные линии). В патенте описан алгоритм расчёта тока компенсации. В данном патенте под адаптацией понимается различный подход к расчёту тока компенсации в зависимости от состояния параллельной линии и от имеющихся данных.

В патенте американских исследователей² описана система, которая постоянно контролирует состояние конфигурации сети и перетоки мощности. Под адаптацией в патенте понимается изменение алгоритма защиты в зависимости от конфигурации сети.

Суть следующего изобретения шведской фирмы АВВ³ заключается в том, что сдвигаются характеристики срабатывания дистанционной защиты. Сдвиг полного сопротивления ΔZ вычисляют по следующей формуле:

$$\Delta Z = \frac{R_{\text{relay}} X_{1L} - R_{1L} X_{\text{relay}}}{R_{1L} \operatorname{tg} \gamma + X_{1L}} (1 - j \operatorname{tg} \gamma),$$

где $Z_{\text{relay}} = R_{\text{relay}} + jX_{\text{relay}}$ – сопротивление петли короткого замыкания;

$Z_{1L} = R_{1L} + jX_{1L}$ – сопротивление линии по прямой последовательности; γ –

фазовый сдвиг комплексного коэффициента тока k_F ; $k_F = \frac{I_{\text{relay}}}{I_F} = k_F \angle \gamma$ –

¹ Adaptive distance protection system // Патент США №5956220, 1999.

² Adaptive protection algorithm and system // Патент США №7525782, 2009.

³ Method and adaptive distance protection relay for power transmission lines // Патент США №7872478, 2011.

коэффициент распределения тока короткого замыкания; I_F – ток в месте короткого замыкания.

Ненаправленная характеристика срабатывания ДЗ смещается на величину ΔZ , тем самым достигается компенсация эффекта подпитки с удалённого конца линии (рисунок 1.3).

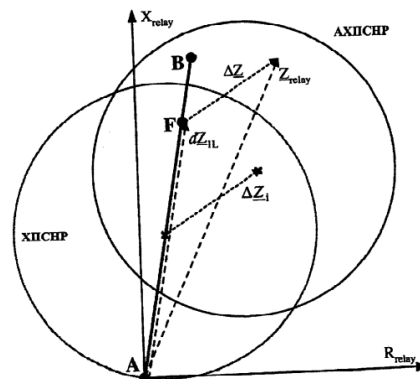


Рисунок 1.3 – Смещение характеристики срабатывания дистанционной защиты

Патент американской фирмы SEL¹ описывает метод определения повреждений в электрических сетях. В патенте описаны несколько вариантов выполнения адаптивной защиты. Описаны несколько вариантов реализации адаптивной характеристики защиты. Один из вариантов представлен на рисунке 1.4. Характеристика изменяется в зависимости от направления мощности.

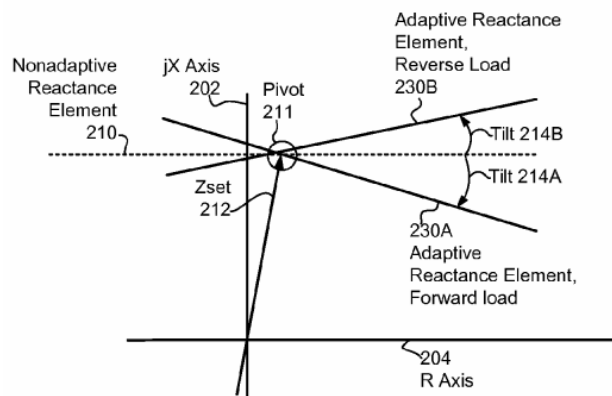


Рисунок 1.4 – Изменение характеристики срабатывания дистанционной защиты в зависимости от направления мощности

¹ Electrical power system phase and ground protection using an adaptive quadrilateral characteristics // Патент США №8410785, 2013

В патенте японских исследователей¹ описана реализация цифрового дистанционного реле при одностороннем наблюдении. В одном из пунктов формулы изобретения предлагается при формировании замера сопротивления вычитать ток нагрузки из тока, наблюдаемого в режиме короткого замыкания. Это можно считать некоего рода адаптацией.

Следующее изобретение² описывает адаптивное реле от земляных замыканий, учитывающее влияние переходного сопротивления в месте короткого замыкания, режимы систем, к которым подключена защищаемая линия, а также отстроенное от качаний. Реле выполняет следующие функции:

1. измерение расстояния до места повреждения;
2. адаптацию характеристики срабатывания;
3. определение повреждённой фазы и блокировку при качаниях.

Изобретение³ китайской фирмы NARI описывает метод отстройки от ложных срабатываний дистанционной защиты в режиме перегрузки. Сущность изобретения заключается в том, что, если защита определяет наличие перегрузки в линии, характеристика срабатывания приобретает другой вид – для случая полигональной характеристики – от характеристики ABCD0 к характеристике ABC'D'0, для случая круговой характеристики – сжимается от характеристики C1 к характеристике C1' (рисунок 1.5).

¹ Digital distance relay // Патент EP №1168558, 2002.

² Double adaptive complex impedance ground distance protection // Патент КНР №87100595, 1988

³ Adaptive regulating method for preventing overload mis-operation by distance protection // Патент КНР №101335450, 2010 г.

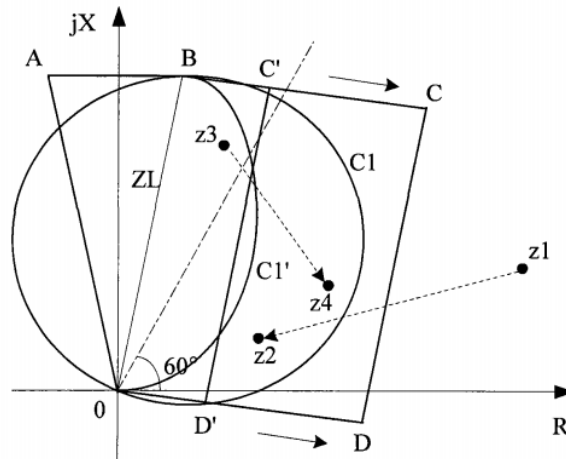


Рисунок 1.5 – Изменение характеристики срабатывания при наличии перегрузки

Ещё один патент этой китайской компании¹ описывает реализацию дистанционной защиты с применением аварийных составляющих. Аварийные составляющие рассчитываются следующим образом:

$$\Delta I_{\Phi} = \|i(t) - i(t-T)\| - \|i(t-T) + i(t-2T)\|,$$

где $\Phi = A, B, C$ – обозначение фазы; T – период.

Данные аварийные составляющие применяются для пусковых органов защиты, условие пуска

$$\Delta I_{\Phi} > 1,25\Delta I_T + \Delta I_{\text{set}},$$

где ΔI_T – изменение тока в переходном режиме; ΔI_{set} – уставка защиты.

В защите имеется орган направления мощности, направление определяется с помощью специальных замеров, описанных в патенте. Кроме того, есть орган минимального напряжения, сигнализирующий о замыкании в защищаемой линии. Защита срабатывает при отсутствии блокировок, которые формируются от защиты с противоположной стороны линии.

Для дистанционной защиты от однофазных замыканий на землю через большое переходное сопротивление предложен адаптивный способ². Предлагается изменять наклон части характеристики (рисунок 1.6) в соответствии с выражением

¹ Method for realizing longitudinal distance protection at adaptive weak power side // Патент КНР №101764396, 2010 г.

² Moore P. J., Johns A. T. Adaptive Digital Distance Protection // Developments in Power Systems Protection. 4th International Conference on. – 1989. – P. 187-191.

$$\theta = \arg \frac{\underline{I}_{res}}{\underline{I}_A + \underline{K} \cdot \underline{I}_{res}},$$

где \underline{I}_{res} – геометрическая сумма токов фаз (утроенный ток нулевой последовательности); \underline{I}_A – ток фазы А (для случая короткого замыкания фазы А); \underline{K} – весовой коэффициент.

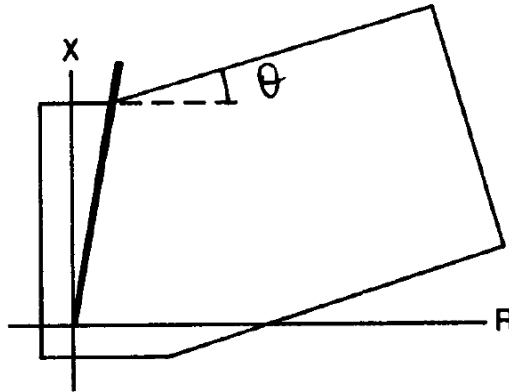


Рисунок 1.6 – Изменение характеристики срабатывания для защиты от однофазных замыканий

Интересное решение предлагают китайские разработчики. В своей статье¹ авторы предлагают построение характеристики срабатывания на основе нелинейной функции от значения переходного сопротивления и места повреждения:

$$\underline{Z}_v = p\underline{Z}_L + \Delta\underline{Z},$$

где $\Delta\underline{Z} = f(E_s, E_r, \underline{Z}_s, \underline{Z}_r, \delta, K_\delta, R_F, x_F)$ – нелинейная функция; p – расстояние до места короткого замыкания.

Граничные прямые для характеристики получают при предельных значениях переходного сопротивления $R_F = 200$ Ом и расстояния до места повреждения $x_F = 95\%$ (рисунок 1.7).

¹ Xia Y.Q., Li K.K., David A.K. Adaptive Relay Setting for Stand-Alone Digital Distance Protection // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – V. 9. – №1. – P. 480-491.

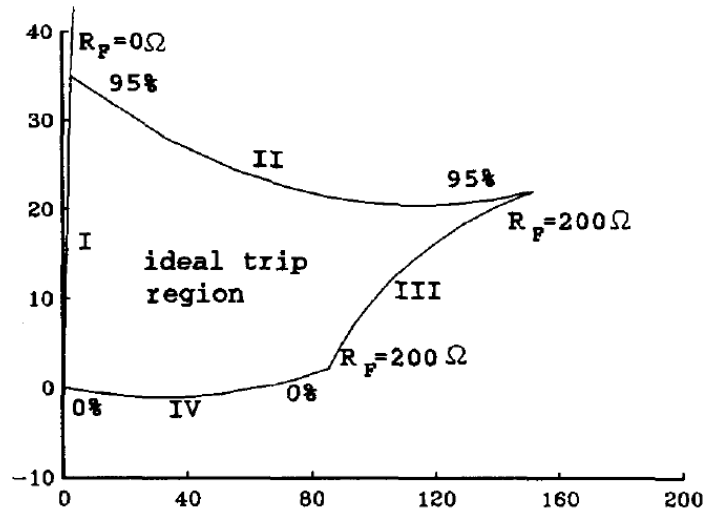


Рисунок 1.7 – Граничная линия характеристики срабатывания

Адаптивность алгоритма может быть достигнута за счёт использования информации для нелинейной функции в реальном времени.

Ещё одним вариантом адаптации предложено изменение полигональной характеристики в зависимости от нагрузочного режима¹. Предлагается адаптировать угол наклона границы характеристики по осям R и X (рисунок 1.8).

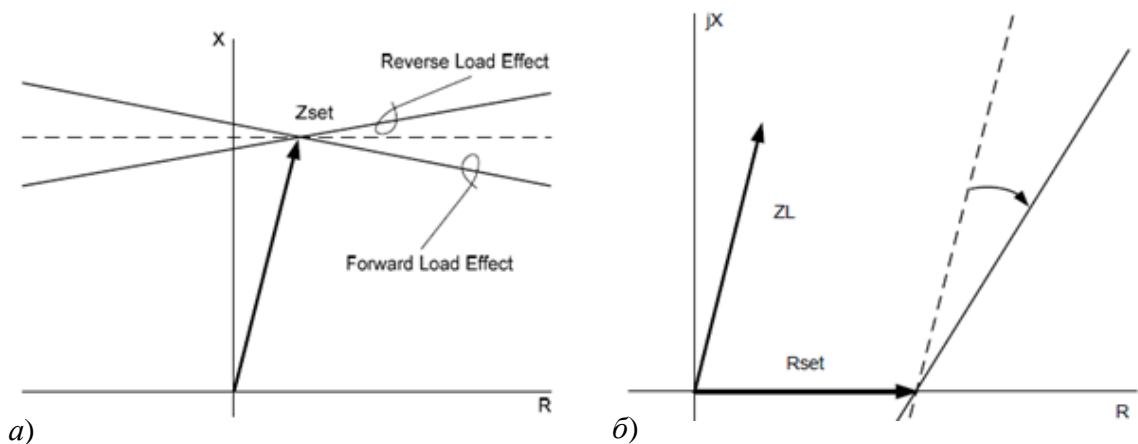


Рисунок 1.8 – Изменение углов наклона полигональной характеристики

Угол наклона определяется из параметра T , который равен разности между углами тока короткого замыкания и тока в месте установки защиты. Угол наклона по оси X зависит от токов обратной последовательности, а угол наклона по оси R

¹ Calero F., Guzman A., Benmoual G. Adaptive Phase and Ground Quadrilateral Distance Elements // 36th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA. – 2009. – P. 1-18.

зависит от токов обратной и нулевой последовательностей. Также алгоритм предусматривает учёт угловой погрешности трансформаторов тока.

Другим вариантом реализации адаптивной защиты предложено использование круговой характеристики, но с дополнительным критерием¹. Авторы предлагают критерий срабатывания на основе выражения:

$$90^\circ < \arg \frac{\underline{U}_{ma} - \underline{I}_{ma} \underline{Z}_{set}}{\underline{U}_{ma0} - \underline{U}_{ma}} < 270^\circ,$$

где \underline{U}_{ma} – напряжение послеаварийного режима в месте установки защиты; \underline{I}_{ma} – ток в месте установки защиты; \underline{Z}_{set} – уставка; \underline{U}_{ma0} – напряжение предшествующего режима в месте установки защиты. Авторы заявляют о чувствительности алгоритма до 800 Ом.

Предложен принцип распознавания замыканий через большое переходное сопротивление на фоне качаний для дистанционной защиты². Принцип заключается в сравнении фаз. Для внутренних коротких замыкания:

$$\delta_{z1} < \delta_F < \delta_R,$$

где δ_{z1} – угол напряжения $\underline{V}_{z1} = \underline{V}_R - x_{z1} \underline{Z}^0 \underline{I}_R$; \underline{V}_R – напряжение в месте установки защиты; x_{z1} – длина защищаемой зоны; \underline{Z}^0 – погонное сопротивление защищаемой линии; δ_F – угол между напряжением и током в ветви замыкания; δ_R – угол между напряжением и током в месте установки защиты.

Для внешних коротких замыканий:

$$\delta_F < \delta_{z1} < \delta_R.$$

Также предложена реализация дистанционной защиты для распознавания симметричных коротких замыканий на фоне качаний³. Алгоритм основан на критерии срабатывания

¹ Yan L., Deshu C., Xianggen Y. Research of One New Adaptive Mho Relay // Power System Technology. International Conference on. – 2002. – V. 4. – P. 2604-2607.

² Mechraoui A.A, Thomas D.W.P. New Principle for High Resistance Earth Fault Detection During Fast Power Swings for Distance Protection // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – V. 12. – №4. – P. 1452-1457.

³ Su, B., Dong X.Z., Bo Z.Q., Sun Y.-Z. Fast Detector of Symmetrical Fault during Power Swing for Distance Relay // Power Engineering Society General Meeting. – 2005. – V. 2. – P. 1836-1841.

$$\frac{\Delta V_{PSC}(t)}{\Delta V_{PSC}(t-T)} < k,$$

где $\Delta V_{PSC}(t) = |V_{PCS}(t) - V_{PCS}(t-T)|$; T – период промышленной частоты; $V_{PSC} = |V_M| \cos(\arg \underline{V}_M / \underline{I}_M + 90^\circ - \varphi_\Sigma)$; $\underline{V}_M, \underline{I}_M$ – напряжение и ток в месте установки защиты; k – коэффициент (задаётся в пределах от 0,1 до 0,5).

Также предложена компенсация влияния переходного сопротивления¹. Компенсация влияния переходного сопротивления учитывается на основе построения характеристики реле сопротивления и выражения:

$$\underline{Z}_{SA} = \frac{\underline{U}_{SA}}{\underline{I}_{SA} + (\underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{S0})} = (p \cdot \underline{Z}_L) + \left(\frac{3}{(1-p)} \cdot \frac{\underline{I}_{S0} \cdot R_F}{\underline{I}_{SA} + (\underline{k}_0 \cdot \underline{I}_{S0})} \right),$$

где \underline{Z}_{SA} – сопротивление на зажимах защиты; \underline{U}_{SA} – напряжение фазы А на зажимах защиты (при коротком замыкании фазы А); \underline{I}_{SA} – ток фазы А на зажимах защиты; \underline{I}_{S0} – ток нулевой последовательности на зажимах защиты; \underline{k}_0 – коэффициент компенсации; p – коэффициент расстояния до места короткого замыкания; \underline{Z}_L – сопротивление защищаемой линии; R_F – переходное сопротивление в месте короткого замыкания.

Второе слагаемое выражения учитывает значение переходного сопротивления. Поскольку значение R_F неизвестно, то предлагается определять сопротивление до короткого замыкания $p \cdot \underline{Z}_L$ из построения характеристики сопротивления:

$$pR_{L1} = \frac{OA}{\left(\frac{X}{R}\right) - \left(\frac{OB-OA}{BC}\right)}, \quad pX_{L1} = \frac{X}{R} \cdot \frac{OA}{\left(\frac{X}{R}\right) - \left(\frac{OB-OA}{BC}\right)},$$

где $OA = X_{SA} + (R_{SA} \cdot \operatorname{tg} \alpha)$; α – угол между токами нулевой и прямой последовательности (рисунок 1.9).

¹ Makwana V.H., Bhalja B.R. A New Digital Distance Relaying Scheme for Compensation of High-Resistance Faults on Transmission Line // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27. – №4. – P. 2133-2140.

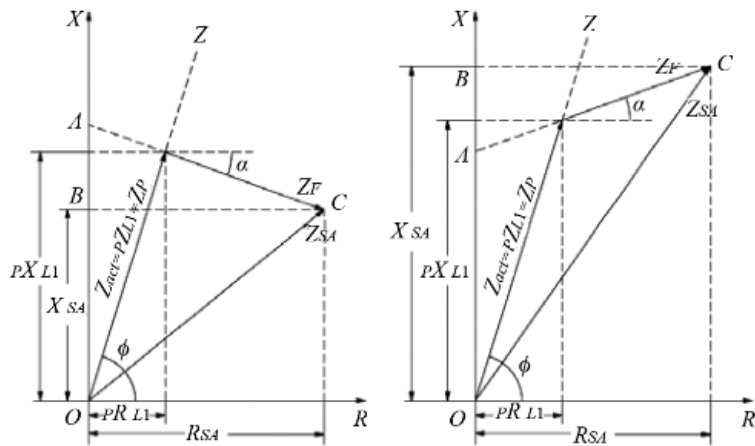


Рисунок 1.9 – К расчёту величин для построения дистанционной защиты с компенсацией переходного сопротивления

Польскими исследователями предложена реализация адаптивной дистанционной защиты двухцепных линий¹. Адаптация производится за счёт смещения круговой характеристики реле сопротивления, а сдвиг вычисляется с помощью приведённых в статье выражений. Также для защиты двухцепных линий предложено использование в замере дистанционной защиты тока нулевой последовательности параллельной линии².

Китайские исследователи предложили адаптивное изменение характеристики срабатывания дистанционной защиты (рисунок 1.10)³.

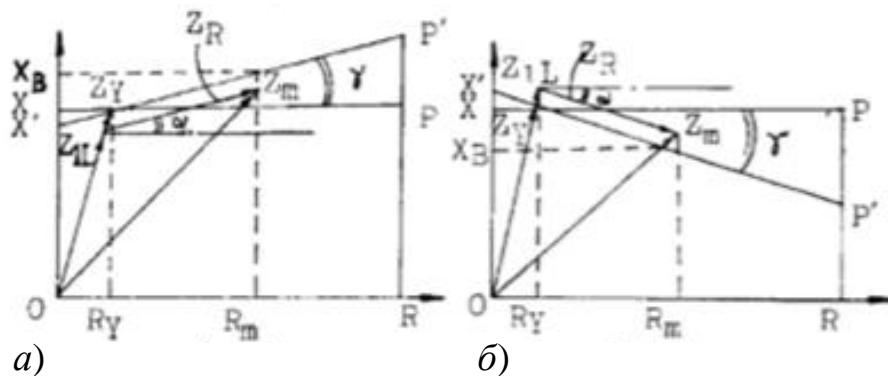


Рисунок 1.10 – Адаптивное изменение характеристики срабатывания

¹ Bozek M., Izykowski J.. Adaptive distance protection of double-circuit lines based on differential equation fault loop model // Universities Power Engineering Conference. UPEC, 43rd International. – 2008. – P. 1-5.

² Hu Yi. Improving Parallel Line Distance Protection with Adaptive Techniques // IEEE. Power Engineering Society Winter Meeting. – 2000. – V. 3. – P. 1973-1978.

³ Zhizhe Zhang, Deshu Chen. An Adaptive Approach in Digital Distance Protection // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1991. – V. 6. – №1. – P. 135-142.

Угол γ рассчитывается исходя из тока нулевой последовательности I_{0L} :

$$\gamma = \arg [I_{0L} / (I_A + K I_{0L})] + \arg \theta_\gamma,$$

где I_A – ток повреждённой фазы; K – коэффициент компенсации тока нулевой последовательности; θ_γ – угол, расчёт которого также приведён в статье.

Для защиты линий электропередачи с ответвлениями предложен способ реализации адаптивной защиты с применением аварийных составляющих токов¹. Алгоритм проходит обучение на имитационной модели защищаемой сети. Недостатком этого алгоритма заключается в том, что он применим только для защиты линий электропередачи с ответвлениями, при этом мощность трансформаторов отпайки должна быть достаточно малой.

Итак, информационный и патентный поиск показал большую активность исследователей по разработке адаптивных защит. Однако исследователями предлагаются частные решения, но не общий подход к разработке адаптивных защит, приобретающих всю большую актуальность в наши дни.

1.1.4 Определение места повреждения

Важной задачей, дополняющей функции релейной защиты, является последующее определение места повреждения (локация) и выбор повреждённых проводов (селекция). Информационный поиск показал большую активность исследователей по разработке различных способов определения места повреждения: односторонних, двухсторонних и многосторонних.

Различные способы определения места повреждения (ОМП) классифицированы (рисунок 1.11)². На настоящий момент достаточно проработаны способы одностороннего ОМП³. Целью исследователей является повышение точности определения места повреждения.

¹ Нагай В.И., Нагай В.В., Нагай И.В. Адаптивные измерительные органы аварийных составляющих резервных защит электрических распределительных сетей // Совр. напр. разв. систем релейной защиты и автоматики энергосистем. – 2009. – С. 134-140.

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

³ Аржанников Е. А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Под ред. В.А. Шуина. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.

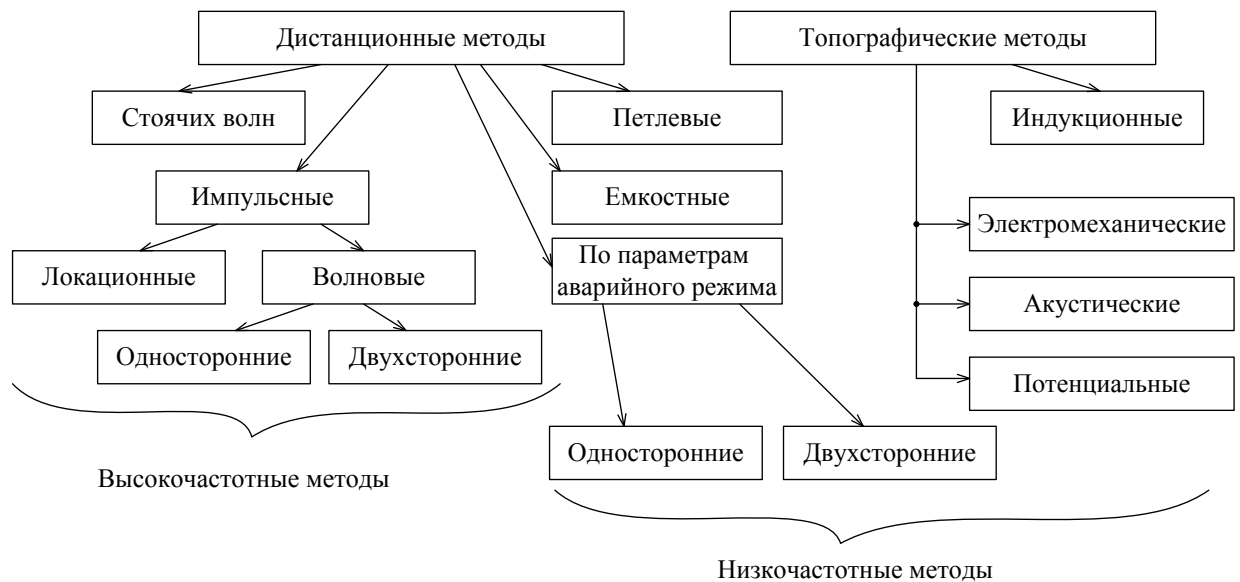


Рисунок 1.11 – Классификация методов ОМП

Так, в патенте США¹ описан способ ОМП, заключающийся в том, что расстояние до места повреждения определяют из условия:

$$X = \frac{\operatorname{Im}(\underline{V} \underline{I}_{D^*})}{\operatorname{Im}(\underline{I}(j\omega L + r) \underline{I}_{D^*})},$$

где \underline{I}_{D^*} – комплексно сопряжённая аварийная составляющая тока в месте наблюдения; \underline{I} – ток в месте наблюдения в текущем режиме; \underline{V} – напряжение в месте наблюдения в текущем режиме; r , L – полное активное сопротивление и индуктивность наблюдаемой линии.

В другом патенте² оценка расстояния \hat{x}_f до места повреждения производится из выражения:

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

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

Ещё один предложенный способ¹ заключается в том, что оценка расстояния \hat{x}_f до места повреждения находится из выражения

¹ Method for locating a fault point on a transmission line // Патент США №4314199, 1982 г.

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

$$\underline{U}_{PM} = \hat{x}_f^* \underline{Z}_l \underline{I}_P + R_f \underline{I}_P + \Delta \underline{U}_{CVT},$$

где \underline{U}_{PM} – фазное напряжение в месте наблюдения; \underline{Z}_l – сопротивление линии электропередачи, на которой произошло замыкание; \underline{I}_P – фазный ток в месте наблюдения; R_f – переходное сопротивление в месте повреждения, оценивается с помощью формул, представленных в патенте; $\Delta \underline{U}_{CVT}$ – величина, алгоритм расчёта которой представлен в патенте.

Другой патент² предполагает уменьшение погрешности измерения индуктивного сопротивления петли короткого замыкания. Изобретение предполагает наличие элементов памяти для запоминания значений тока и напряжения в предаварийном режиме. Оценка расстояния до места повреждения пропорциональна значению

$$\hat{x}_f \sim U_k \Delta I_p,$$

где U_k – напряжение в режиме короткого замыкания; $\Delta I_p = I_{p,k} - I_{p,пр}$ – разность реактивных составляющих токов, $I_{p,k}$ – реактивная составляющая тока в режиме короткого замыкания, $I_{p,пр}$ – реактивная составляющая тока в режиме, предшествующему короткому замыканию.

Устройство может быть использовано для определения мест коротких замыканий для группы линий любой конфигурации, отходящих от одной секции шин и, кроме того, может найти применение для определения расстояния до мест замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью при кратковременном переводе замыкания на землю в двойное замыкание на землю замыканием на шинах подстанции одной из здоровых фаз, т.к. в данном случае активное сопротивление петли короткого замыкания может быть очень большим.

¹ Method and a device for fault location in the event of a fault on a power transmission line // Патент США №4906937, 1990 г.

² Измеритель расстояния до мест коротких замыканий // Авторское свид. СССР №1019375, 1983 г.

Патент японских исследователей¹ описывает способ определения места повреждения, заключающийся в том, что расстояние до места повреждения определяют из условия:

$$x = \frac{\left(\operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{(\delta - \gamma)}{\beta Z_0 - \alpha / Z_0} \right] - \sin^{-1} \left[\frac{\gamma + \delta}{\sqrt{[\beta Z_0 - \alpha / Z_0]^2 + [\delta - \gamma]^2}} \right] \right)}{2\mu},$$

где $\alpha = E_r (E_r - E_{0r}) + E_i (E_i - E_{0i})$; $\beta = I_r (I_r - I_{0r}) + I_i (I_i - I_{0i})$; $\gamma = E_r (I_i - I_{0r}) - E_i (I_r - I_{0r})$; $\delta = I_r (E_i - E_{0i}) - I_i (E_r - E_{0r})$; $\underline{E} = E_r + jE_i$, $\underline{I} = I_r + jI_i$ – напряжение и ток в текущем режиме в месте наблюдения; $\underline{E}_0 = E_{0r} + jE_{0i}$, $\underline{I}_0 = I_{0r} + jI_{0i}$ – напряжение и ток в предшествующем режиме в месте наблюдения; \underline{Z}_0 – волновое сопротивление; μ – постоянная распространения.

Патент фирмы Alstom² описывает способ локации повреждений при одностороннем наблюдении. Способ предполагает использование величин предшествующего режима. Расчёт предполагается для каждого места предполагаемого повреждения. Используется известный критерий резистивности переходного сопротивления в месте повреждения³. Рассчитывается сопротивление в месте повреждения:

$$\underline{Z}_f = \frac{\underline{V}_f + \underline{V}_{fss}}{\underline{I}_f},$$

где \underline{V}_f – напряжение в месте повреждения в чисто аварийном режиме; \underline{V}_{fss} – напряжение в месте повреждения в предшествующем режиме; \underline{I}_f – ток в месте повреждения.

В патенте описаны формулы, по которым для каждого места предполагаемого повреждения рассчитываются эти величины с использованием параметров защищаемой линии и параметров системы, к которой отходит

¹ Fault detecting system for locating a fault point with a fault resistance separately measured // Патент США №4313169, 1982 г.

² Method of locating the position of a fault on a power transmission // Патент США US №5825189, 1998 г.

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

защищаемая линия (сопротивление удалённой системы). Критерий, по которому определяется место повреждения:

$$\operatorname{Im}(Z_f) \rightarrow 0.$$

Следует отметить большие наработки отечественных исследователей в области ОМП с применением локационного метода активного зондирования¹. Кроме того, на сегодняшний день активно разрабатываются методы волнового ОМП отечественными² и зарубежными³ учёными, в том числе с применением имитационного моделирования наблюдаемой линии электропередачи⁴. Предложено также для целей волнового ОМП применение аварийных составляющих наблюдаемых токов и напряжений⁵. Алгоритмы реализованы на базе микропроцессорных устройств⁶. Недостатком таких методов ОМП является то, что необходимо дополнительное оборудование, обеспечивающее функциональность устройств ОМП.

Для повышения точности ОМП было также предложено применение совокупности различных методов, что позволяет устранить недостатки, присущие различным алгоритмам, взяв при этом от них самое лучшее⁷.

Некоторые алгоритмы ОМП позволяют использовать итерационные процедуры для поиска места повреждения. Недостатком одного из таких алгоритмов⁸ является то, что для точного определения места повреждения необходима информация с параллельной линии, что сужает область применения представленного способа ОМП.

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. унив. – 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 Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи // Патент РФ №2472169, БИ №1, 2013.

⁶ Лачугин В.Ф. Многофункциональное устройство регистрации процессов контроля качества электроэнергии и определения места повреждения на линиях электропередачи // Электрические станции. – 2013. – №8. – С. 29-36.

⁷ Куликов А.Л., Обалин М.Д., Колобанов М.Д. Анализ и повышение точности при определении места повреждения линий электропередачи // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – №5. – С. 57-62.

⁸ Izykowski J., Rosolowski E., Saha M. Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. – 2009. – V. 151. – №2. – P. 268-273.

Для компенсации влияния переходного сопротивления при расчёте сопротивления контура короткого замыкания предложено использование информации о предшествующем режиме, а именно аварийные составляющие токов¹. Исследованы алгоритмы ОМП, основанные на расчёте сопротивления петли короткого замыкания². Кроме того, предложены алгоритмы для выбора повреждённых фаз³, в том числе с применением аварийных составляющих⁴.

Современный этап развития техники позволяет обмениваться информацией между концами наблюдаемой линии, что открывает новые перспективы для разработки более точных алгоритмов локации повреждений.

В случае отсутствия синхронизированных наблюдений по разным концам линии предложена искусственная синхронизация, а место повреждения предлагается искать исходя из равенства напряжений слева и справа от места предполагаемого повреждения⁵. Равенство напряжений может быть применено при выработке решений для задачи дальнего резервирования⁶. Угол, на который следует «повернуть» наблюдаемые на одной из подстанций наблюдения, рассчитывается по описанным в статье формулам. Аналогичное решение предложили исследователи фирмы АВВ⁷.

На настоящий момент всё большее распространение принимают синхронизированные наблюдения с помощью синхрофазоров. Разрабатываются алгоритмы ОМП при наличии таких наблюдений и при применении

¹ Wiszniewski A. Accurate fault impedance locating algorithm // Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C. – 1983. – V. 130. – №6. – P. 311-314.

² Zimmerman K., Costello D. Impedance-Based Fault Location Experience // Protective Relay Engineers, 58th Annual Conference for. – 2005. – P. 211-226.

³ Устройство для выбора повреждённых фаз в трёхфазной электрической сети переменного тока // Авт. свид. СССР №1374324, БИ №6, 1988.

⁴ Устройство для выбора повреждённой фазы для защиты воздушной линии электропередачи от короткого замыкания // Авт. свид. СССР №1148071, БИ №12, 1985.

⁵ Mohamed D., Houari S., Bouthiba T. Accurate Fault Location Algorithm on Power Transmission Lines with use of Two-end Unsynchronized Measurements // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2012. – V. 9. – №2. – P. 189-200.

⁶ Бычков Ю.В. Развитие и приложения дистанционного метода определения места повреждения линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2012.

⁷ Izykowski J. et al. Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – V. 21. – № 2. – P. 627-633.

соответствующих устройств¹. Также разрабатываются алгоритмы ОМП для линий с устройствами продольной компенсации².

Таким образом, учёными проводится большой объём исследований по разработке различных алгоритмов ОМП. Предложено большое количество алгоритмов поиска. На настоящий момент с развитием средств связи целесообразным становится применение более точных двухсторонних (многосторонних) алгоритмов определения места повреждения.

1.2 Структура дискретного пространства

Современная техника сбора, передачи и хранения информации способствует расширению информационной базы релейной защиты³. Возникает общая задача эффективного использования всей доступной информации. Пути её решения ведут к многомерному пространству, предназначенному для отображения информации о состоянии защищаемого объекта⁴. Область отображения подлежит окаймлению и проверке на односвязность. Вычислительная геометрия располагает алгоритмами окаймления областей в непрерывном пространстве (задачи триангуляции⁵ и тесселяции⁶), но они сложны для технических приложений. В диссертации рассмотрено дискретное пространство, состоящее из однотипных ячеек прямоугольной формы. Структура областей и их границы в таком пространстве подчиняются простым закономерностям.

Функциональная роль области, состоящей из множества ячеек, определяется видом информации, закладываемой в отдельно взятую ячейку. Простейшее применение дискретного пространства ограничивается логической

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

² Saha M.M., Rosolowski E., Izykowski J. A New Fault Location Algorithm for Use With Current Differential Protective Relays of Series Compensated Transmission Lines // Developments in Power Systems Protection DPSP. 11th International Conference on. – 2012. – P. 1-8.

³ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Романов Ю.В. Формирование информационной базы в многомерной релейной защите // Известия АЭН РФ. – 2010. – №1. – С. 6-14.

⁴ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. и др. Многомерная релейная защита. Ч.1.2.3 // Электричество, 2009, №10, С.17-25; №11, С.9-15; 2010, №1, С.9-15.

⁵ Ильин В.В., Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С. Режимы и уставки // Динамика нелинейн. дискр. электротехн. и электрон. систем: мат. V Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2003. – С. 262-265.

⁶ Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. – М.: Мир, 1989.

информацией. Если задаётся область срабатывания защиты¹, то в ячейки этой области закладывается логическая единица – символ срабатывания, а в прочие ячейки – логический ноль, символ несрабатывания². В более сложном случае в каждую ячейку выделенной области закладываются значения некоторых параметров. Например, параметров имитационной модели объекта, возможно, после её эквивалентирования³.

Предметом рассмотрения является геометрия ячейки и её соседство с другими ячейками, что важно знать для проверки односвязности массива ячеек и определения тех из них, которые располагаются на его границе.

Пусть $z_i, i = \overline{1, m}$, – координаты m -мерного пространства. Каждая координатная ось разделяется на интервалы Δz_i . Интервалы пронумерованы, $k_i = \text{ent}(z_i / \Delta z_i)$ – номер произвольного интервала на i -ой оси (рисунок 1.12а). Образуем код ячейки из номеров её проекций на координатные оси, представив его в виде вектора $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m]^T$. Рассмотрим ячейку \mathbf{K} вместе с примыкающими к ней окрестными (соседними) ячейками. Все вместе они образуют прямоугольный массив в составе 3^m ячеек. Ячейка \mathbf{K} занимает в нем особое, центральное положение, а остальные ячейки можно отнести к той или иной группе по типу соприкосновения с центральной ячейкой. Проекция данного массива на каждую ось составляют три отрезка (рисунок 1.12а), а на координатную плоскость – 9 прямоугольников, примыкающих к проекции $\text{Pr}_{i,i+1} \mathbf{K}$ центральной ячейки (рисунок 1.12б). Пусть порядок $n = \overline{0, m-1}$ является количественной оценкой степени соприкосновения окрестной и центральной ячеек. Значение $n = 0$ говорит о том, что у них всего лишь общая вершина, $n = 1$ – общее ребро, $n = 2$ – общая грань наименьшего второго порядка, $n = m - 1$ – общая грань наивысшего порядка, что означает теснейшее соприкосновение ячеек. С другой стороны, n – число общих проекций окрестной и центральной ячеек. Коль

¹ Способ релейной защиты энергообъекта // Патент РФ №2247456, БИ №6, 2005.

² Ефимов Е.Б. Оптимальная фазовая селекция коротких замыканий в линиях электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2002.

³ Мартынов М.В. Исследование и разработка обучаемых модулей микропроцессорных защит линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2014.

скоро на $m - n$ осях нет общих проекций, таких соседей можно насчитать 2^{m-n} для каждого набора из $m - n$ осей. Таких сочетаний из m по $m - n$ можно насчитать

$$\binom{m}{m-n} = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!}.$$

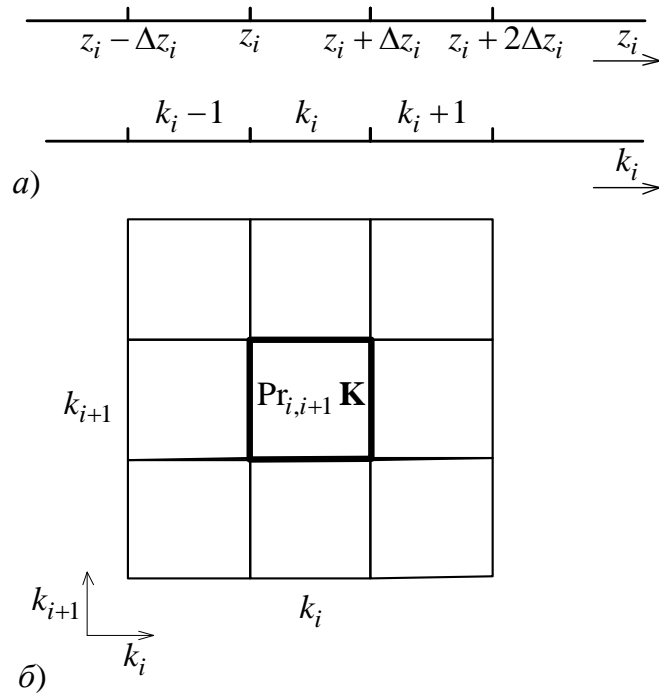


Рисунок 1.12 – Проекции массива ячеек

a – на координатную ось, b – на координатную плоскость (двумерное подпространство)

Обозначим N_m^n число граней n -го порядка и, соответственно, число окрестных ячеек такого порядка. Для общности можно принять, что вершина и ребро многогранника – это грани нулевого и первого порядка. Для любого значения n

$$N_m^n = \binom{m}{n} 2^{m-n}. \quad (1.1)$$

Как видим, общее число окрестных ячеек N_m может быть определено по-разному. С одной стороны,

$$N_m = 3^m - 1, \quad (1.2)$$

с другой –

$$N_m = \sum_{n=0}^{m-1} N_m^n = \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m}{n} 2^{m-n}. \quad (1.3)$$

Тождество выражений (1.2) и (1.3) легко установить с помощью бинома Ньютона

$$3^m = (2+1)^m = 1 + \sum_{n=0}^{m-1} \binom{m}{n} 2^{m-n}.$$

Зная числа (1.1) однотипных окрестных ячеек произвольной ячейки **K**, нетрудно установить, является ли она внутренней ячейкой массива или располагается на его границе. В последнем случае предстоит ещё ответить на вопрос, какие её грани выходят на границу массива. Всё определяется тем, соседи какого порядка n и в каком количестве выпадают из общего числа (1.2) всех окрестных ячеек.

В диссертации рассмотрено одно применение многомерной дискретной структуры к задаче построения алгоритма прямой адаптации дистанционной защиты линии электропередачи, обладающей чувствительностью, близкой к распознаваемости. Рассмотрим явление нераспознаваемости режимов коротких замыканий, в том числе на фоне асинхронного режима, когда угол передачи изменяется во всём возможном диапазоне.

1.3 Нераспознаваемые режимы

Линии электропередачи как объекту одностороннего наблюдения присущи физические явления неопределённости режимов короткого замыкания¹. Неопределённость заключается в том, что одни и те же электрические величины наблюдаются при замыкании в любом месте линии через своё для каждого места переходное сопротивление². Неопределённость очевидным образом приводит к

¹ Liamets Y., Ivanov S., Nudelman G. The phenomena of uncertainty and ambiguity in identification of faults in electrical systems // SIGRE SC B5 Colloquium, 2005, Calgary, Canada, Paper 313, P. 1-7.

² Иванов С.В. Информационный анализ линий электропередачи и способов их защиты: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2005.

нераспознаваемости мест некоторых замыканий¹. Здесь же предстоит охарактеризовать взаимосвязь между неопределённостью и нераспознаваемостью замыканий применительно к задаче дистанционной защиты.

Рассмотрим явление неопределённости на примере линии без потерь с двухсторонним питанием от систем бесконечной мощности. В двухсторонней модели, отвечающей случаю симметричного трёхфазного замыкания, три варьируемых параметра: угол передачи δ , координата места замыкания x_f и переходное сопротивление R_f (рисунок 1.13). Фиксированы удельные сопротивление X^0 , длина линии l . Модули ЭДС систем полагаются равными. Явление неопределённости возникает при определённой взаимосвязи варьируемых параметров. Предпринят вывод этой зависимости², итоговое выражение дано для значений угла δ в четвертой четверти ($\delta \in (-90^\circ, 0^\circ)$), что исключает из рассмотрения короткие замыкания на фоне асинхронных режимов. Соотношение, свободное от ограничения диапазона вариации угла δ , выглядит следующим образом:

$$\frac{R_{f,\text{нр}}(x_f/l, \delta)}{X^0 l} = \frac{2}{\sin \delta} \left(1 - \frac{x_f}{l}\right) \left(\frac{x_f}{l} \sin^2 \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2}\right). \quad (1.4)$$

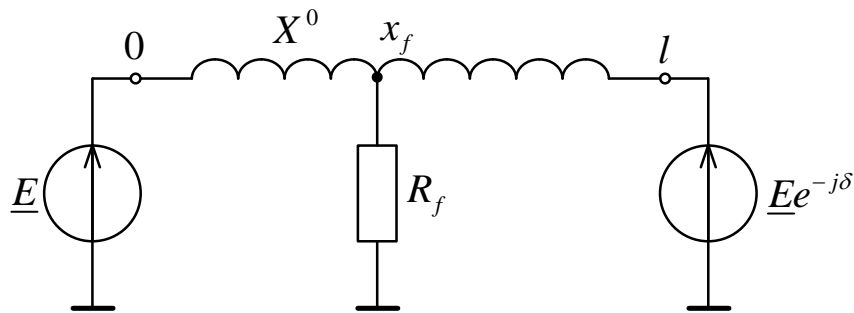


Рисунок 1.13 – Простейшая имитационная модель для случая симметричного трёхфазного замыкания

Каждой зависимости $R_{\text{нр}}(x_f)$, получаемой из (1.4) для того или иного значения угла δ , соответствует единственное значение наблюдаемого тока $\underline{I}(\delta)$.

¹ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О., Ефимов Е.Б., Законьшек Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 1, 2, 3 // Электричество, 2001, № 2, С. 16-23; № 3, С. 16-24; № 12, С. 9-22.

² Там же

Как следствие, замыкания в разных местах x_f через сопротивления $R_{fnp}(x_f)$ неразличимы. Нечётная функция (1.4) даёт в первом и втором квадрантах угла δ зеркальные отражения зависимостей, построенных соответственно для четвёртого и третьего квадрантов. На графиках рисунка 1.14 физически нереальные части кривых при $R_{fnp} < 0$ отмечены пунктиром. В четвёртом квадранте, где нет таких частей (рисунок 1.14а), нераспознаваемость в зоне защиты адекватна нераспознаваемости мест замыкания. В первом квадранте, где $R_{fnp} < 0$, нераспознаваемость не проявляется вовсе.

В третьем квадранте функция (1.4) знакопеременна (рисунок 1.14б). Во втором квадранте она инверсна той, что показана для третьего квадранта. Для характерного угла $\delta = 180^\circ$ она уходит в бесконечность во всех местах линии, кроме её середины и конца (рисунок 1.14в). Координата $x_{fкр}$ критического места, где $R_{fnp} = 0$,

$$\frac{x_{fкр}}{l} = \frac{1}{2\sin^2(\delta/2)}, \quad (1.5)$$

её график приведён на рисунке 1.15. Поведение функции (1.4) накладывает свой отпечаток на условие нераспознаваемости применительно к дистанционной защите. Пусть l_3 – длина защищаемой зоны ($l_3 < l$). В третьем квадранте (рисунок 1.14б), если

$$l_3 > x_{fкр}, \quad (1.6)$$

зависимость $R_{fnp}(x_f)$ вне зоны становится нереальной

$$R_{fnp}(x_f) < 0, x_f > l_3, \quad (1.7)$$

говоря о том, что нераспознаваемость не проявляется.

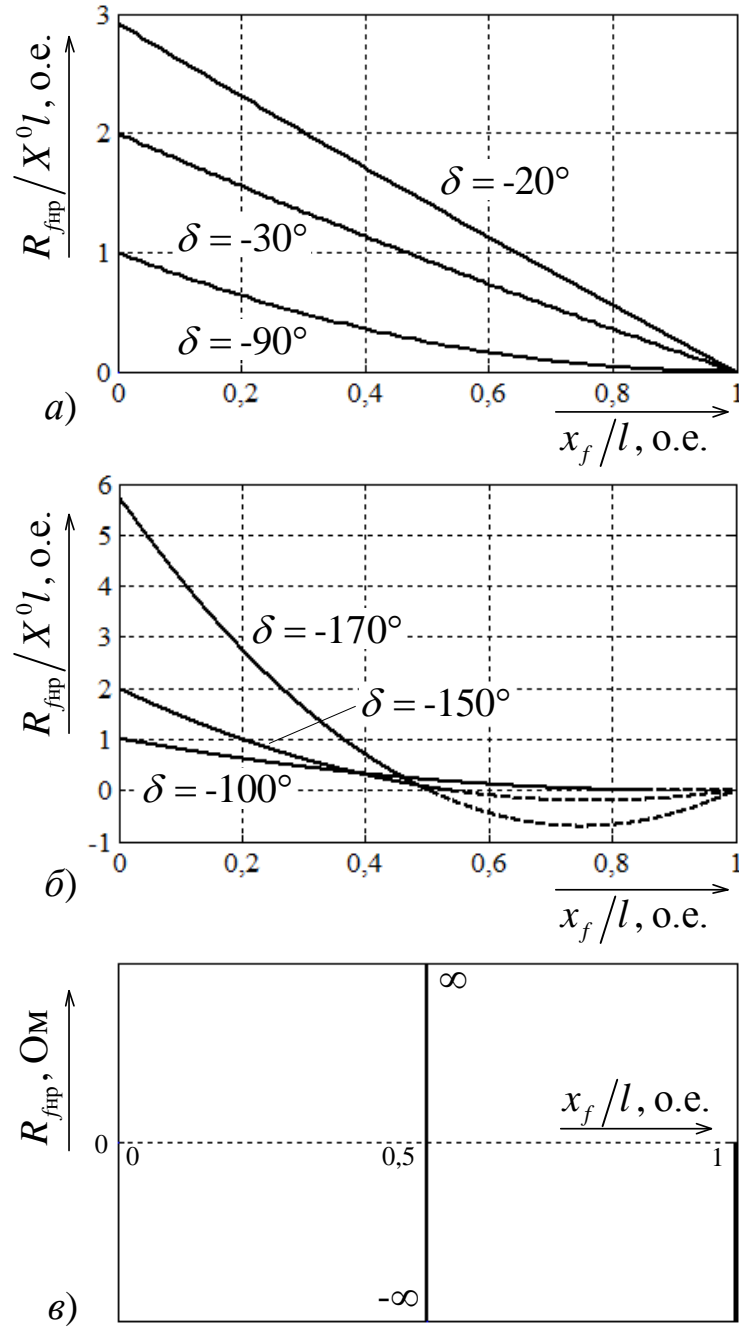


Рисунок 1.14 – Характеристика нераспознаваемости трёхфазных коротких замыканий: *a* – при угле передачи в четвёртом квадранте, *б* – в третьем квадранте, *в* – при $\delta = 180^\circ$

Во втором квадранте, для которого зависимости рисунка 1.14б инвертируются, неравенство (1.7) не может быть удовлетворено при любом соотношении между l_3 и $x_{fкр}$. Следовательно, нераспознаваемость проявляется при замыканиях во всех местах x_f , где

$$R_{fnp}(x_f) > 0, x_f < l_3. \quad (1.8)$$

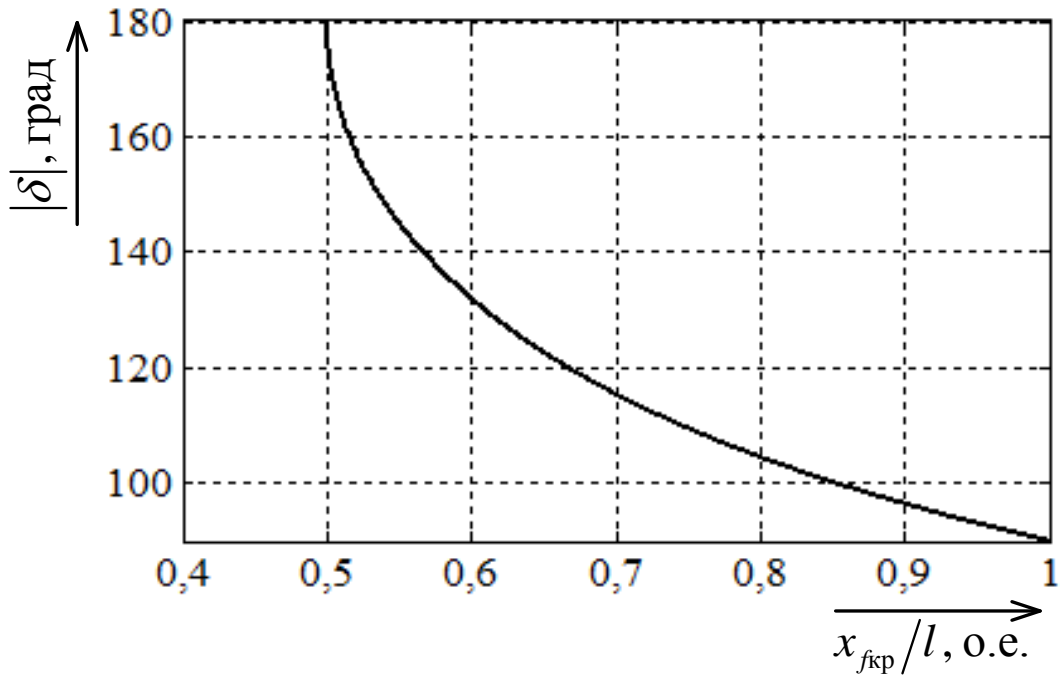


Рисунок 1.15 – Взаимосвязь координаты критического места замыкания и угла передачи

1.4 Выводы

1. Области дискретного пространства образуются примыкающими друг к другу элементарными ячейками и подчиняются общим закономерностям, из которых вытекают правила определения граничных ячеек и проверки односвязности независимо от размерности пространства.

2. Чтобы реализовать метод прямой адаптации релейной защиты, необходимо отобразить в дискретном пространстве априорную информацию о защищаемом объекте и определить для задействованных ячеек характеристики срабатывания на плоскости замера, осуществляемого в текущем режиме.

3. В задаче распознавания зоны повреждения линии электропередачи условия нераспознаваемости формулируются иначе, нежели в задаче распознавания места повреждения. Так, в третьем квадранте угла передачи нераспознаваемость места проявляется всегда, а нераспознаваемость зоны может не проявиться.

ГЛАВА 2 ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ АДАПТАЦИИ

2.1 Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи

Микропроцессорная техника открывает благоприятную перспективу для полномасштабной реализации адаптивных защит, использующих всю доступную информацию о состоянии контролируемого объекта. Существующие способы адаптации¹ модулей релейной защиты можно подразделить на два типа – прямой и косвенной адаптации. Прямая адаптация предполагает видоизменение характеристики срабатывания модуля в зависимости от ситуации, складывающейся на объекте. Например, характеристике срабатывания реле сопротивления придаётся зависимость от тока обратной последовательности². В более общем случае прямая адаптация производится в дискретном пространстве, подразделённом на ячейки³. Его координаты – замеры, осуществляемые релейной защитой⁴. Область срабатывания задаётся совокупностью номеров ячеек, в которых отображаются контролируемые режимы (α -режимы), но куда не попадают альтернативные режимы (β -режимы).

Способы косвенной адаптации в релейной защите ведут своё начало от широко известного реле Бреслера⁵. Их можно интерпретировать при помощи представлений об алгоритмических моделях объекта⁶, осуществляющих преобразование наблюдаемых величин в напряжения и токи места предполагаемого повреждения⁷.

¹ Ефремов В.А. Адаптивный дистанционный принцип защиты и автоматики линий электропередачи и средства его реализации: автореф. дис. ... к-та техн. наук. СПбГТУ, СПб, 1993.

² Adaptive quadrilateral characteristic distance relay // Патент США №5796258, 1998.

³ Способ релейной защиты энергообъекта // Патент РФ № 2247456. БИ №6, 2005.

⁴ Способ дистанционной защиты линии электропередачи // Патент РФ № 2248077. БИ №7, 2005.

⁵ Устройство для защиты высоковольтных линии передачи от замыканий между фазами // Авторское свидетельство СССР №66343, 1944.

⁶ 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.

⁷ Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Эволюция дистанционной релейной защиты // Электричество, 1999, № 3, С. 8-15.

Оба типа адаптации рассматриваются на примере ключевой для дистанционной защиты задачи контроля зоны повреждения линии электропередачи. Необходимый инструментарий предоставляет метод обучения релейной защиты с учителем – имитационной моделью защищаемого объекта в α - и β -режимах¹, а также метод объектных характеристик для оценивания чувствительности защиты к переходному сопротивлению короткого замыкания и определения сопротивлений, при которых место замыкания становится нераспознаваемым².

2.2 Постановка задачи

Каждому алгоритму защиты присуща своя распознающая способность. Ставится задача сравнить разные алгоритмы по их распознающей способности и оценить степень влияния явления нераспознаваемости. С тем, чтобы исключить влияние прочих факторов, ограничивающих распознающую способность, области срабатывания реле, действующих по разным алгоритмам, будут формироваться по единой методике обучения с учителем. В данном случае роль учителя возлагается на имитационную модель линии электропередачи (рисунок 2.1) с тремя варьируемыми параметрами x_f , R_f и δ без ограничения диапазона изменения угла передачи. Влияние блокировки при качаниях на распознающую способность защиты учитывается отдельно.

В модели по рисунку 2.1 фиксированы значения сопротивлений $Z_c = 1 + j10$ Ом, $Z^0 = 0,1 + j0,43$ Ом/км и ЭДС $E = 220/\sqrt{3}$ кВ. Длина линии $l = 100$ км, протяжённость защищаемой зоны $l_s = 85$ км. Аварийные параметры с индексом α относятся к замыканиям в зоне, $R_{f\alpha} \in (0, 100)$ Ом; с индексом β – к замыканиям вне зоны, $R_{f\beta} \in (0, \infty)$, где верхний предел отвечает нормальному

¹ Лямец Ю.Я., Мартынов М.В., Нудельман Г.С., Романов Ю.В., Воронов П.И. Обучаемая релейная защита. Ч. 1, 2 // Электричество, 2012, № 2, С. 15-19; № 3, С. 12-18.

² Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О., Ефимов Е.Б., Законьшек Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 1, 2, 3 // Электричество, 2001, № 2, С. 16-23; № 3, С. 16-24; № 12, С. 9-22.

режиму; $x_{f\alpha} \in (0, l_3)$, $x_{f\beta} \in (l_3, l)$. Переходные сопротивления $R_{f\alpha}$ и $R_{f\beta}$ показаны пунктиром, так как режим короткого замыкания создаётся только одним из них.

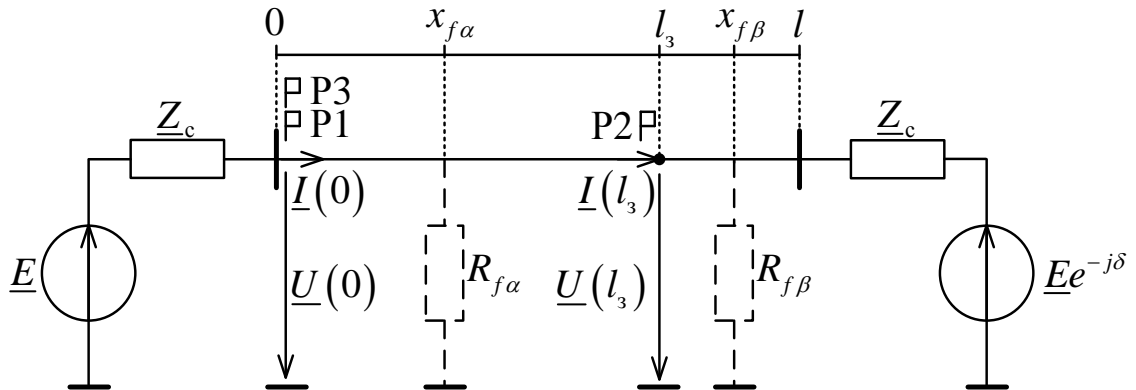


Рисунок 2.1 – Обучающая имитационная модель линии электропередачи

Регистрируемые величины – комплексы тока к напряжения в начале линии; $\underline{I}_{\text{пд}}(0)$, $\underline{U}_{\text{пд}}(0)$ – в предшествующем режиме; $\underline{I}_{\text{тк}}(0)$, $\underline{U}_{\text{тк}}(0)$ – в текущем режиме короткого замыкания. В имитационной модели проводится обучение трёх реле сопротивления: P1 реагирует на замер $\underline{Z}_{\text{тк}}(0) = \underline{U}_{\text{тк}}(0) / \underline{I}_{\text{тк}}(0)$ без какой-либо адаптации; P2 действует по методу косвенной адаптации, реагируя на замер

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{та}}(0) &= \underline{U}_{\text{тк}}(l_3) / \underline{I}_{\text{ав}}(l_3), \\ \underline{U}_{\text{тк}}(l_3) &= \underline{U}_{\text{тк}}(0) - \underline{Z}^0 l_3 \underline{I}_{\text{тк}}(0), \\ \underline{I}_{\text{ав}}(l_3) &= \underline{I}_{\text{ав}}(0);\end{aligned}$$

реле P3 реагирует на замер $\underline{Z}_{\text{тк}}$, но с использованием прямой адаптации. Характеристика срабатывания реле P3 модифицируется в зависимости от значения угла δ , в связи с чем эффективность прямой адаптации оценивается при таких значениях δ , где явление нераспознаваемости замыканий вводит наиболее существенные ограничения или имеет любопытные особенности.

2.3 Процедуры и результаты обучения реле

Пусть \underline{Z}_p – общее обозначение замера комплексного сопротивления $\underline{Z}_{\text{тк}}$ или $\underline{Z}_{\text{та}}$, на которое реагирует то или иное реле. Процесс обучения включает в себя несколько операций. Первая – отображение на плоскости \underline{Z}_p различных режимов имитационной модели. Вторая – процедура триангуляции – окаймление граничными линиями областей отображения S_α и S_β соответственно α - и β -

режимов¹. Третья – определения области срабатывания реле $S_{\alpha\alpha} = S_{\alpha} \setminus S_{\beta}$ как разности областей S_{α} и S_{β} . Результаты обучения реле приведены на рисунке 2.2. Наряду с областями $S_{\alpha\alpha}$ там указывается ещё и важные для понимания свойств реле области $S_{\alpha\beta} = S_{\alpha} \cap S_{\beta}$ – пересечения областей S_{α} и S_{β} . В $S_{\alpha\beta}$ входит та часть области S_{α} , в которой соответствующее реле не в состоянии отличить α -режимы от β -режимов.

Результаты обучения реле P1, как и P2, иллюстрируются только одним графиком для каждого из них (рисунки 2.2а, б). Характеристики реле P3, модифицируемые в зависимости от значения угла δ , представлены на большем числе иллюстраций (рисунки 2.2в...з). Заметим, что при всех значениях угла δ , для которых даны иллюстрации, область срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ разделяется на две части отображениями режимов, параметры которых близки к функции (1.4). В мелком масштабе водораздел между подобластями $S'_{\alpha\alpha}$ и $S''_{\alpha\alpha}$ выглядит точкой при всех значениях δ (рисунки 2.2в, д, ж). В крупном масштабе обнаруживаются принципиальные различия. При $\delta = -90^{\circ}$ (рисунок 2.2г) и $\delta = 170^{\circ}$ (рисунок 2.2з) область $S_{\beta\beta}$ вклинивается между $S'_{\alpha\alpha}$ и $S''_{\alpha\alpha}$, вследствие чего создаётся небольшая область $S_{\alpha\beta}$, лишаящая $S'_{\alpha\alpha}$ и $S''_{\alpha\alpha}$ непосредственного соприкосновения. А при $\delta = -170^{\circ}$ область $S_{\alpha\beta}$ вообще не обнаруживается, что свидетельствует об отсутствии нераспознаваемых α -режимов. Различия в результатах обучения реле P3 при $\delta = 170^{\circ}$ и $\delta = -170^{\circ}$ объясняется тем, что в данной имитационной модели выполняются как условия (1.6), (1.7), так и условие (1.8).

¹ Лямец Ю.Я., Мартынов М.В. Граничная задача релейной защиты // Электричество, 2013, № 10, С. 16-22.

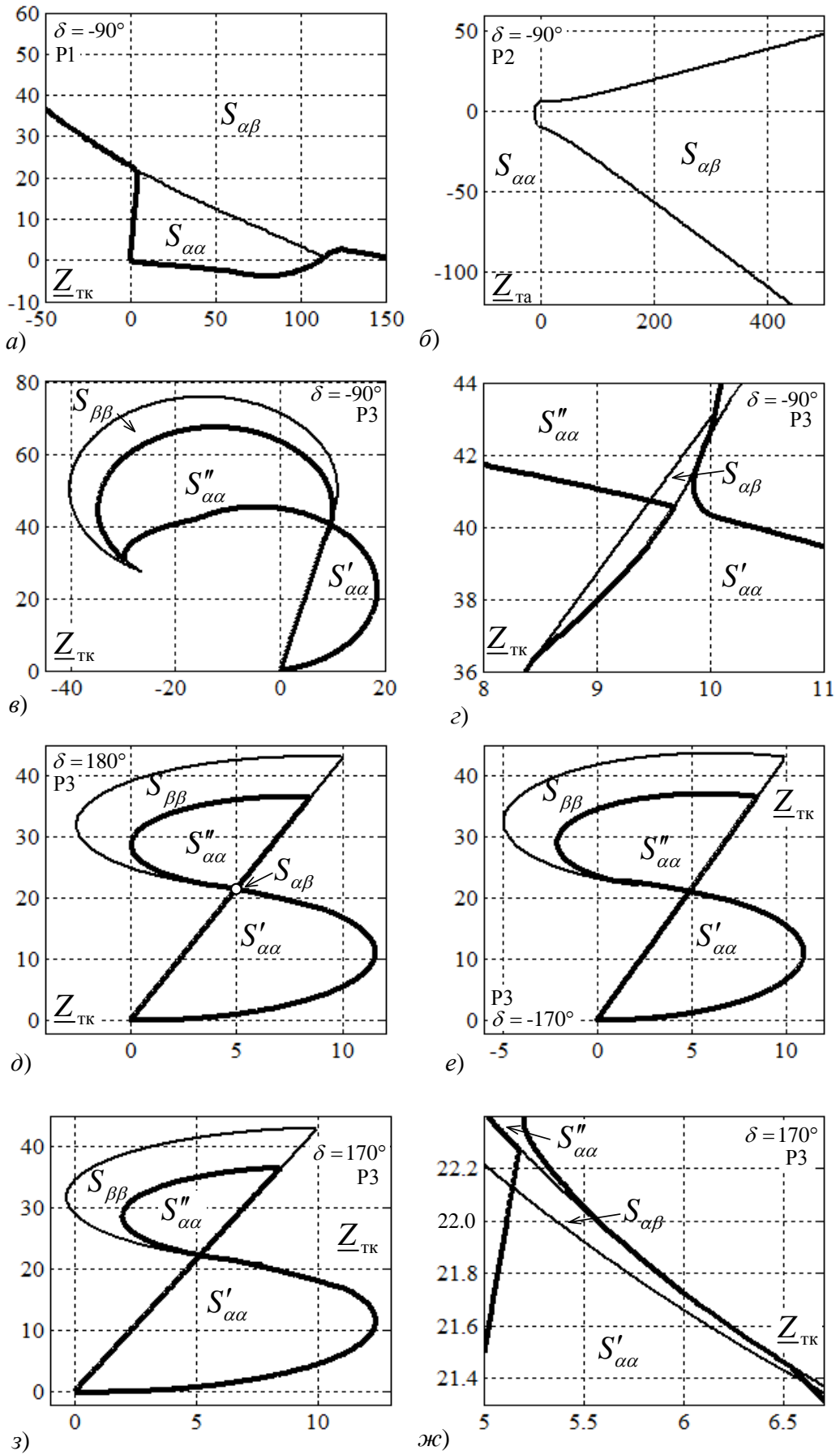


Рисунок 2.2 – Области срабатывания реле сопротивления трёх типов
Сопротивления – в Омах

2.4 Объектные характеристики реле

Процедуру обучения реле можно охарактеризовать как прямое преобразование F , отображающее область G параметров имитационной модели в область S на плоскости замера: $S = F(G)$, $S_\alpha = F(G_\alpha)$, $S_\beta = F(G_\beta)$. После определения области срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ становится востребованным обратное преобразование $f(S_{\alpha\alpha}) = F^{-1}(S_{\alpha\alpha}) = G_{\alpha\alpha}$, создающее область параметров имитационной модели в распознаваемых режимах. Проекция области $G_{\alpha\alpha}$ на плоскость $x_{f\alpha}$, $R_{f\alpha}$ окаймляется объектной характеристикой

$$R_{f\alpha}(x_{f\alpha}) = \arg \operatorname{extr}_{R_{f\alpha}} \left[Z_p(x_{f\alpha}, R_{f\alpha}) \in S_{\alpha\alpha} \right]. \quad (2.1)$$

Процедура (2.1) применена к областям $S_{\alpha\alpha}$ на рисунке 2.2. Результаты, приведённые на рисунке 2.3, говорят о том, что прямая адаптация придаёт дистанционной защите наивысшую распознающую способность.

Модуль блокировки защиты при качаниях подвергает распознаваемые режимы дополнительной селекции, ограничивая диапазон изменения аварийной составляющей тока: $I_{ав} \geq I_{уст}$, ток уставки $I_{уст}$ определяется при металлическом замыкании в конце защищаемой зоны. Для модели по рисунку 2.1 определяется значение $I_{уст} = 845$ А.

Селекция α -режимов негативно сказывается на объектных характеристиках защиты. Коль скоро это неизбежно, хотелось бы подвергнуть такой же селекции и альтернативные β -режимы, учитывая действие блокировки на стадии обучения защиты, что объективно способствует расширению области срабатывания $S_{\alpha\alpha}$. Результаты применения именно такого подхода к учёту действия блокировки при качаниях приведены на рисунке 2.4. Сравнение областей срабатывания на рисунках 2.4а...г с соответствующими областями на рисунках 2.2а...в, а также объектных характеристик на рисунках 2.4д, е с характеристиками на рисунке 2.3а, говорит об осязательном влиянии дополнительной селекции обучающих режимов имитационной модели. Безусловно, преимущество реле с прямой адаптацией сохраняется.

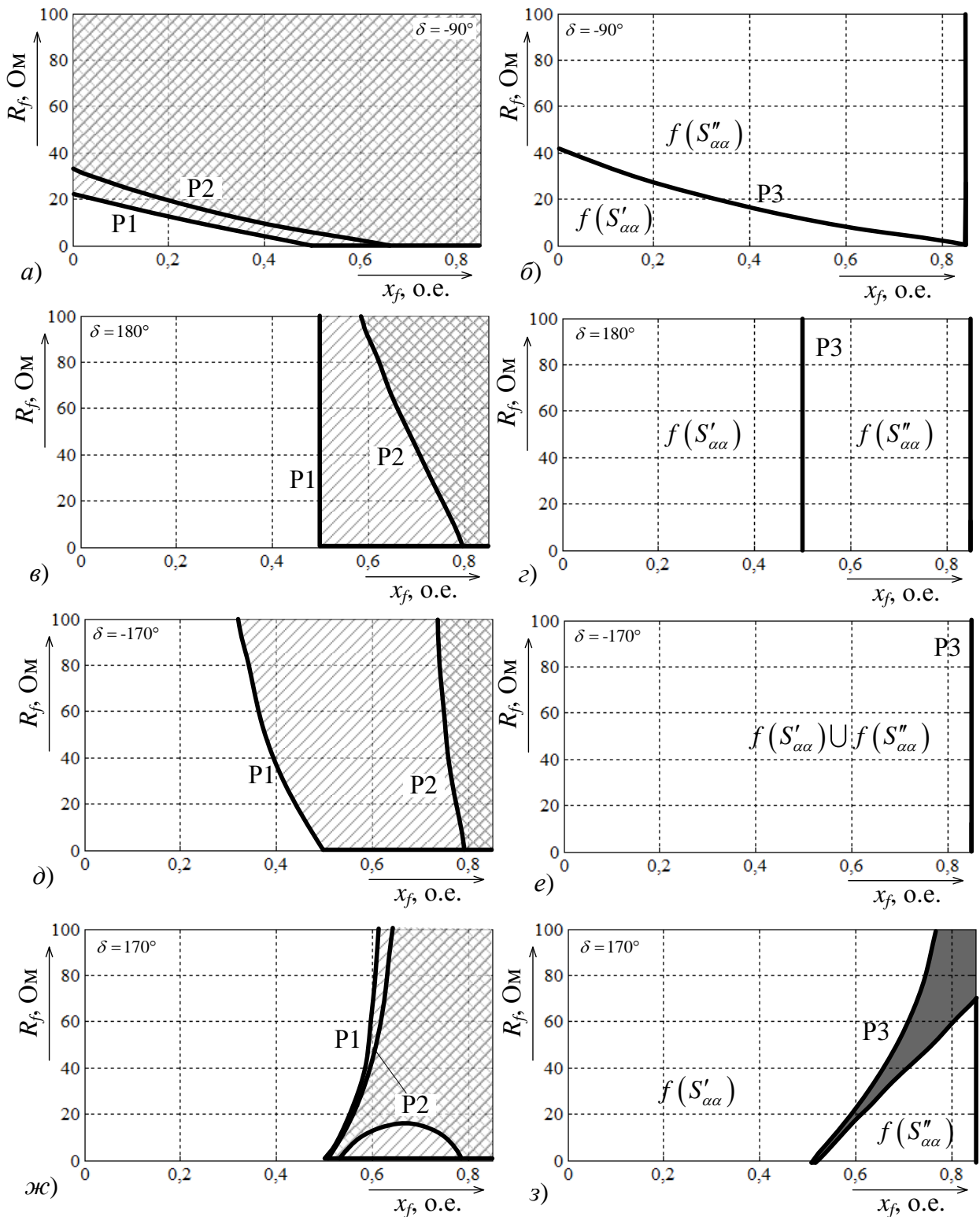


Рисунок 2.3 – Объектные характеристики реле сопротивления трёх типов
 Не заштрихованы объектные области срабатывания реле, отмечены области несрабатывания, простой штриховкой – P1, двойной штриховкой – и P1, и P2, тёмным фоном – P3

Области срабатывания $S_{\alpha\alpha}$, $S'_{\alpha\alpha}$ и $S''_{\alpha\alpha}$ видоизменяются. Имеют место не только количественные, но и качественные изменения. Так, при $\delta = -90^\circ$ без учёта

блокировки области $S_{\alpha\beta}$ ограничивались по сути дела одной точкой на стыке областей $S'_{\alpha\alpha}$, $S''_{\alpha\alpha}$ и $S_{\alpha\beta}$ (рисунок 2.2в), в то время как с учётом блокировки область $S_{\alpha\beta}$ приобретает заметные размеры (рисунок 2.4з). Соответственно, изменяются и области распознавания $G_{\alpha\alpha}$. Если без блокировки область $G''_{\alpha\alpha} = f(S''_{\alpha\alpha})$ не имела ограничения вплоть до $R_f = 100$ Ом (рисунок 2.3а), то с учётом блокировки размеры этой области ограничиваются двумя объектными характеристиками (рисунок 2.4е).

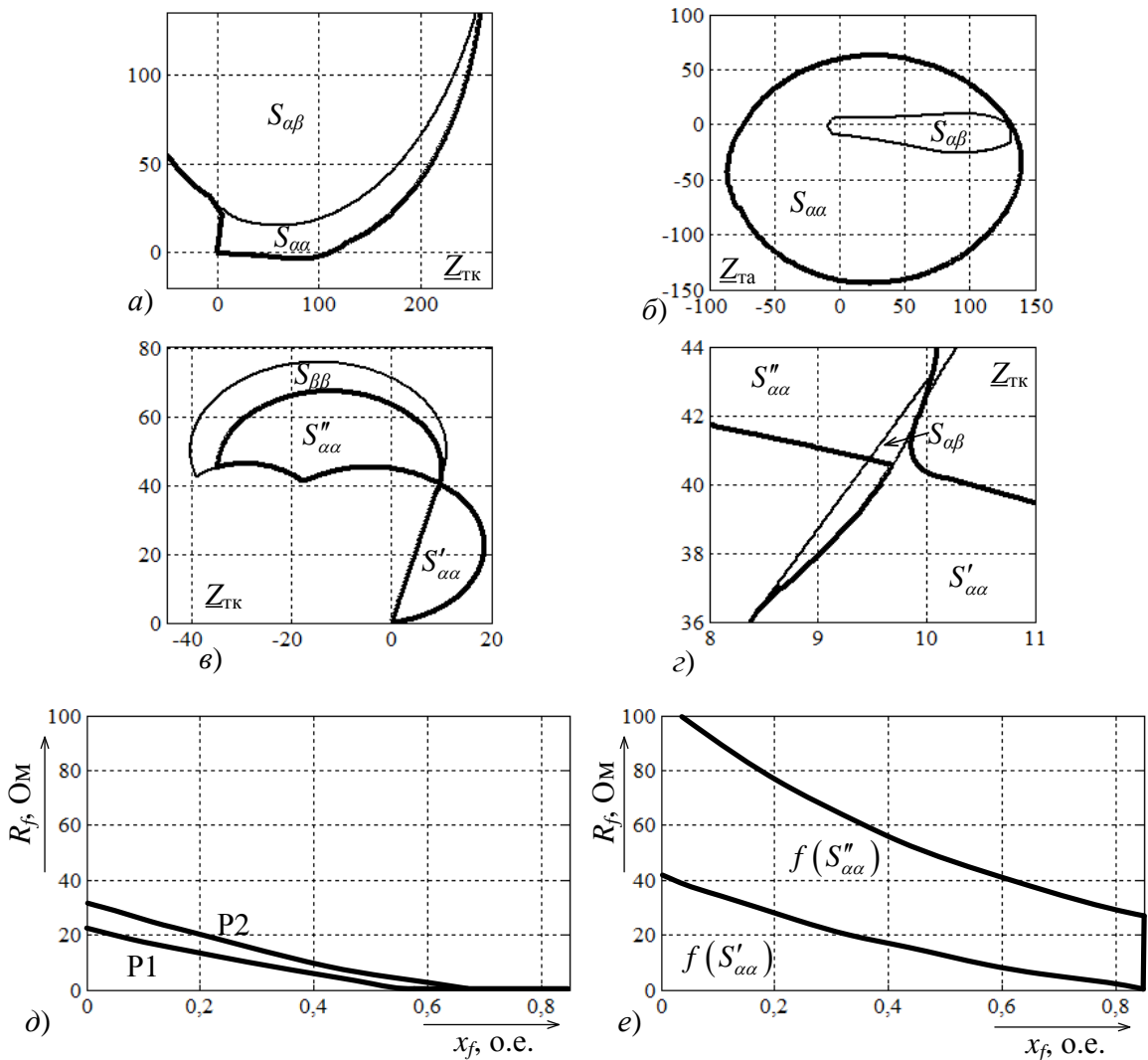


Рисунок 2.4 – Обучение с учётом блокировки при качаниях
 а...г – области срабатывания, а – реле P1, б – реле P2, в, г – P3 при $\delta = -90^\circ$;
 д, е – объектные характеристики, д – реле P1 и P2, е – реле P3

2.5 Дистанционная защита с прямой адаптацией

Существо прямой адаптации состоит в модифицировании области срабатывания защиты в зависимости от режима линии электропередачи, предшествующего короткому замыканию. Воспользуемся дискретным пространством для отображения информации о предшествующем режиме, заложив в каждую ячейку описание характеристики срабатывания реле сопротивления на комплексной плоскости $\underline{Z}_{\text{ТК}} = \underline{U}_{\text{ТК}} / \underline{I}_{\text{ТК}}$, где $\underline{U}_{\text{ТК}}$ и $\underline{I}_{\text{ТК}}$ – комплексы напряжения и тока в текущем режиме короткого замыкания.

Распознающая способность алгоритма прямой адаптации в идеальной интерпретации исследована выше. Идеальный вариант не связан с неизбежными ограничениями, возникающими при реализации. Применительно к дискретному пространству это означает, что в идеальном варианте ячейки стягиваются в точки. Здесь же рассматриваются ячейки реального размера. Реализация алгоритма осуществляется в заранее подготовленном дискретном пространстве предшествующего режима. В симметричном режиме вся информация о состоянии объекта заключена в комплексах двух наблюдаемых фазных величинах – тока $\underline{I}_{\text{пд}}$ и напряжения $\underline{U}_{\text{пд}}$, а именно в их модулях $I_{\text{пд}}$, $U_{\text{пд}}$ и разности фаз φ . В качестве координат пространства предшествующего режима выберем активную и реактивную мощности $P_{\text{пд}}$ и $Q_{\text{пд}}$

$$P_{\text{пд}} + jQ_{\text{пд}} = \underline{U}_{\text{пд}} \underline{I}_{\text{пд}}^*$$

а также полный ток $I_{\text{пд}}$. Введём обозначение вектора замера в предшествующем режиме

$$\mathbf{z}_{\text{пд}} = [P_{\text{пд}}, Q_{\text{пд}}, I_{\text{пд}}]^T.$$

Замеры формируются по результатам наблюдения имитационной модели электропередачи с удельным сопротивлением $\underline{Z}^0 = 0,1 + j0,43$ Ом/км при длине линии $l = 100$ км (рисунок 2.5). Сопротивление систем $\underline{Z}_s = Z_s \exp j\varphi_s$ и $\underline{Z}_r = Z_r \exp j\varphi_r$ взяты с фиксированным аргументом $\varphi_s = \varphi_r = 88^\circ$ и независимо варьируемыми модулями $Z_s \in (1, 10)$ Ом, $Z_r \in (1, 10)$ Ом. Напряжение источников $E_s = E_r = 220 / \sqrt{3}$ кВ берутся с независимо варьируемыми множителями

$\lambda_s \in (0,9; 1,1)$, $\lambda_r \in (0,9; 1,1)$. Обучение защиты проводится не только в нормальных предшествующих режимах, когда угол передачи δ изменяется в ограниченном диапазоне и только в первой и четвертой четвертях, но и в асинхронном режиме, когда угол δ изменяется без каких-либо ограничений.

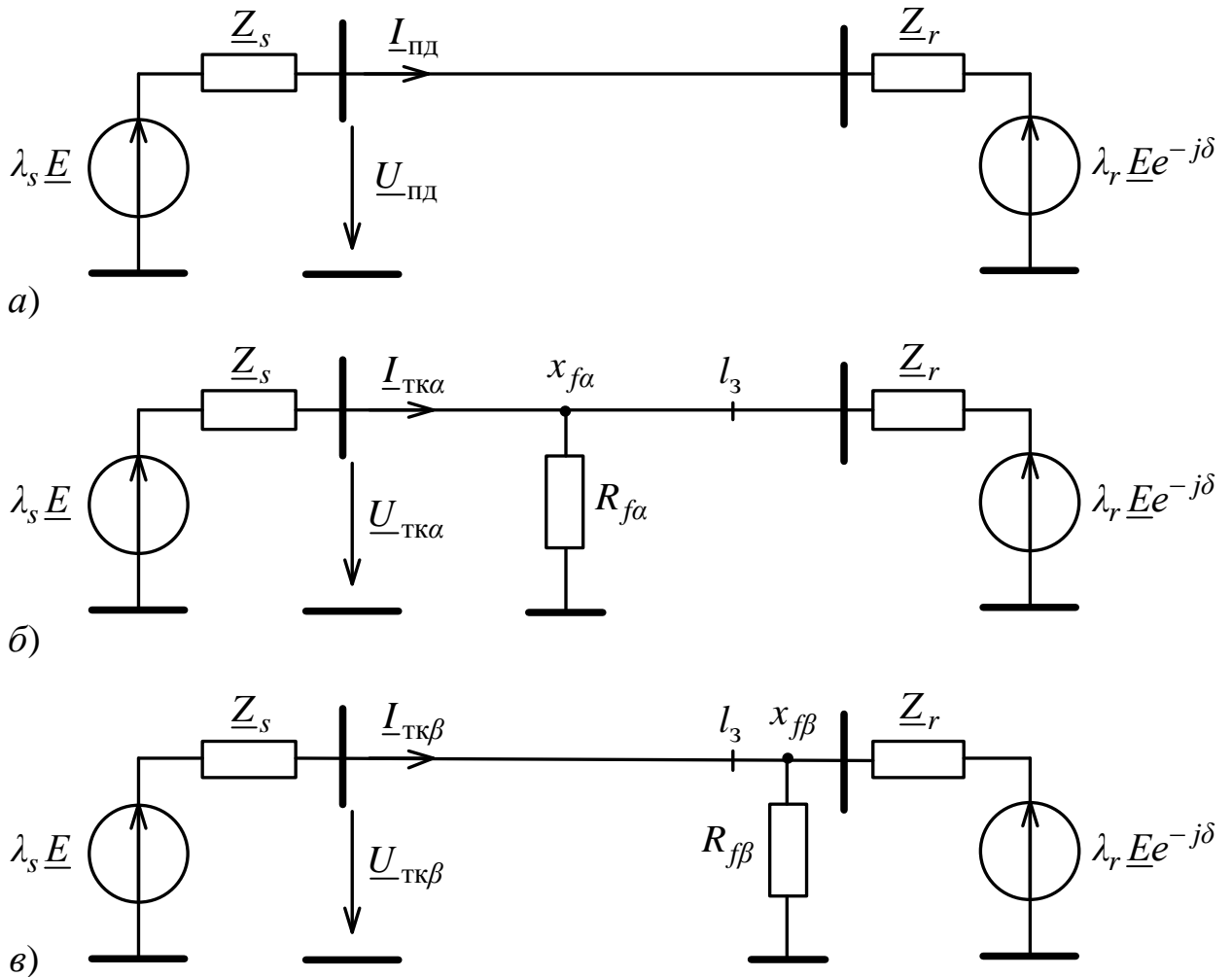


Рисунок 2.5 – Обучающая имитационная модель линии электропередачи
a – в предшествующем режиме, *б* – при замыкании в зоне защиты (α -режим),
в – при замыкании вне зоны (β -режим)

Всего в модели по рисунку 2.5 семь варьируемых параметров: пять нормальных, образующих вектор

$$\mathbf{x}_{\text{norm}} = [\delta, Z_s, Z_r, \lambda_s, \lambda_r]^T,$$

и два аварийных – переходное сопротивление R_f и место замыкания x_f . В предшествующем режиме варьируются только нормальные параметры, в текущем режиме – ещё и аварийные.

На рисунке 2.6 представлена дискретная область отображения предшествующих режимов $V_{\text{пд}}$. Она занимает 50 ячеек параллелепипеда, составленного из $5^3 = 125$ ячеек. Стороны каждой ячейки по осям $P_{\text{пд}}$, $Q_{\text{пд}}$, $I_{\text{пд}}$ составляют 164 МВт; 160 МВАр; 1,2 кА. Область $V_{\text{пд}}$ не сплошная, в ней имеется внутренняя полость.

Реле сопротивления с прямой адаптацией, как и обычное неадаптивное реле, реагирует на замер $Z_{\text{тк}} = \underline{U}_{\text{тк}} / I_{\text{тк}}$, но различие между ними носит принципиальный характер. Неадаптивное реле не использует информацию о предшествующем режиме и поэтому располагает единственной характеристикой срабатывания. У адаптивного реле для каждой ячейки $K_{\text{пд}}$ определяется своя характеристика.

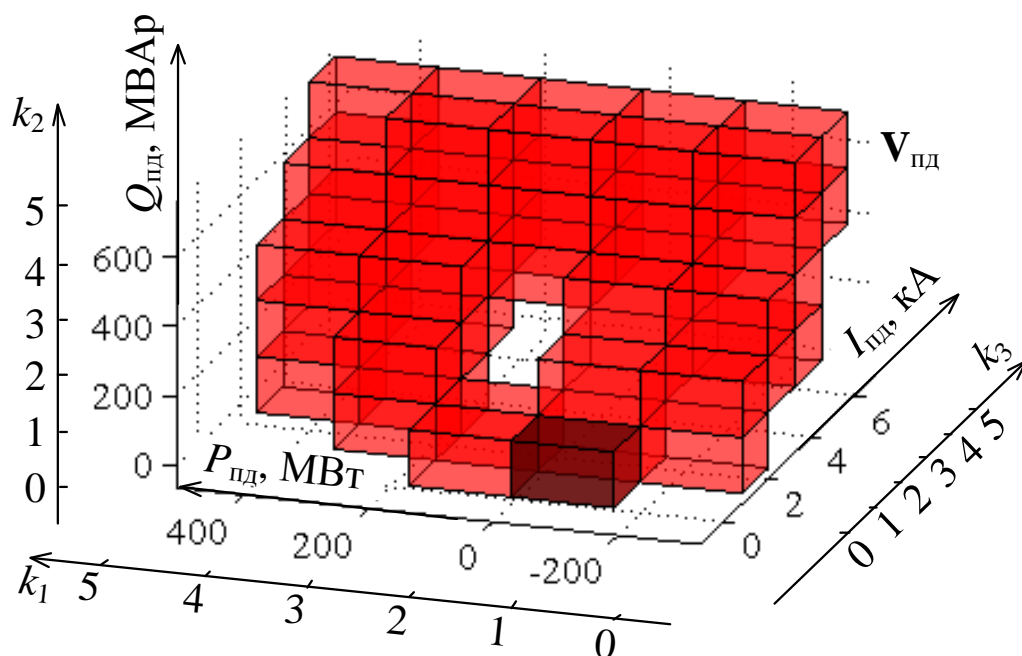


Рисунок 2.6 – Дискретная область отображения предшествующих режимов

2.6 Результаты обучения неадаптивного и адаптивного реле сопротивления

Роль учителя, как и прежде, возлагается на имитационную модель линии в предшествующем режиме (рисунок 2.5а) и в текущих режимах – контролируемых (α -режимы, рисунок 2.5б) и альтернативных (β -режимы, рисунок 2.5в). Контролируемые режимы – замыкания в зоне защиты, где $x_{f\alpha} \in (0, l_3)$, $l_3 = 85$ км – длина зоны защиты; $R_{f\alpha} \in (0, 100)$ Ом. Альтернативные режимы – замыкания вне зоны защиты, где $x_{f\beta} \in (l_3, l)$, $l = 100$ км, $R_{f\beta} > 0$. Отсутствие верхнего ограничения

вариаций переходного сопротивления $R_{f\beta}$ объясняется тем, что нормальные режимы ($R_{f\beta} \rightarrow \infty$) тоже относятся к числу β -режимов.

Замеры сопротивлений $\underline{Z}_{\text{TK}\alpha} = \underline{U}_{\text{TK}\alpha} / \underline{I}_{\text{TK}\alpha}$ и $\underline{Z}_{\text{TK}\beta} = \underline{U}_{\text{TK}\beta} / \underline{I}_{\text{TK}\beta}$ отображаются на комплексной плоскости $\underline{Z}_{\text{TK}}$ в виде областей S_α и S_β . Область срабатывания реле $S_{\alpha\alpha}$ определяется как разность двух отображений: $S_{\alpha\alpha} = S_\alpha \setminus S_\beta$. Короткие замыкания в защищаемой зоне, к которым реле оказалось нечувствительным, отображаются в подобласти $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\beta$.

Применяемую далее методику обучения можно назвать строгой, так как она исключает возможность неселективного действия защиты при каких бы то ни было значениях угла передачи δ . Результат обучения неадаптивного реле предстаёт в виде единственной области $S_{\alpha\alpha}$ (рисунок 2.7). Обучение адаптивного реле проводится отдельно для каждой ячейки $\mathbf{K}_{\text{пд}}$. К параметрам имитационной модели при этом предъявляется дополнительное условие

$$\mathbf{z}_{\text{пд}}(\mathbf{x}_{\text{norm}}) \in \mathbf{K}_{\text{пд}}, \quad (2.2)$$

ограничивающее вариации вектора \mathbf{x}_{norm} . На рисунке 2.8 приведена область срабатывания, полученная с учётом условия (2.2) для зачернённой на рисунке 2.6 ячейки с кодом $\mathbf{K}_{\text{пд}} = [1, 2, 1]^T$ и сторонами $P_{\text{пд}} \in (-156; 8)$ МВт, $Q_{\text{пд}} \in (-50; 110)$ МВАр, $I_{\text{пд}} \in (0; 1,2)$ кА. В указанной ячейке отображаются нормальные режимы работы имитационной модели при углах передачи $\delta \in (-30^\circ, -35^\circ)$. Распознающая способность реле оценивается его объектной характеристикой $R_{f \min \max}(x_f)$, определяемой следующей процедурой

$$R_{f \min \max}(x_f, \mathbf{x}_{\text{norm}}) = \min_{\mathbf{x}_{\text{norm}}} \max_{R_f} \arg \left[\mathbf{z}_{\text{пд}}(\mathbf{x}_{\text{norm}}) \in \mathbf{K}_{\text{пд}}; \underline{Z}_{\text{TK}}(R_f, x_f, \mathbf{x}_{\text{norm}}) \in S_{\alpha\alpha} \right]. \quad (2.3)$$

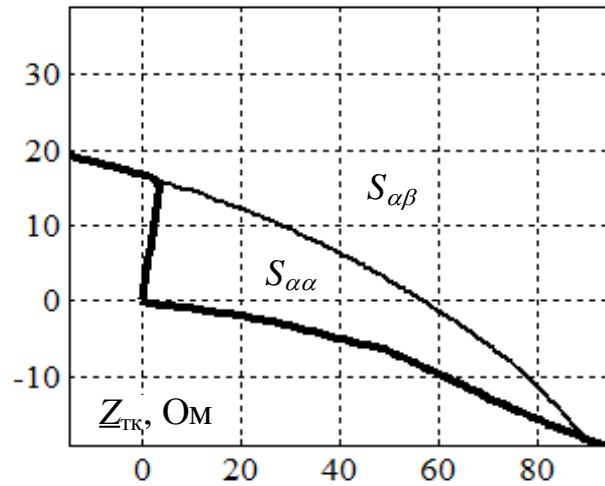


Рисунок 2.7 – Область срабатывания неадаптивного реле сопротивления

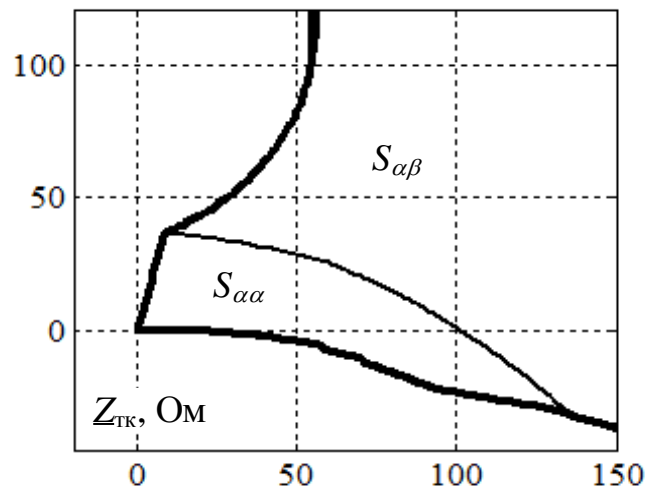


Рисунок 2.8 – Область срабатывания адаптивного реле сопротивления для параметров модели, отвечающих условию $\mathbf{z}_{\text{пд}} \in \mathbf{K}_{\text{пд}}$

Результаты применения операции (2.3) к обоим реле приведены на рисунке 2.9. Необходимы пояснения. Во-первых, требуется объяснить, почему входящее в (2.3) условие (2.2) распространено на неадаптивное реле, хотя на этапе обучения этого реле оно не использовалось. Дело в том, что объектные характеристики необходимо определять для одного и того же множества режимов имитационной модели, это уравнивает условия определения распознающей способности реле разного типа. Во-вторых, необходимо объяснить, почему объектная характеристика неадаптивного реле указывает на нулевую чувствительность во второй половине линии. К сжатию области срабатывания неадаптивного реле (рисунок 2.7) привело требование селективности при коротких замыканиях в асинхронном режиме. Адаптивному реле такое

требования проблемы не создаёт, так как режимы с углами передачи δ во второй и третьей четвертях отображаются не во всех ячейках $\mathbf{K}_{\text{пд}}$, и укорочение защищаемой зоны не затрагивает ячейки, в которых отображаются предшествующие режимы с углами передачи в первой и четвёртой четвертях.

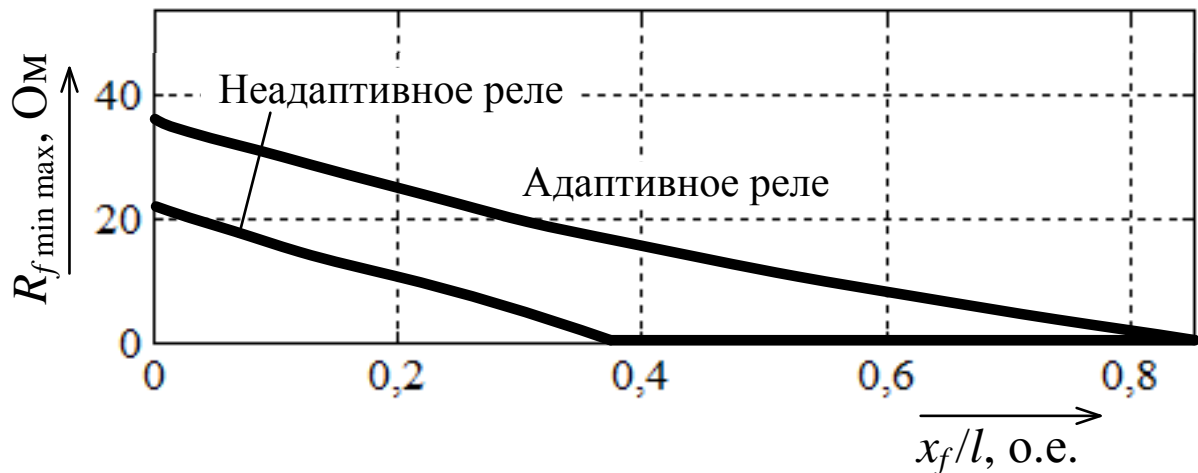


Рисунок 2.9 – Объектные характеристики двух реле

Интересно оценить последствия увеличения изменчивости параметров имитационной модели на распознающую способность реле. Добавим к числу варьируемых параметров углы сопротивлений систем $\varphi_s \in (70^\circ, 90^\circ)$ и $\varphi_r \in (70^\circ, 90^\circ)$, а верхний предел изменения полных сопротивлений Z_s и Z_r увеличим в десять раз, доведя его до 100 Ом. Изменившаяся область $\mathbf{V}_{\text{пд}}$ показана на рисунке 2.10. Чтобы вписать её в параллелепипед, состоящий, как и ранее (рисунок 2.6), из 125 ячеек, потребовалось несколько увеличить размеры ячеек по осям $P_{\text{пд}}$, $Q_{\text{пд}}$. Теперь стороны каждой ячейки составляют 174 МВт; 186 МВАр; 1,16 кА. Предшествующий режим отобразился в 67 ячейках.

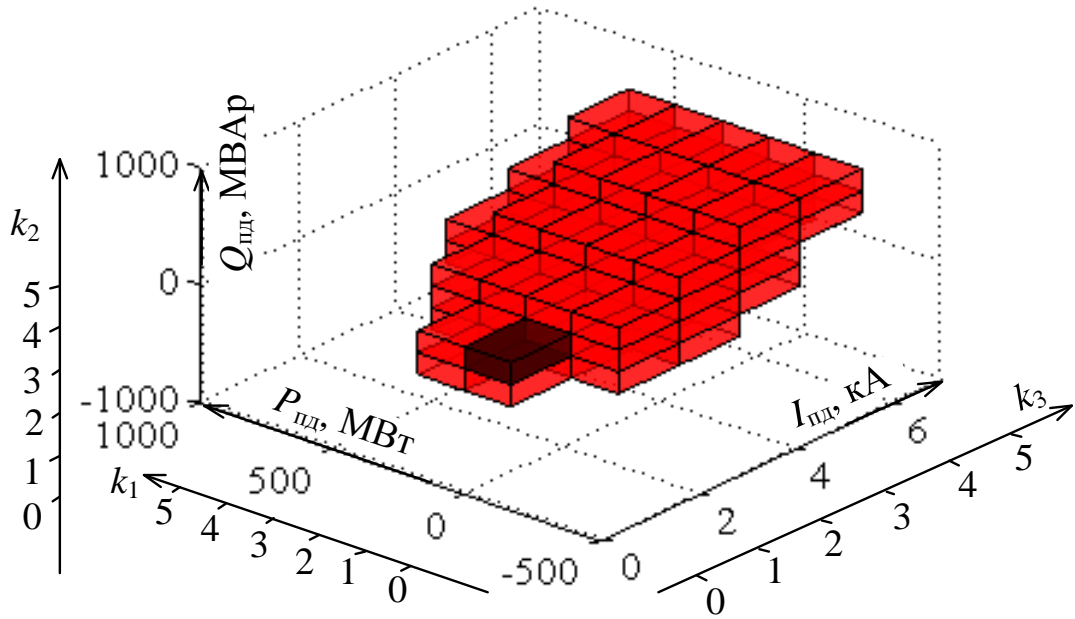


Рисунок 2.10 – Дискретная область отображения предшествующих режимов имитационной модели с повышенной изменчивостью параметров

Обучение неадаптивного реле привело к неожиданному результату: область $S_{\alpha\alpha}$ исчезла, что свидетельствует о невозможности обеспечить селективную работу реле в заданном диапазоне изменения параметров модели даже при металлическом замыкании в месте наблюдения.

Адаптивное реле, между тем, сохраняет селективность и в этих утяжелённых условиях. На рисунке 2.11 приведён результат обучения реле для зачернённой ячейки с кодом $\mathbf{K}_{нд} = [2, 2, 1]^T$ и сторонами $P_{нд} \in (-166; 8)$ МВт, $Q_{нд} \in (66; 252)$ МВАр, $I_{нд} \in (0; 1,16)$ кА. В ней отображаются режимы модели в угловом диапазоне $\delta \in (-35^\circ, -25^\circ)$. Соответствующая объектная характеристика приведена на рисунке 2.10. Она в основных чертах повторяет кривую на рисунке 2.9, что имеет объяснение. Объектные характеристики близки по своей форме к прямым, соединяющим точки $R_{f \min \max}(0)$ и $R_{f \min \max}(l_3) = 0$. Значение $R_{f \min \max}(0)$ определяется левой границей области $S_{\alpha\alpha}$, это линия максимальной чувствительности. А протяжённость этих границ областей $S_{\alpha\alpha}$ на рисунке 2.8 и рисунке 2.11 одинакова, хотя сами области и несхожи.

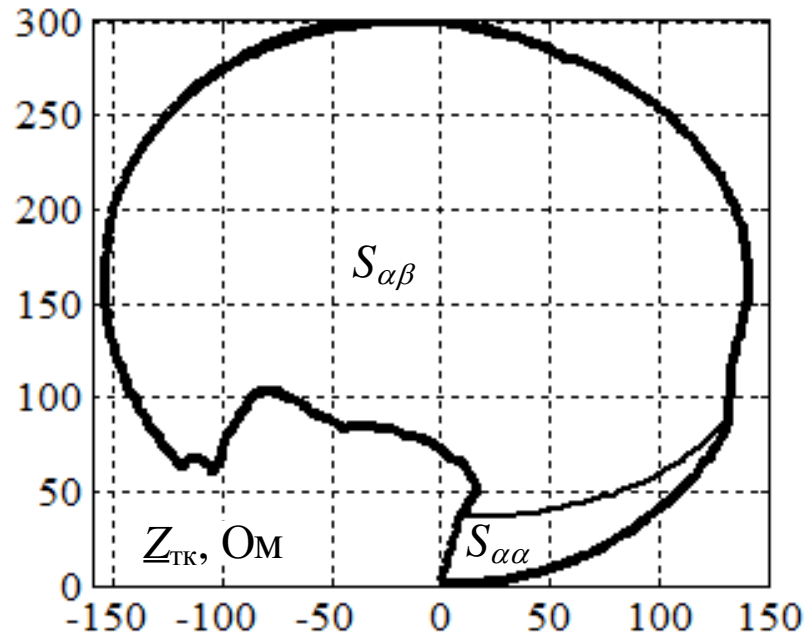


Рисунок 2.11 – Область срабатывания адаптивного реле сопротивления для расширенного диапазона изменения параметров имитационной модели

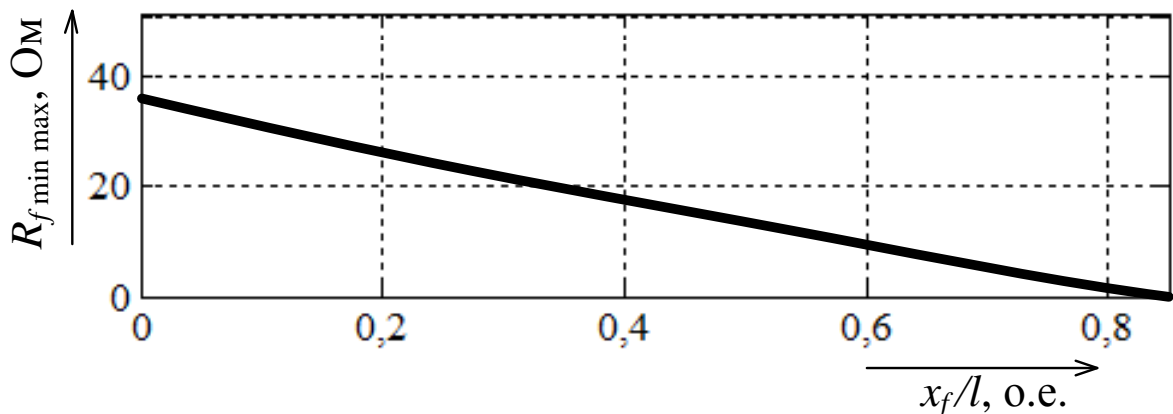


Рисунок 2.12 – Объектная характеристика реле с областью срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ по рисунку 2.11

2.7 Выводы

1. Прямая адаптация, заключающаяся в модифицировании условий срабатывания защиты в зависимости от состояния электропередачи в предшествующем режиме, придаёт дистанционной защите более высокую распознающую способность, чем косвенная.

2. Возможности адаптации защиты ограничиваются явлением нераспознаваемости части коротких замыканий. Нераспознаваемость проявляется

по-разному в каждом из четырёх квадрантов изменения угла передачи, чередующихся в асинхронном режиме.

3. Блокировка дистанционной защиты при качаниях, вводящая дополнительную селекцию наблюдаемых режимов, может быть учтена на этапе обучения защиты с тем, чтобы дополнительные ограничения затронули не только контролируемые, но и альтернативные им режимы.

4. Обучение реле сопротивления в условиях асинхронного режима с запретом неселективного действия при любых углах передачи выявляет бесспорное преимущество адаптивного реле перед неадаптивным: нераспознаваемость замыканий при некоторых углах передачи не сказывается на распознающей способности адаптивного реле при других углах. С повышением вариативности параметров имитационной модели неадаптивное реле утрачивает селективность, а адаптивное реле сохраняет это важнейшее свойство.

ГЛАВА 3 ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ЛОКАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В настоящее время появилась реальная возможность обмениваться по каналам связи результатами наблюдения токов и напряжений на разных подстанциях. Сосредоточение на одной стороне протяжённого объекта результатов наблюдения разных его сторон создаёт новые перспективы для локации и селекции многопроводных систем, например, двухцепной электропередачи. Число проводов реальной многопроводной системы может быть весьма велико. В мировой практике встречаются конструкции электропередач разных напряжений на общих опорах, что делается ради экономии отчуждаемой земли. Короткое замыкание здесь может охватить несколько линий.

С появлением микропроцессорной техники получило развитие направление в области локации электропередачи, оказавшееся продуктивным¹ и называемое иногда методом критериев повреждения². Под критерием повреждения понимается условие, связывающее токи и напряжения в месте предполагаемого повреждения с его координатой. Основное внимание всегда уделялось разработке алгоритмов локации при одностороннем наблюдении линии электропередачи. Наиболее общий критерий, который можно назвать энергетическим, основывался на принципе резистивности повреждения, из чего вытекает, что реактивная мощность повреждения равна нулю³. Комплексная мощность, потребляемая моделью повреждения, занимает особое положение среди прочих его характеристик, так как только она допускает суммирование по ветвям модели. В энергетическом критерии повреждения активная мощность играет вспомогательную роль. На самом наблюдаемом объекте она заведомо неотрицательна, но на модели из-за погрешностей измерительных

¹ Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Нудельман Г.С. Оптимизационный алгоритм контроля состояния электрической сети // Изв. РАН. Энергетика, 1994, №2, С. 100-110.

² 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.

³ Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием её моделей // Патент РФ №2033622, 1989.

преобразователей может принимать ограниченное по модулю отрицательное значение.

Энергетический критерий повреждения прошёл двадцатилетнюю апробацию в программном комплексе DISAN/LOCATOR¹; он применяется также в автономных локаторах повреждений разных производителей.

Двухстороннее наблюдение многопроводной системы разнообразит набор критериев повреждения и позволяет усложнить модели повреждения с тем, чтобы отразить встречающиеся, пусть и нечасто, сложные виды коротких замыканий². В работе установлено соответствие между моделями и подходящим для каждого случая набором критериев повреждения. В проведённом исследовании использовались представления об имитационных и алгоритмических моделях наблюдаемого объекта³.

3.1 Короткие замыкания в одном месте без обрыва проводов.

Предполагается, что n -проводная система, наблюдаемая на подстанциях П1 и П2, состоит из m однородных участков; на одном из них произошло короткое замыкание (рисунок 3.1а). Пусть k – номер предположительно повреждённого участка. Предположение проверяется с помощью алгоритмической модели, в которой две стороны системы эквивалентизируются относительно k -го участка n -полюсниками M_s и M_r (рисунок 3.1б), \underline{V}_{sk} – матрица обратной передачи первого из них, \underline{A}_{rk} – матрица прямой передачи второго. Обозначим \underline{V}_{ss} и \underline{V}_{rr} векторы наблюдаемых величин, \underline{V}_{sk} и \underline{V}_{rk} – векторы напряжений и токов на границах k -го участка:

$$\underline{V}_{ss} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{ss} \\ -\underline{I}_{ss} \end{bmatrix}, \underline{V}_{rr} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{rr} \\ -\underline{I}_{rr} \end{bmatrix}, \underline{V}_{sk} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{sk} \\ -\underline{I}_{sk} \end{bmatrix}, \underline{V}_{rk} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{rk} \\ -\underline{I}_{rk} \end{bmatrix}.$$

¹ 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.

² Лямец Ю.Я., Воронов П.И. Локация повреждений многопроводной сети при двухстороннем наблюдении // Изв. РАН. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 96-107.

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

В принятых обозначениях

$$\underline{V}_{sk} = \underline{B}_{sk} \underline{V}_{ss}, \tag{3.1}$$

$$\underline{V}_{rk} = \underline{A}_{rk} \underline{V}_{rr}. \tag{3.2}$$

Будем учитывать распределённую ёмкость на всех предположительно неповреждённых участках, а модель k -го участка построим с учётом только продольных сопротивлений (рисунок 3.1в).

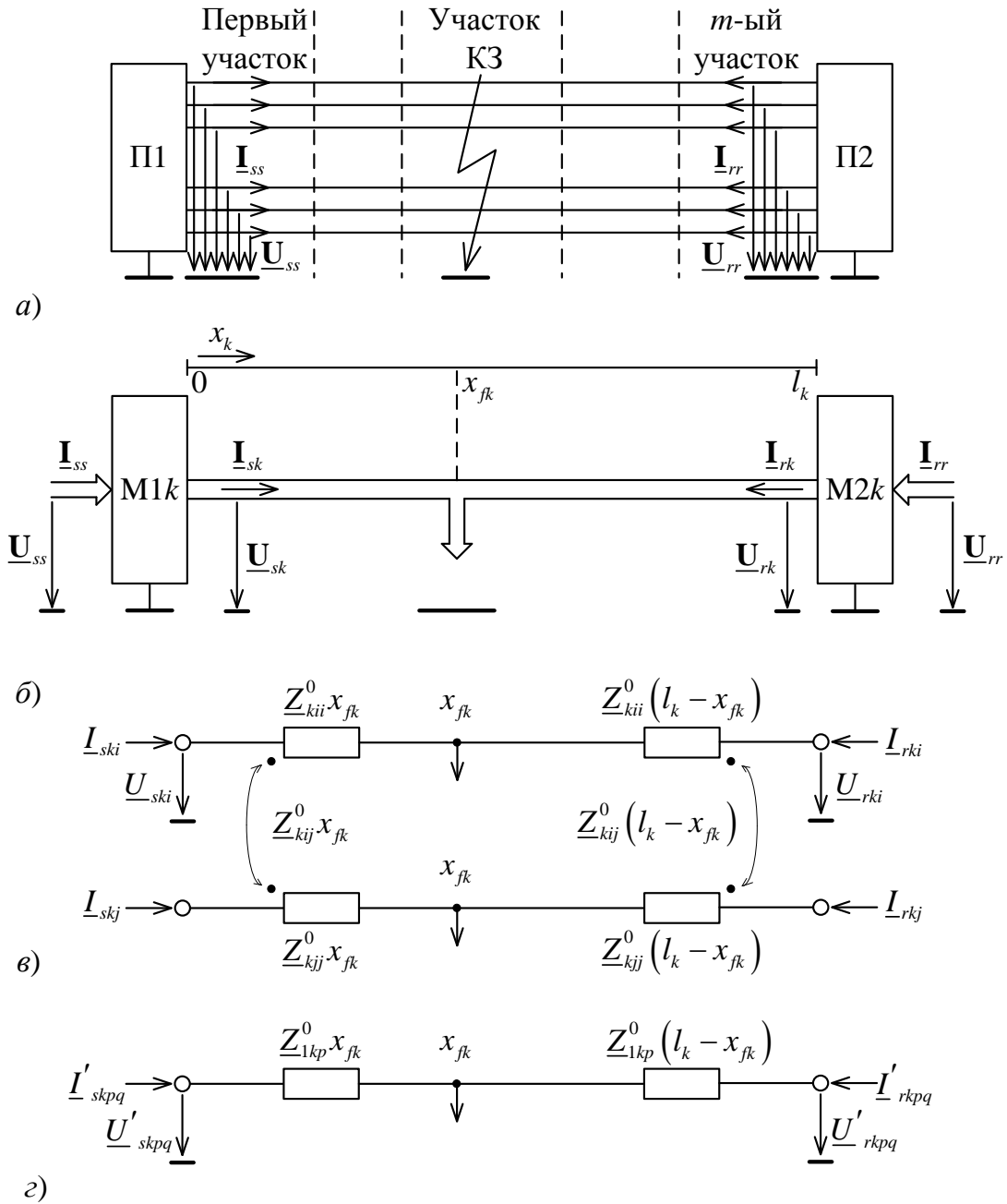


Рисунок 3.1 – Модель многопроводной системы в режиме короткого замыкания
 а – имитационная; б – алгоритмическая с предположительно повреждённым k -ым участком; в, г – i -го провода k -го участка в фазных координатах (в) и в базисе безнулевых составляющих (г)

Из описания неповреждённого контура i -го провода (рисунок 3.1в), составленного в фазных координатах, определяется комплексная величина

$$\underline{x}_{fk}^{(i)} = \frac{\underline{U}_{ski} - \underline{U}_{rki} + \underline{U}_{rki}^0 l_k}{\underline{U}_{ski}^0 + \underline{U}_{rki}^0}, \quad (3.3)$$

$$\underline{U}_{ski}^0 = \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{kij}^0 \underline{I}_{skj}, \quad (3.4)$$

$$\underline{U}_{rki}^0 = \sum_{j=1}^n \underline{Z}_{kij}^0 \underline{I}_{rkj}, \quad (3.5)$$

где \underline{Z}_{kii}^0 – собственное удельное сопротивление i -го провода, \underline{Z}_{kij}^0 – взаимные удельные сопротивления i -го и j -го проводов, l_k – длина k -го участка.

В идеальном случае, если предположение о повреждении k -го участка верно, то по крайней мере в повреждённых проводах должно выполняться условие

$$\arg \underline{x}_{fk}^{(i)} \rightarrow 0, \quad (3.6)$$

и тогда координата места повреждения получит оценку

$$\hat{x}_{fk}^{(i)} = \text{mod } \underline{x}_{fk}^{(i)} \approx \text{Re } \underline{x}_{fk}^{(i)}. \quad (3.7)$$

Предположение о том, что на k -ом участке все входящие в состав сети трёхфазные линии электропередачи симметричны, вносит заметное упрощение. Пусть p – номер одной из линий, $q = A, B, C$ – обозначение любой из фаз. Фазные величины симметричной линии представляют собой наложение центрированной (безнулевой) и нулевой составляющих¹. Если \underline{V} – общее обозначение тока или напряжения, а безнулевая составляющая отмечена штрихом, то

$$\underline{V}_{kpq} = \underline{V}'_{kpq} + \underline{V}_{kp0}. \quad (3.8)$$

Безнулевые составляющие трёх фаз связаны соотношением

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

$$\underline{V}'_{kpA} + \underline{V}'_{kpB} + \underline{V}'_{kpC} = 0; \quad (3.9)$$

независимы в таком базисе описания только двух фаз из трёх. Существенно, что безнулевые составляющие объединяют в себе прямую и обратную последовательности, в связи с чем в данном базисе модель одной фазы p -ой линии содержит удельные сопротивления \underline{Z}_{1kp}^0 прямой последовательности и не имеет электромагнитной связи с другими проводами (рисунок 3.1г). Из описания неповреждённого контура модели по рисунку 3.1г вытекает формула комплексной величины

$$\underline{x}_{fk}^{(pq)} = \frac{\underline{U}'_{skpq} - \underline{U}'_{rkpq} + \underline{Z}_{1kp}^0 \underline{I}'_{rkpq}}{\underline{Z}_{1kp}^0 (\underline{I}'_{skpq} + \underline{I}'_{rkpq})}, \quad (3.10)$$

более простая, чем (3.3)-(3.5). Величина $\underline{x}_{fk}^{(pq)}$ используется аналогично $\underline{x}_{fk}^{(i)}$ – формулы (3.6) и (3.7).

Разнообразные критерии локации повреждений проиллюстрируем на примере имитационной модели в виде трёхфазной воздушной линии электропередачи напряжением 500 кВ с двухсторонним питанием (рисунок 3.2, таблица 3.1).

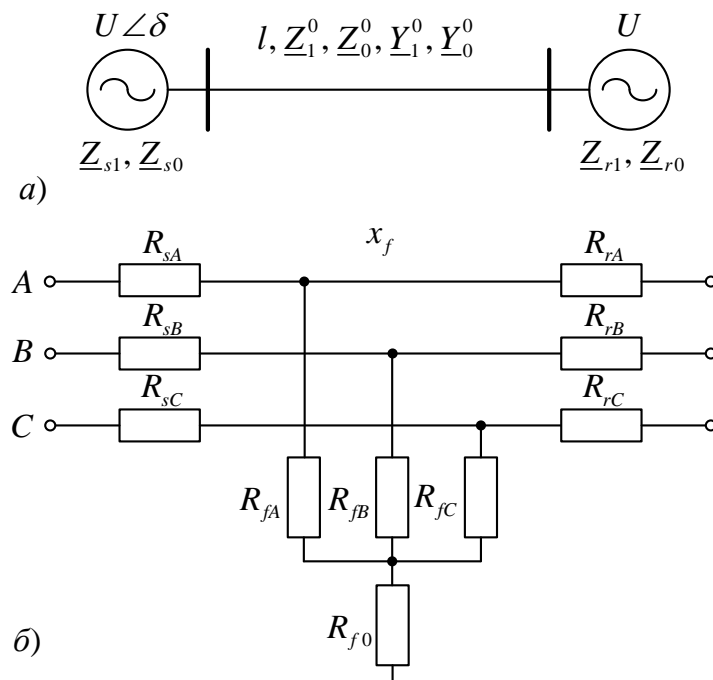


Рисунок 3.2 – Имитационная модель системы (а) и модель повреждения (б)

Таблица 3.1 – Параметры имитационной модели

Параметр	Значение
Длина ВЛ l , км	100
Угол передачи δ , °	10
Удельное сопротивление прямой последовательности \underline{Z}_1^0 , Ом/км	0,0314+j0,307
Удельное сопротивление нулевой последовательности \underline{Z}_0^0 , Ом/км	0,21+j1,21
Удельная ёмкостная проводимость прямой последовательности \underline{Y}_1^0 , мкСм/км	3,6
Удельная ёмкостная проводимость нулевой последовательности \underline{Y}_0^0 , мкСм/км	2,2
Сопротивление подстанции П1 прямой последовательности \underline{Z}_{s1} , Ом	30∠88°
Сопротивление подстанции П1 нулевой последовательности \underline{Z}_{s0} , Ом	45∠88°
Сопротивление подстанции П2 прямой последовательности \underline{Z}_{r1} , Ом	90∠86°
Сопротивление подстанции П2 нулевой последовательности \underline{Z}_{r0} , Ом	108∠86°

Различные аварийные режимы воспроизводились в модели повреждения, представленной на рисунке 3.2б. Изменение аварийного режима достигается путём вариации сопротивлений, входящих в модель рисунка 3.2б, которые могут изменяться в пределах от нуля до бесконечности. В таблице 3.2 представлены значения сопротивлений модели в зависимости от вида повреждения.

В таблице 3.3 представлены результаты расчёта расстояния до места повреждения и переходного сопротивления при различных видах короткого замыкания по формуле (3.3) в зависимости от длины участка, на котором предполагается короткое замыкание.

Место повреждения во всех примерах принималось равным 50 км, а все переходные сопротивления в месте короткого замыкания принимались равными 30 Ом: при $K_A^{(1)}$: $R_{fA} + R_{f0} = 30$ Ом и при $K_{AB}^{(2)}$: $R_{fA} + R_{fB} = 30$ Ом. Процедура локализации носила итерационный характер. Первоначальный участок охватывал всю линию; затем участки, сокращаясь, локализовались в окрестности найденной оценки расстояния до места короткого замыкания.

Таблица 3.2 – Значения сопротивлений модели в зависимости от вида повреждения

Вид повреждения	R_{sA}	R_{rA}	R_{fA}	R_{sB}	R_{rB}	R_{fB}	R_{sC}	R_{rC}	R_{fC}	R_{f0}
Однофазное КЗ фазы А $K_A^{(1)}$	0	0	R_{fA}	0	0	∞	0	0	∞	R_{f0}
Междуфазное КЗ фаз А и В $K_{AB}^{(2)}$	0	0	R_{fA}	0	0	R_{fB}	0	0	∞	∞
Двухфазное КЗ фаз А и В на землю $K_{AB}^{(1,1)}$	0	0	R_{fA}	0	0	R_{fB}	0	0	∞	R_{f0}
Трёхфазное КЗ $K^{(3)}$	0	0	R_{fA}	0	0	R_{fB}	0	0	R_{fC}	–
Обрыв фазы А с падением провода	0	∞	R_{fA}	0	0	∞	0	0	∞	R_{f0}

Таблица 3.3 – Результаты определения места повреждения и оценивания переходного сопротивления

Участок, км	$K_A^{(1)}$		$K_{AB}^{(1,1)}$				$K_{AB}^{(2)}$		$K^{(3)}$	
	\hat{x}_f	$\hat{R}_{fA} + \hat{R}_{f0}$	\hat{x}_{fA}	\hat{x}_{fB}	$\hat{R}_{fA}, \hat{R}_{fB}$	$\hat{R}_{0fA}, \hat{R}_{0fB}$	\hat{x}_f	\hat{R}_f	\hat{x}_f	\hat{R}_f
0...100	50,02	30,59	50,02	50,03	29,75 30,24	30,83 29,17	50,02	31,64	50,02	30,08
45...55	50,00	30,04	50,00	50,00	29,97 30,01	30,07 29,90	50,00	30,15	50,00	30,00
49...51	50,00	30,01	50,00	50,00	29,99 30,01	30,00 29,98	50,00	30,03	50,00	30,00

При наличии несинхронизированных наблюдений предложена искусственная синхронизация величин с помощью оптимизационной процедуры¹.

3.2 Энергетический критерий

Критерии повреждения, оставшиеся неустребованными алгоритмами (3.3) или (3.10), призваны в данном случае подтвердить или подставить под сомнение полученный результат. Предположим, что x_f – координата места предполагаемого повреждения, \underline{U}_{ff} – вектор фазных напряжений в этом месте, \underline{I}_{ff} – вектор токов короткого замыкания (рисунок 3.3). Комплексная мощность повреждения определяется соотношением

$$\underline{S}_f(x_f) = P_f(x_f) + jQ_f(x_f) = \underline{U}_{ff}^T \underline{I}_{ff}^* \quad (3.11)$$

¹ Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двухстороннем наблюдении // Патент РФ №2492493, БИ №25, 2013.

где "T" – символ транспонирования.

Энергетический критерий выражается условиями

$$Q_f(x_f) \rightarrow 0, \quad (3.12)$$

$$P_f(x_f) > (-\varepsilon), \quad (3.13)$$

где ε – малая положительная величина. Многополюсник M1f преобразует входной вектор \underline{V}_{ss} в векторы токов и напряжений $\underline{I}_{sf}(x_f)$, $\underline{U}_{sf}(x_f)$, подводимых к месту предполагаемого повреждения с одной стороны, а многополюсник M2f преобразует другой входной вектор \underline{V}_{rr} в векторы $\underline{I}_{rf}(l-x_f)$, $\underline{U}_{rf}(l-x_f)$, подводимые к этому месту с другой стороны. Если, как ранее в (3.1), (3.2), $\underline{B}_{sf}(x_f)$, $\underline{A}_{rf}(l-x_f)$ – матрицы обратной и прямой передачи этих многополюсников,

$$\underline{V}_{sf}(x_f) = \begin{bmatrix} \underline{U}_{sf}(x_f) \\ -\underline{I}_{sf}(x_f) \end{bmatrix},$$

$$\underline{V}_{rf}(l-x_f) = \begin{bmatrix} \underline{U}_{rf}(l-x_f) \\ -\underline{I}_{rf}(l-x_f) \end{bmatrix},$$

то

$$\underline{V}_{sf}(x_f) = \underline{B}_{sf}(x_f) \underline{V}_{ss}, \quad (3.14)$$

$$\underline{V}_{rf}(x_f) = \underline{A}_{rf}(l-x_f) \underline{V}_{rr}. \quad (3.15)$$

В отличие от вектора токов повреждения, который определяется токами обеих сторон

$$\underline{I}_{ff}(x_f) = \underline{I}_{sf}(x_f) + \underline{I}_{rf}(l-x_f), \quad (3.16)$$

вектор напряжений $\underline{U}_{ff}(x_f)$ может быть получен только при условии практического совпадения векторов разных сторон

$$\underline{U}_{sf}(x_f) \approx \underline{U}_{rf}(l-x_f), \quad (3.17)$$

и тогда

$$\underline{U}_{ff}(x_f) = 0,5(\underline{U}_{sf}(x_f) + \underline{U}_{rf}(l - x_f)). \quad (3.18)$$

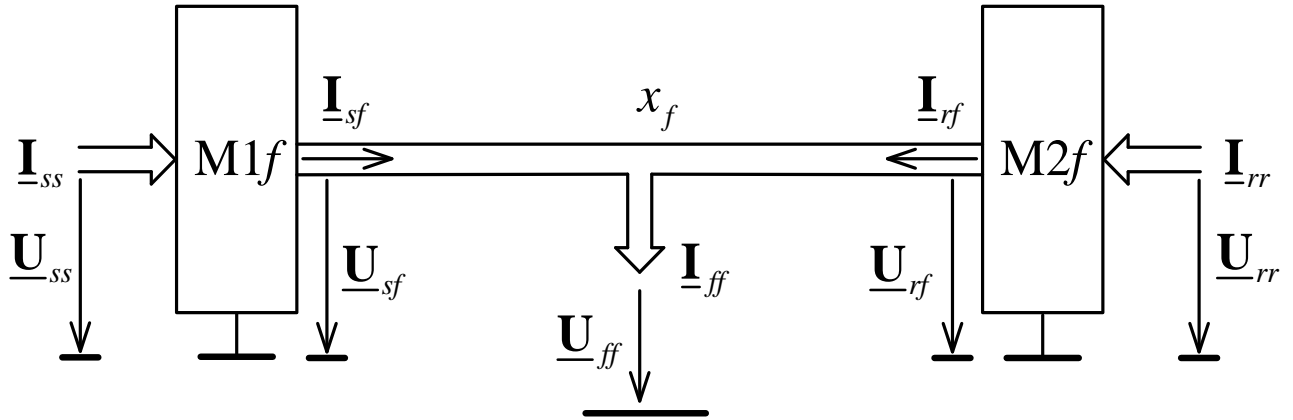


Рисунок 3.3 – Алгоритмическая модель системы с обособленным местом предполагаемого повреждения

На первый взгляд может показаться, что для определения мощности $\underline{S}_f(x_f)$ не обязательно привлекать формулу (3.11), а также (3.16) и (3.18) с проверкой условия (3.17). Возможен упрощённый подход, который можно истолковать как применение двухстороннего энергетического критерия. Мощности, поступающие в место повреждения с разных сторон, определяются отдельно:

$$\underline{S}_{sf}(x_f) = \underline{U}_{sf}^T(x_f) \underline{I}_{sf}^*(x_f), \quad (3.19)$$

$$\underline{S}_{rf}(l - x_f) = \underline{U}_{rf}^T(l - x_f) \underline{I}_{rf}^*(l - x_f) \quad (3.20)$$

с последующим суммированием

$$\underline{S}_f(x_f) = \underline{S}_{sf}(x_f) + \underline{S}_{rf}(l - x_f). \quad (3.21)$$

Однако такой подход в случае обычного короткого замыкания уступает в общности алгоритму на основе формулы (3.11) с единым напряжением \underline{U}_{ff} . В диссертации приведён пример, иллюстрирующий данное положение.

На рисунке 3.4 представлены результаты оценивания расстояния до места повреждения с помощью энергетического критерия для имитационной модели по

рисунку 3.2 с параметрами из таблицы 3.1 при разных видах короткого замыкания.

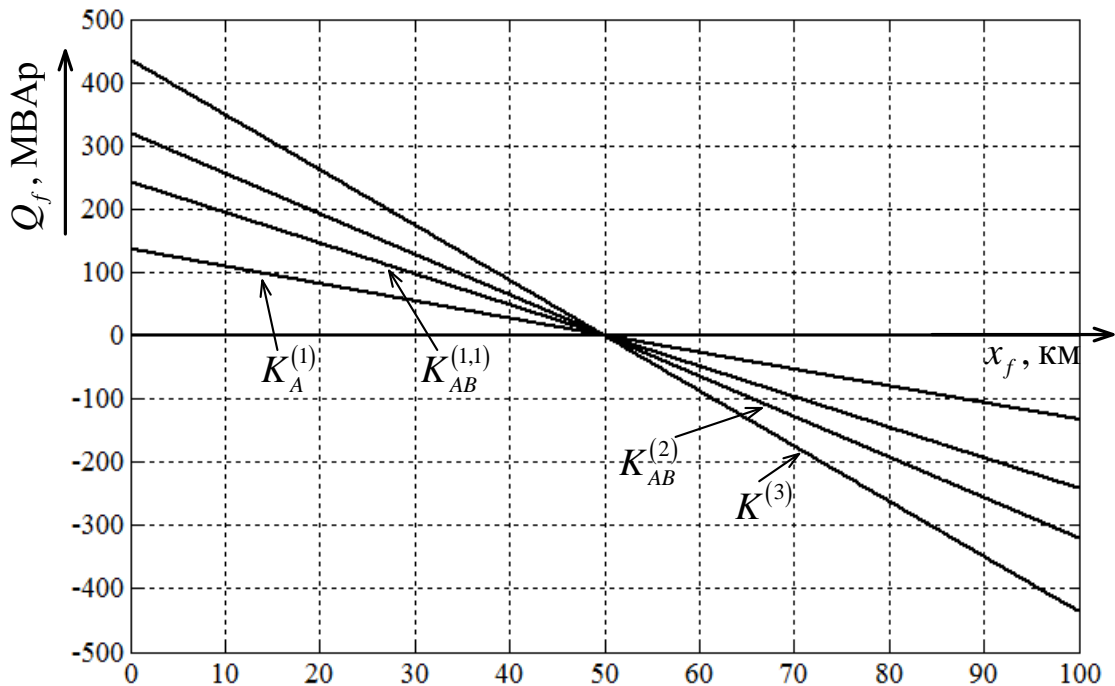


Рисунок 3.4 – Результаты определения места короткого замыкания при помощи энергетического критерия

Неполнота двухсторонней модификации энергетического критерия.

Рассмотрим пример, в котором двухсторонняя модификация энергетического критерия оказывается несостоятельной. В середине линии без потерь с двухсторонним питанием произошло трёхфазное короткое замыкание (рисунок 3.5а). Напряжения обеих сторон одинаковы по величине: $\underline{U}_{ss} = U \angle \psi_s$, $\underline{U}_{rr} = U \angle \psi_r$. Кроме них наблюдаются токи

$$\underline{I}_{ss} = (2U \angle \psi_s) / jX^0 l,$$

$$\underline{I}_{rr} = (2U \angle \psi_r) / jX^0 l,$$

где X^0 – удельное индуктивное сопротивление линии. Алгоритмическая модель электропередачи составляется для места предполагаемого повреждения x_f (рисунок 3.5б), в котором прогнозируются величины $\underline{I}_{sf}(x_f) = \underline{I}_{ss}$, $\underline{I}_{rf}(x_f) = \underline{I}_{rr}$,

$$\underline{U}_{sf}(x_f) = (1 - 2x_f/l) U \angle \psi_s, \quad (3.22)$$

$$\underline{U}_{rf}(x_f) = (1 - 2(l - x_f)/l) U \angle \psi_s, \quad (3.23)$$

а по ним определяются реактивные мощности

$$Q_{sf}(x_f) = (2U^2 / X^0 l)(1 - 2x_f/l), \quad Q_{rf}(x_f) = -Q_{sf}(x_f).$$

Как видим, реактивная мощность предполагаемого повреждения $Q_{ff}(x_f) = Q_{rf}(x_f) + Q_{sf}(x_f)$ получается нулевой в любом месте x_f . Несостоятельность данной модификации энергетического критерия, проявившаяся в приведённом случае, не означает неполноты общего энергетического критерия в интерпретации (3.11), (3.12). Равенство $U_{sf}(x_f) = \underline{U}_{rf}(x_f)$, определяющее координату x_f и модуль напряжения $U_{ff}(x_f)$, даёт с учётом зависимостей (3.22), (3.23) единственные значения: $x_f = l/2$, $U_{ff}(x_f) = 0$.

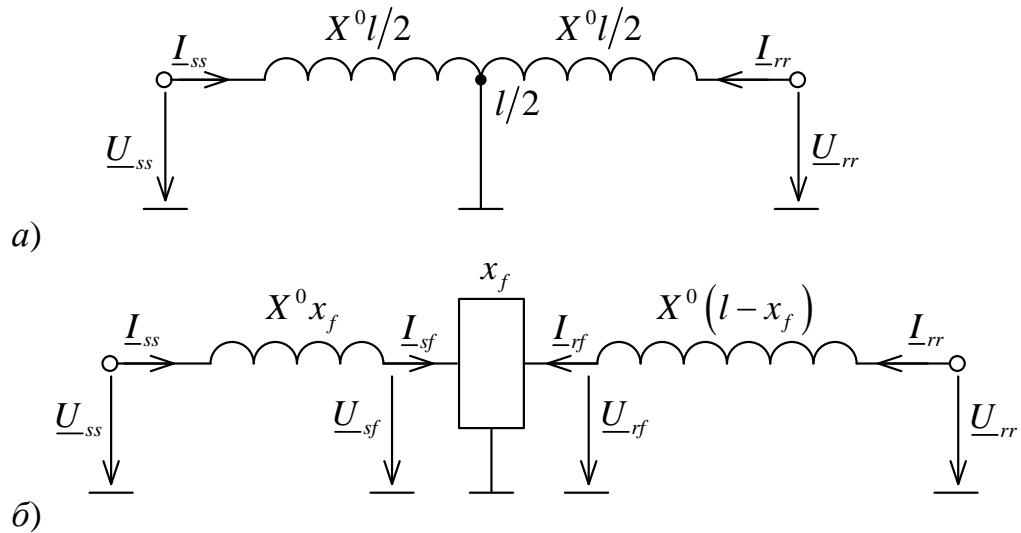


Рисунок 3.5 – Имитационная модель линии при металлическом коротком замыкании (а) и соответствующая алгоритмическая модель (б)

3.3 Короткое замыкание с обрывом фазы.

Ситуация, возникающая при падении на землю оборванных проводов, моделируется на рисунке 3.6. Энергетический критерий в интерпретации, представленной соотношениями (3.19)-(3.21), (3.12), (3.13) инвариантен к виду резистивной модели, но даваемая им оценка координаты места повреждения нуждается в подтверждении. Для определения продольных сопротивлений модели R_{si} , R_{ri} достаточно воспользоваться уравнением контура каждого провода, откуда

$$R_{si} = \eta \left[(U_{s,re} - U_{r,re}) I_{r,im} - (U_{s,im} - U_{r,im}) I_{r,re} \right],$$

$$R_{ri} = \eta \left[(U_{s,re} - U_{r,re}) I_{s,im} - (U_{s,im} - U_{r,im}) I_{s,re} \right],$$

$$\eta = 1 / (I_{s,re} I_{r,im} - I_{s,im} I_{r,re}).$$

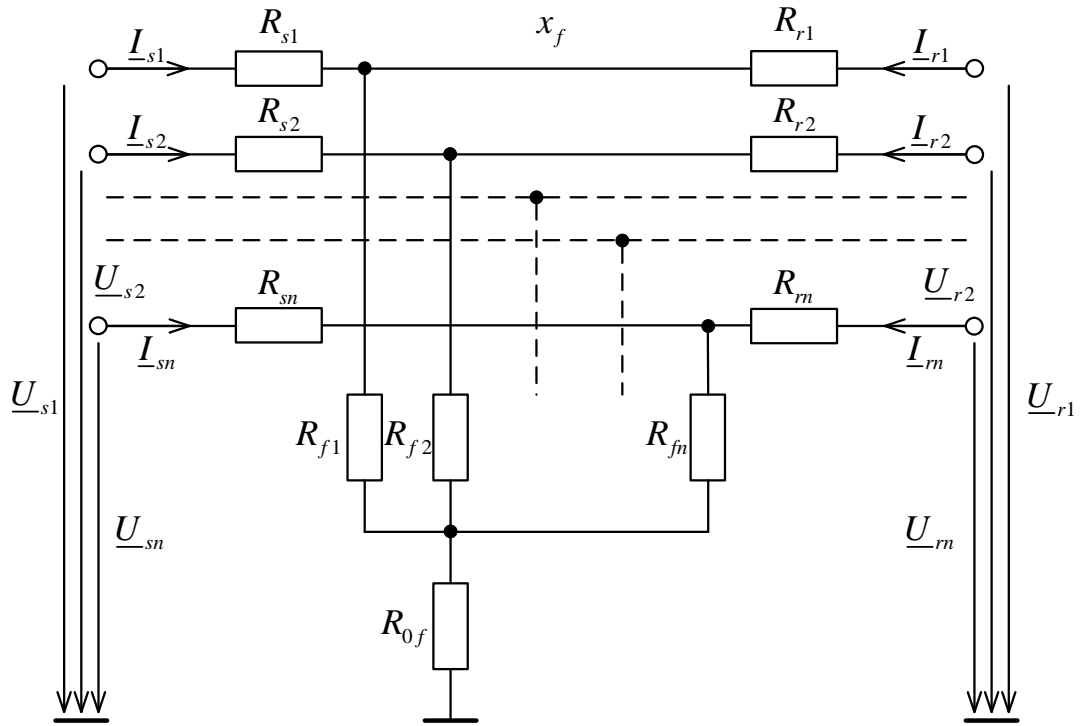


Рисунок 3.6 – Модель предполагаемого короткого замыкания с обрывом проводов

3.4 Критерий невязки

Оценивание параметров модели повреждения служит важным дополнением задач локации и селекции повреждённой многопроводной системы. Располагая векторами тока и напряжения в месте предполагаемого повреждения, можно не только оценить каждый элемент модели, но и воспользоваться невязкой уравнений модели в качестве критерия локации. Резистивная модель описывается вещественным матричным уравнением: так для схемы по рисунку 3.6, где с целью упрощения в обозначениях токов, напряжений и сопротивлений опущены индексы повреждения f ,

$$\mathbf{IR} = \mathbf{U}, \quad (3.24)$$

где

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{s1} & R_{r1} & R_{f1} & R_{s2} & R_{r2} & R_{f2} & \dots & R_{f0} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_{s1,re} & U_{s1,im} & U_{r1,re} & U_{r1,im} & U_{s2,re} & U_{s2,im} & U_{r2,re} & U_{r2,im} & \dots & U_{sn,re} & U_{sn,im} & U_{m,re} & U_{m,im} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{s1,re} & 0 & I_{s1,re} + I_{r1,re} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,re} \\ I_{s1,im} & 0 & I_{s1,im} + I_{r1,im} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,im} \\ 0 & I_{r1,re} & I_{s1,re} + I_{r1,re} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,re} \\ 0 & I_{r1,im} & I_{s1,im} + I_{r1,im} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,im} \\ 0 & 0 & 0 & I_{s2,re} & 0 & I_{s2,re} + I_{r2,re} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,re} \\ 0 & 0 & 0 & I_{s2,im} & 0 & I_{s2,im} + I_{r2,im} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,im} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{r2,re} & I_{s2,re} + I_{r2,re} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,re} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{r2,im} & I_{s2,im} + I_{r2,im} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma,im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \end{bmatrix},$$

$$\underline{I}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \underline{I}_i.$$

Переопределённая система (3.21), состоящая из $4n$ уравнений с $3n + 1$ неизвестными, даёт оценку переходных сопротивлений

$$\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{I}^{\dagger} \mathbf{U}, \quad (3.25)$$

где \mathbf{I}^{\dagger} – матрица, псевдообратная относительно матрицы \mathbf{I} , а затем и величину невязки

$$\sigma^2 = (\mathbf{U} - \mathbf{I}\hat{\mathbf{R}})^T (\mathbf{U} - \mathbf{I}\hat{\mathbf{R}}). \quad (3.26)$$

Рассмотрим случай, когда в имитационной модели по рисунку 3.2 с параметрами из таблицы 3.1 происходит обрыв фазы A с падением провода на землю с переходным сопротивлением в 30 Ом. На рисунке 3.7а представлен результат оценки расстояния до места повреждения при помощи энергетического критерия, а на рисунке 3.7б – при помощи критерия невязки.

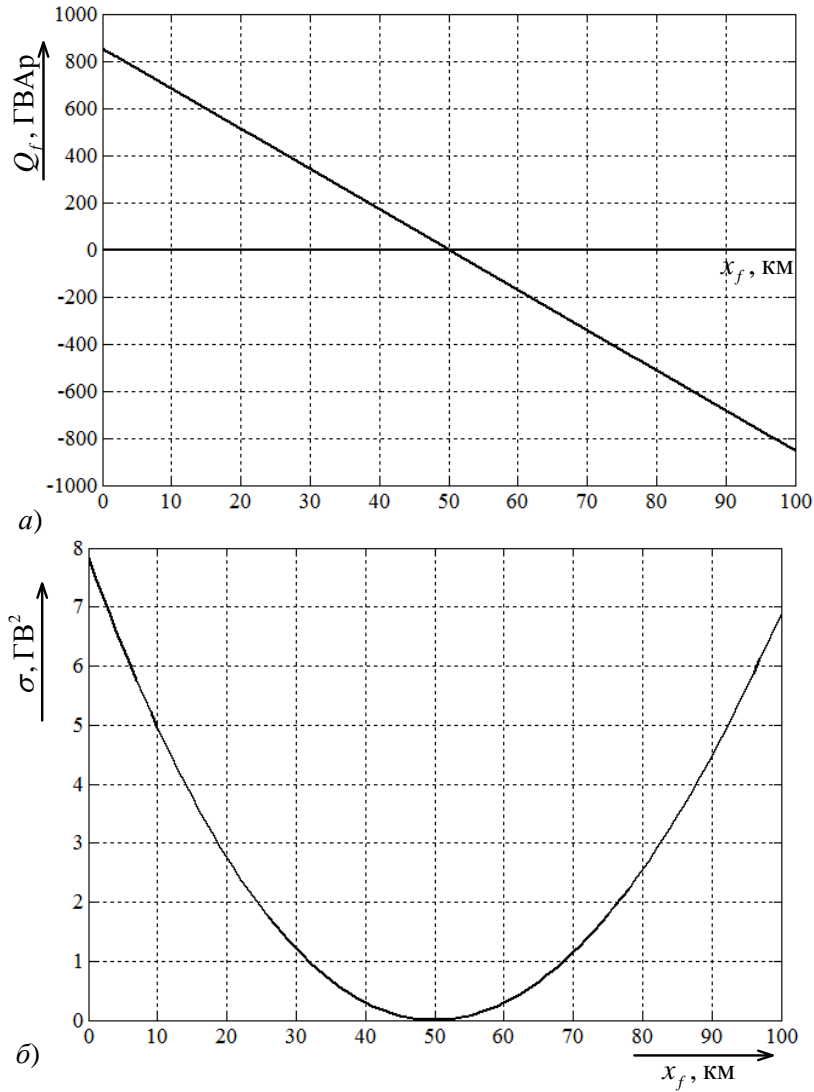


Рисунок 3.7 – Результаты определения места замыкания с обрывом провода
 а – энергетический критерий; б – критерий невязки

В таблице 3.4 представлены результаты оценки сопротивлений модели рисунка 3.2б в рассматриваемом случае.

Таблица 3.4 – Результаты оценки сопротивлений модели

\hat{R}_{sA} , Ом	\hat{R}_{rA} , Ом	$\hat{R}_{fA} + \hat{R}_{f0}$, Ом	$\hat{R}_{sB} + \hat{R}_{rB}$, Ом	$\hat{R}_{sC} + \hat{R}_{rC}$, Ом	$\hat{R}_{fB} + \hat{R}_{f0}$, Ом	$\hat{R}_{fC} + \hat{R}_{f0}$, Ом
0	∞	30	0	0	∞	∞

3.5 Двойные замыкания

Двухстороннее наблюдение добавляет информацию в таком объеме, что его достаточно для распознавания замыканий в двух местах электропередачи, правда, без обрыва проводов. Алгоритмическая модель электропередачи состоит в этом

случае из трёх многополюсников, двух крайних и одного центрального (рисунок 3.8a). Пусть x_{fa} и x_{fb} – места двух предполагаемых замыканий. Подводимые к ним напряжения и токи определяются уравнениями соответственно обратной и прямой передачи

$$\underline{\mathbf{V}}_{sa} = \underline{\mathbf{B}}_{sa} \underline{\mathbf{V}}_{ss},$$

$$\underline{\mathbf{V}}_{sb} = \underline{\mathbf{A}}_{rb} \underline{\mathbf{V}}_{rr},$$

где $\underline{\mathbf{B}}_{sa}$ – матрица обратной передачи участка электропередачи от $x = 0$ до x_{fa} , $\underline{\mathbf{A}}_{rb}$ – матрица прямой передачи участка от x_{fb} до $x = l$. Что же касается центрального участка, то здесь будет востребована матрица его многополюсника формы $\underline{\mathbf{Y}}$:

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{xa} \\ -\underline{\mathbf{I}}_{xb} \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{Y}} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{sa} \\ \underline{\mathbf{U}}_{rb} \end{bmatrix},$$

вслед за чем определяются токи обоих предполагаемых повреждений

$$\underline{\mathbf{I}}_{fa} = \underline{\mathbf{I}}_{sa} - \underline{\mathbf{I}}_{xa},$$

$$\underline{\mathbf{I}}_{fb} = \underline{\mathbf{I}}_{xb} + \underline{\mathbf{I}}_{rb}$$

и их мощности

$$\underline{S}_{fa} = P_{fa} + jQ_{fa} = \underline{\mathbf{U}}_{sa}^T \underline{\mathbf{I}}_{fa}^*,$$

$$\underline{S}_{fb} = P_{fb} + jQ_{fb} = \underline{\mathbf{U}}_{rb}^T \underline{\mathbf{I}}_{fb}^*.$$

Энергетический критерий в данном случае определяет значения координат повреждений из решения двух уравнений с двумя неизвестными

$$Q_{fa}(x_{fa}, x_{fb}) = 0, \quad (3.27)$$

$$Q_{fb}(x_{fa}, x_{fb}) = 0 \quad (3.28)$$

при условии, что

$$P_{fa}(x_{fa}, x_{fb}) > (-\varepsilon), \quad (3.29)$$

$$P_{fb}(x_{fa}, x_{fb}) > (-\varepsilon). \quad (3.30)$$

В случае неоднозначности решения системы уравнений (3.27), (3.28) при выполнении условий (3.29), (3.30) в каждом из вариантов решения, энергетический критерий должен быть подтверждён критерием невязки с оценкой переходных сопротивлений в обоих местах повреждения.

Если многопроводная сеть состоит из h симметричных линий, то переход от фазных координат к базису безнулевых составляющих и нулевой последовательности приводит к m двухпроводным моделям для безнулевых составляющих и к h -полюсной модели величин нулевой последовательности. Одиночная линия без учёта распределённой ёмкости моделируется схемами по рисунку 3.8, откуда

$$\underline{I}'_{xpq} = \frac{\underline{U}'_{spq} - \underline{U}'_{rpq} + \underline{Z}_1^0 \underline{I}'_{rpq} - \underline{Z}_1^0 (\underline{I}'_{spq} x_{fa} - \underline{I}'_{rpq} x_{fb})}{\underline{Z}_1^0 (x_{fb} - x_{fa})}, \quad (3.31)$$

$$\underline{I}'_{xpq} = \frac{\underline{U}_{s0} - \underline{U}_{r0} + \underline{Z}_0^0 \underline{I}_{r0} - \underline{Z}_0^0 (\underline{I}_{s0} x_{fa} - \underline{I}_{r0} x_{fb})}{\underline{Z}_0^0 (x_{fb} - x_{fa})}, \quad (3.32)$$

чем вполне определяются токи повреждения \underline{I}'_{apq} , \underline{I}'_{bpq} , \underline{I}_{a0} , \underline{I}_{b0} и соответствующие комплексные мощности

$$\underline{S}_{fa} = \sum_{q=A,B,C} \underline{U}'_{aq} \underline{I}'_{aq}^* + 3 \underline{U}_{aq0} \underline{I}_{aq0}^*, \quad (3.33)$$

$$\underline{S}_{fb} = \sum_{q=A,B,C} \underline{U}'_{bq} \underline{I}'_{bq}^* + 3 \underline{U}_{bq0} \underline{I}_{bq0}^*. \quad (3.34)$$

Выражения (3.31)-(3.34) дают наиболее простую из всех возможных реализаций энергетического критерия (3.27)-(3.30).

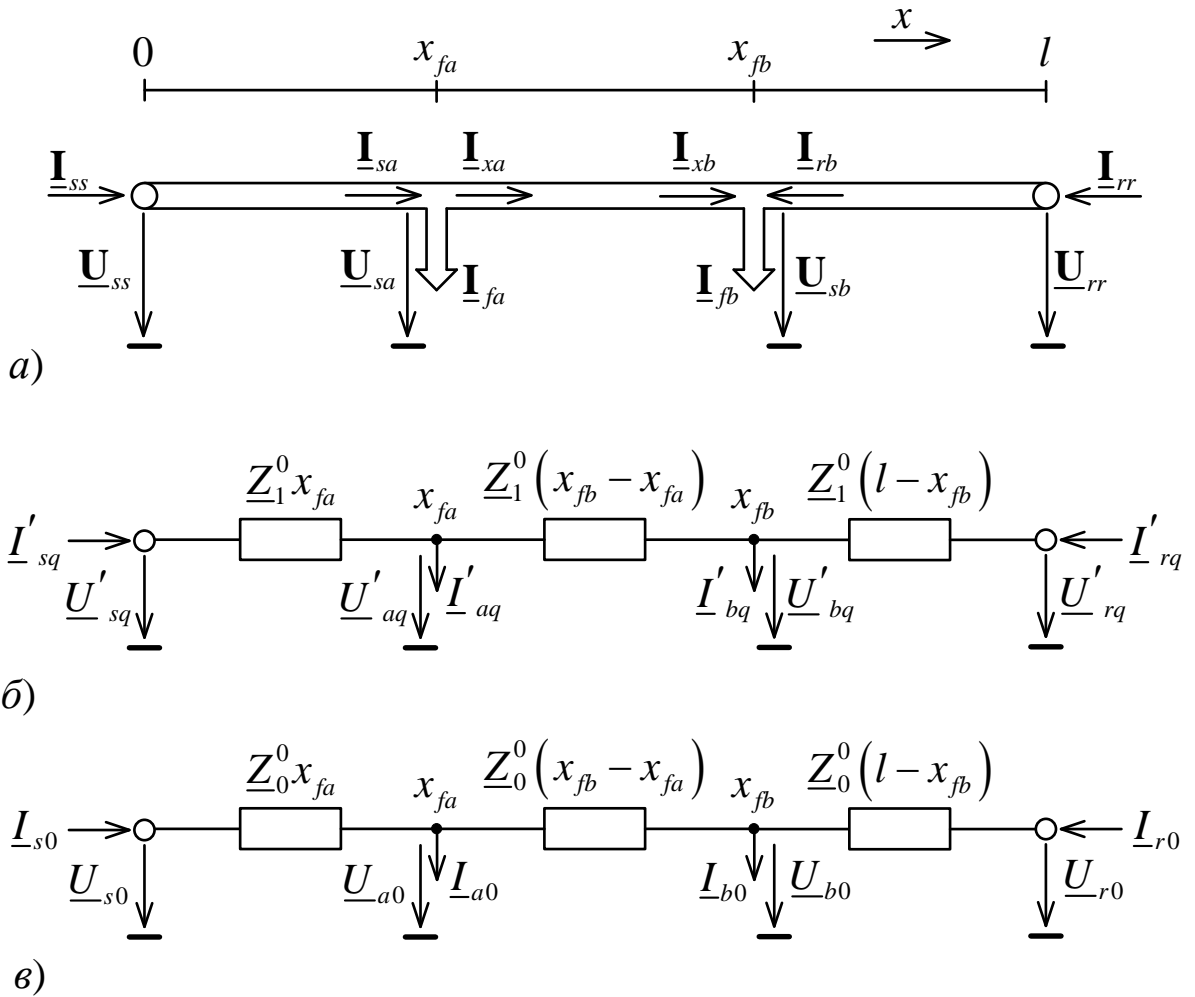


Рисунок 3.8 – Алгоритмическая модель сети с двойным замыканием
a – в базисе фазных координат; *б* – в базисе безнулевых составляющих без учёта распределённой ёмкости;
в – нулевой последовательности для одиночной линии

Рассмотрим режим, когда в системе, представленной на рисунке 3.2, происходит двойное замыкание, в точках $x_{f1} = 40$ км и $x_{f2} = 60$ км, при этом в точке x_{f1} происходит однофазное короткое замыкание фазы А через переходное сопротивление в 10 Ом, а в точке x_{f2} – междуфазное короткое замыкание фаз В и С через переходное сопротивление в 15 Ом. На рисунке 3.9 представлен результат определения мест двойного замыкания. Как видим, обе реактивные мощности Q_{f1} и Q_{f2} принимают нулевые значения при условии, что $x_{f1} = 40$ км и $x_{f2} = 60$ км.

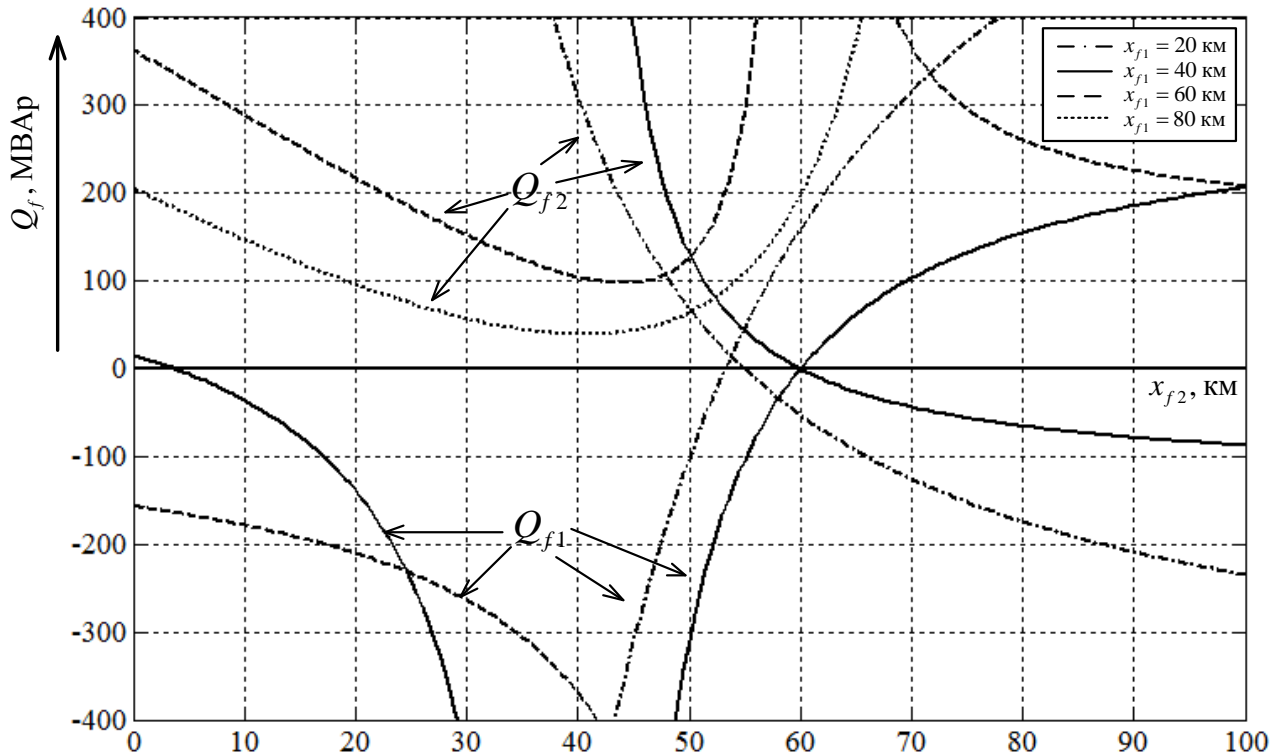


Рисунок 3.9 – Результаты определения мест двойного замыкания

3.6 Применение нормальных и локальных токов

Совместно с Беяниным А.А. были обнаружены новые информационные составляющие, названные нормальными и локальными токами¹. Применение этих составляющих позволяет реализовать новые алгоритмы локации повреждений. В ходе выполнения диссертационного исследования были получены патенты РФ на изобретение №2542331 и №2542337. Аналогичные исследования проводят китайские учёные, причём их устройства релейной защит уже внедрены в эксплуатацию на линиях электропередачи ультравысокого напряжения².

Существует задача кардинального упрощения и унифицирования процедуры защиты и локации линии электропередачи при двухстороннем наблюдении по сравнению с односторонним наблюдением. Задача обусловлена тем, что информационная база двухстороннего наблюдения несравненно шире и мощнее, чем одностороннего. На решение этой задачи нацелен способ

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 Дя-Ли и др. Новый принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения // Электричество. – 2015. – №2. – С. 17-21.

определения места повреждения линии электропередачи¹. Однако отойти от включения в модель линии резистивной модели повреждения в этом способе всё же не удалось. В результате не удалось отойти от трёхфазной модели сети и трёхфазной в общем случае резистивной модели повреждения, которая вынужденно варьируется в зависимости от вида замыкания. Кроме того, упрощение достигается за счёт выделения участка электропередачи, моделируемого без учёта распределённой ёмкости, что сужает возможности способа в применении к фидерам – электропередачам с изолированной нейтралью, где процессы, протекающие при замыкании на землю, существенно зависят от ёмкости фидера относительно земли.

Необходимо разработать такой способ определения места замыкания линии электропередачи, который был бы инвариантен к виду замыкания (однофазное, междуфазное, двухфазное на землю, трёхфазное, в том числе земляные и несимметричные), ограничивался простейшими двухпроводными моделями электропередачи, не требовал привлечения резистивной модели повреждения, был применим как к сетям с глухо заземлённой нейтралью, так и к фидерам, разумеется, при условии их двухстороннего наблюдения.

Поставленная цель достигается тем, что в известном способе определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем её наблюдении простейшие двухпроводные модели электропередачи используются по-новому, что и даёт желаемый положительный эффект. К известным операциям относится фиксация (регистрация) фазных напряжений и токов на обеих сторонах линии, определение их безнулевых (центрированных) составляющих, составление для контролируемой линии двухпроводной модели прямой последовательности и её тиражирование для каждой фазы. Фиксируются величины как текущего, так и предшествовавшего ему процессов. В конечном счёте, востребованы аварийные

¹ Способ определения места повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении // Патент РФ №2492565, БИ №25, 2013.

составляющие фазных напряжения и токов, требующие для своего определения информации о сменяющихся друг друга процессах.

Новыми являются операции с моделью электропередачи. В модели поочередно создают два различных режима – пассивный и активный – с тем, чтобы выделить те части аварийных составляющих наблюдаемых токов, которые создаются их неизвестным источником, действующим в неизвестном месте электропередачи. Весьма важно, что эти операции универсальны, и в равной степени подходят для распознавания любых видов замыканий. В пассивном режиме на входы обеих сторон двухпроводной модели подают безнулевые напряжения, наблюдаемые в аварийном режиме защищаемой линии электропередачи. Фиксируют реакции модели – нормальные токи. В активном режиме входы обеих сторон модели шунтируют. Локальные токи, которые протекают через зашунтированные входы, определяют как разности наблюдаемых и нормальных токов. Соотношение между локальными токами противоположных сторон модели любой фазы несёт информацию о месте замыкания линии электропередачи, что и используется в предлагаемом способе.

Приведено конкретное выражение координаты места замыкания для однородной короткой линии (не более 50 км), а также соотношение, определяющее координату замыкания в однородной линии любой протяжённости и, наконец, подобное соотношение для неоднородной линии, что представляет собой самый общий случай, правда, при операциях с комплексами электрических величин. В случае применения на линии сверхбыстродействующих выключателей времени наблюдения может оказаться недостаточно для уверенного выделения синусоидальных компонентов. На этот случай, а также, учитывая возможность применения данного способа для построения быстродействующей защиты абсолютной селективности, предлагается вариант поиска координаты места повреждения по мгновенным значениям третьих токов на сторонах линии.

На рисунке А.1 представлена схема линии электропередачи высокого напряжения, на которой в неизвестном месте x_f произошло замыкание произвольного вида. Линия наблюдается на обеих концевых подстанциях.

Наблюдаемые величины – напряжения u_{sv} , u_{rv} и токи i_{sv} , i_{rv} , где s и r – индексы сторон линии; $v = A, B, C$ – обозначение произвольной фазы.

На рисунке А.2 приведена двухпроводная модель прямой последовательности, составленная для произвольной фазы v . В модели действуют безнулевые аварийные составляющие напряжений и токов, которым присвоен первый номер. Кроме того, безнулевые составляющие отмечены штрихами: u'_{sv1} , i'_{sv1} , u'_{rv1} , i'_{rv1} . В двухпроводной модели действует неизвестный источник тока i'_{fv} . Место действия x_f также неизвестно.

Рисунок А.3 показывает локальную двухпроводную модель, которая может быть выделена из общей структуры рисунка А.2 благодаря результатам наблюдения. На рисунке А.4 локальная модель показана в пассивном режиме без неизвестного источника i'_{fv} в месте замыкания. На рисунке А.5 локальная модель переведена в активный режим. В ней по-прежнему неизвестны ток и напряжение источника в месте замыкания, но известны реакции на него – локальные токи i'_{sv3} и i'_{rv3} .

Рисунки А.6-А.12 иллюстрируют операции, характеризующие предлагаемый способ. На рисунке А.6 показано формирование первых напряжений из аварийных составляющих фазных напряжений начала линии. На рисунке А.7 – то же в отношении токов. Четвёртый провод на выходе показан пунктиром, так как сумма трёх безнулевых составляющих тождественно равна нулю. Рисунки А.8 и А.9 относятся к концу линии, а в остальном повторяют схемы рисунков А.6 и А.7.

На рисунке А.10 показана двухпроводная модель электропередачи произвольного вида. На рисунке А.11 эта же модель представлена в пассивном режиме, а на рисунке А.12 – в активном. Рисунки А.13-А.15 иллюстрируют заключительную операцию определения координаты места повреждения x_f . Простейший вариант отражает модель рисунка А.13. Более сложный, с учётом всех распределённых параметров показан на рисунке А.14. Наиболее общий пример неоднородной модели показан на рисунке А.15.

Кроме собственно линии 1 в состав электропередачи входят концевые подстанции 2 и 3, в которых указаны источники 4 и 5, чтобы подчеркнуть тот факт, что наблюдаются фазные напряжения и тока сначала предшествующего режима, а затем текущего режима короткого замыкания. Из них определяются аварийные составляющие. Если $u_{\text{пд}}(t)$ – предшествующее напряжение, где $t < t_{\text{кз}}$, а $u_{\text{тк}}(t)$ – текущее напряжение, то аварийная составляющая представляет собой разность

$$u_{\text{ав}}(t) = u_{\text{тк}}(t) - \hat{u}_{\text{пд}}(t), t \geq t_{\text{кз}} \quad (3.35)$$

где $\hat{u}_{\text{пд}}(t)$ – экстраполяция предшествующего процесса на время после смены режима¹, выполняемая фильтрами аварийных составляющих². Составляющие нулевой последовательности u_{s0} , i_{s0} , u_{r0} , i_{r0} выделяются соответствующими измерительными трансформаторами либо определяются как средние арифметические фазных величин. Безнулевые аварийные составляющие получают, устраняя нулевую последовательность в фазных величинах

$$u'_v(t) = u_{v\text{ав}}(t) - u_0(t), v = A, B, C. \quad (3.36)$$

В двухпроводных моделях прямой последовательности, составленных для безнулевых аварийных составляющих, в неизвестном месте x_f действует единственный неизвестный источник тока i'_{fv} (рисунок А.2). В моделях подстанций 2, 3 источники 4, 5 устраняются, что отражено коротками 6,7. На входе и выходе каждой двухпроводной модели прямой последовательности наблюдаются напряжение и ток u'_{sv1} , i'_{sv1} , u'_{rv1} , i'_{rv1} . Как следствие, модель линии 8 приобретает независимость от моделей подстанций (рисунок А.3), а наблюдаемые напряжения могут быть представлены в виде ЭДС 9 и 10, равных u'_{sv1} и u'_{rv1} . Индексы 1 в схемах рисунка А.2 и А.3 относятся к наблюдаемым величинам. Модель по рисунку А.4 выведена в пассивный режим: по сравнению с общей моделью по рисунку А.3 в ней не предусмотрено повреждение, и источник

¹ Формирователь доаварийной слагаемой тока (напряжения) // Авторское свидетельство СССР №1817153, 1991.

² Способ выделения аварийной слагаемой тока короткого замыкания // Патент РФ №2035815, 1992.

аварийных составляющих i'_{fv} устранён. Наблюдаемые напряжения, т.е. ЭДС 9, 10, являются в данном случае источниками пассивного режима. Нормальные токи i'_{sv2} , i'_{rv2} представляют собой реакции на эти источники. Модель по рисунку А.5 с шунтами 11, 12 на её входах находится в активном режиме. В неё возвращён отсутствовавший в пассивном режиме неизвестный источник i'_{fv} , и именно в ней осуществляется поиск места повреждения x_f благодаря тому, что известны локальные токи i'_{sv3} , i'_{rv3} на её зашунтированных входах – реакции на неизвестный источник тока.

Предлагаемый способ реализуется формирователем 13 безнулевых аварийных составляющих напряжений первой стороны линии, формирователем 14 безнулевых аварийных составляющих токов той же стороны, аналогичными преобразователями 15, 16 напряжений и токов другой стороны. Произвольная двухпроводная модель прямой последовательности 17 на рисунке А.10 показана без каких-либо источников. Необходимо отметить, что её второй провод 18 не следует путать с реальной землёй, так как он является общим проводом только для безнулевых составляющих. На рисунке А.11 модель 17 подключена к внешним ЭДС 9, 10, т.е. находится в пассивном режиме, а на рисунке А.12 она находится в активном режиме, когда определяется координата места замыкания x_f .

Предлагаемый способ реализуется операцией (3.35) определения аварийных составляющих электрических величин, операцией (3.36) формирования безнулевых составляющих. Последняя совершается блоками 13-16. Двухпроводные модели 17 каждой фазы $\nu = A, B, C$ функционируют автономно. Модели работают при нулевых начальных условиях, так как все подключаемые к ней источники являются аварийными составляющими.

Принципиально важное значение имеют операции включения модели на ЭДС 9, 10 – источники наблюдаемых напряжений, фиксации нормальных токов i'_{sv2} , i'_{rv2} – реакции модели на эти источники (схемы рисунка А.4, А.11) и определения разностных локальных токов

$$i'_{sv3}(t) = i'_{sv1}(t) - i'_{sv2}(t), \quad i'_{rv3}(t) = i'_{rv1}(t) - i'_{rv2}(t), \quad (3.37)$$

которые в свою очередь являются реакцией на источник аварийных составляющих, создающий в неизвестном месте x_f ток $i'_{fv}(t)$ и напряжение $u'_{fv}(t)$. Данный способ не предполагает обязательного поиска этого источника. В первую очередь определяется место повреждения. Затем уже может быть определён и ток $i'_{fv}(t)$, что имеет определённый смысл, если требуется подтвердить результаты предварительно проведённой фазовой селекции, т.е. определения повреждённых проводов. Например, при однофазном замыкании фазы А

$$i'_{fA} = -i_{fB}/2, i_{fB} = i_{fC}.$$

Рассмотрим соотношения между локальными токами i'_{sv3} и i'_{rv3} и искомой координатой места замыкания x_f в моделях различной сложности. В короткой линии электропередачи можно пренебречь влиянием распределённой ёмкости (рисунок А.13). В однородной двухпроводной модели при этом выполняется равенство

$$u'_{fv} = -\left(R_1^0 i'_{sv3} + L_1^0 \frac{di'_{sv3}}{dt}\right)x_f = -\left(R_1^0 i'_{rv3} + L_1^0 \frac{di'_{rv3}}{dt}\right)(l - x_f).$$

Для определения координаты x_f достаточно выполнить операции с локальными токами i'_{sv3} , i'_{rv3} в соответствии с выражением

$$x_f = \frac{l}{1 + \frac{R_1^0 i'_{sv3} + L_1^0 \frac{di'_{sv3}}{dt}}{R_1^0 i'_{rv3} + L_1^0 \frac{di'_{rv3}}{dt}}}. \quad (3.38)$$

В данном случае предлагаемый способ обладает предельно высоким быстродействием и может быть использован для построения защиты линии абсолютной селективности с функцией локации замыкания.

В линии произвольной длины, когда необходимо учесть распределённую ёмкость C_1^0 , проще перейти к комплексным напряжениям и токам \underline{U} , \underline{I} , выделяя с

помощью фильтров ортогональных составляющих¹ синусоидальные компоненты наблюдаемых величин (рисунок А.14)². Комплексы связаны в однородной двухпроводной модели соотношением

$$\underline{U}_{f1} = -\underline{Z}_{c1} \underline{I}_{sv3} \operatorname{sh} \gamma_{\underline{1}} x_f = -\underline{Z}_{c1} \underline{I}_{rv3} \operatorname{sh} \gamma_{\underline{1}} (l - x_f),$$

где \underline{Z}_{c1} и $\gamma_{\underline{1}}$ – характеристическое сопротивление и коэффициент распространения прямой последовательности. Отсюда следует выражение для определения координаты x_f

$$\frac{\operatorname{sh} \gamma_{\underline{1}} x_f}{\operatorname{sh} \gamma_{\underline{1}} (l - x_f)} = \frac{\underline{I}'_{rv3}}{\underline{I}'_{sv3}}, \quad (3.39)$$

$$\gamma_{\underline{1}} = \sqrt{\underline{Z}_{\underline{1}}^0 \underline{Y}_{\underline{1}}^0}, \quad \underline{Z}_{\underline{1}}^0 = R_1^0 + j\omega L_1^0, \quad \underline{Y}_{\underline{1}}^0 = j\omega C_1^0.$$

Наконец, в случае неоднородной модели¹⁷ используются комплексные взаимные проводимости $\underline{Y}_{fs1}(x_f)$, $\underline{Y}_{fr1}(l - x_f)$ между токами \underline{I}'_{sv3} , \underline{I}'_{rv3} и напряжением \underline{U}'_{fv} в месте x_f (рисунок А.15):

$$\frac{\underline{Y}_{fs1}(x_f)}{\underline{Y}_{fr1}(l - x_f)} = \frac{\underline{I}'_{sv3}}{\underline{I}'_{rv3}}. \quad (3.40)$$

В модели мгновенных значений напряжений и токов с учётом распределённой ёмкости также возможно определение координаты x_f . Соответствующее соотношение вытекает из разностных уравнений длинной линии³:

$$b_{s1}^2 i'_{sv3}(t - \tau_{s1}) - a_{s1}^2 i'_{sv3}(t + \tau_{s1}) = b_{r1}^2 i'_{rv3}(t - \tau_{r1}) - a_{r1}^2 i'_{rv3}(t + \tau_{r1}), \quad (3.41)$$

где

$$a_{s1} = R_{B1} + R_1^0 x_f / 2, \quad b_{s1} = R_{B1} - R_1^0 x_f / 2,$$

¹ Устройство для выделения ортогональных составляющих электрических величин // Авторское свидетельство СССР №1744733, 1989.

² Способ выделения ортогональных составляющих тока короткого замыкания // Патент РФ №2030052, 1992.

³ Караев Р.И., Лямец Ю.Я. О применении разностных уравнений длинной линии // Электричество, 1972, №11, С. 28-36.

$$a_{r1} = R_{B1} + R_1^0 (l - x_f) / 2, \quad b_{r1} = R_{B1} - R_1^0 (l - x_f) / 2,$$

$R_{B1} = \sqrt{L_1^0 / C_1^0}$ – волновое сопротивление прямой последовательности,

$\tau_{s1} = x_f \sqrt{L_1^0 C_1^0}$ – время пробега волны вдоль отрезка модели прямой

последовательности длиной x_f , $\tau_{r1} = (l - x_f) \sqrt{L_1^0 C_1^0}$ – то же вдоль отрезка $l - x_f$.

Равенство (3.41) специфично. Дело в том, что информация о замыкании поступает в начало и в конце линии в разное время, допустим, в моменты t_{0s} и t_{0r} соответственно. Поэтому левая часть равенства берётся в дискретные моменты времени $t_{0s} + k\Delta t$, а правая часть – в моменты $t_{0r} + k\Delta t$, где Δt – интервал дискретизации наблюдаемого процесса, k – номер интервала. Замыкание фиксируется в том месте x_f , где система уравнений, вытекающая из равенства (3.41), даёт наименьшую невязку:

$$\sigma^2 = \sum_{k=0}^{k_{\text{кон}}} \left[b_{s1}^2 i'_{sv3}(t_{0s} + k\Delta t - \tau_{s1}) - a_{s1}^2 i'_{sv3}(t_{0s} + k\Delta t + \tau_{s1}) - \right. \\ \left. - b_{r1}^2 i'_{rv3}(t_{0r} + k\Delta t - \tau_{r1}) + a_{r1}^2 i'_{rv3}(t_{0r} + k\Delta t + \tau_{r1}) \right]^2 \rightarrow \min, \quad (3.42)$$

где $k_{\text{кон}}$ – последний момент наблюдения.

Соотношения (3.38), (3.39), (3.40), (3.42), несмотря на различие в подходах, всего лишь определяют заключительные операции, выделяющие информацию о месте замыкания линии электропередачи, доставляемую токами двухпроводной модели в её втором, активном режиме. Заключительные операции обладают разной сложностью, но сам способ отличается простотой и универсальностью.

3.7 Выводы

1. В отличие от одностороннего наблюдения электропередачи двухстороннее наблюдение позволяет проводить локацию повреждений без привлечения информации о предшествующем режиме.

2. Имеют самостоятельное значение три критерия повреждения, простейший основан на балансе уравнений модели неповреждённой части сети, более сложный энергетический критерий исходит из резистивности повреждения,

наиболее общий критерий невязки даёт оценку элементов модели повреждения и самой модели в целом.

3. Короткое замыкание в единственном месте без обрыва проводов распознаётся без участия составляющих нулевой последовательности электрических величин. Основную роль в распознавании замыкания с обрывом играет критерий невязки и вспомогательную роль – энергетический критерий. При распознавании двойного замыкания энергетический критерий выходит на передний план.

4. Применение новых информационных составляющих, получаемых в полностью наблюдаемой системе и названных нормальными и локальными токами, позволяет унифицировать процедуру локации повреждений.

ГЛАВА 4 ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Приведённые в диссертации алгоритмы релейной защиты и локации повреждений используют комплексы токов и напряжений основной частоты, выделяемых с помощью различных цифровых фильтров. Цифровая обработка процессов, протекающих в электрических системах, ставит основной целью разложение наблюдаемых электрических величин на информационные составляющие¹: аварийные², симметричные, ортогональные, спектральные³. В информационной теории релейной защиты все задачи цифровой обработки сигналов разделены на три задачи: на задачу фильтрации (выделение ортогональных составляющих), задачу сегментации⁴ (разделение наблюдаемого сигнала на интервалы однородности) и задачу селекции⁵ (выбор типа процесса – короткое замыкание, бросок намагничивающего тока и так далее)⁶.

Исследователи проявляют большую активность по разработке различных алгоритмов цифровой обработки процессов. Предложены различные алгоритмы фильтрации сигналов, например, с применением структурных моделей⁷, отстройки от нелинейных искажений, вызванных насыщением измерительных трансформаторов тока⁸, алгоритмы подавления аperiodической составляющей¹ и так далее.

¹ Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Арсентьев А.П. Адаптивная цифровая обработка входных величин релейной защиты // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп., 1988, №6, С. 51-59.

² Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Фильтры информационных составляющих тока и напряжения электрической сети // Изв. РАН. Энергетика, 1995, №3, С. 174-189.

³ Ильин В.А., Лямец Ю.Я. Задачи и методы спектрального анализа переходных процессов в электрических сетях // Изв. РАН. Энергетика, 1997, №6, С. 46-62.

⁴ Романов Ю.В. Метод информационного анализа процессов в электрических системах в приложении к защитах генераторов и линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2009.

⁵ Зиновьев Д.В. Развитие теории информационного анализа процессов в электрических системах и ее приложение к релейной защите: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2009.

⁶ Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Зиновьев Д.В. Мониторинг процессов в электрической системе. Ч.1, 2 // Электричество. – 2006, №10, С. 2-10; №11, С. 2-10.

⁷ Антонов В.И., Наумов В.А., Фомин А.И. Эффективные структурные модели входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики // Электричество. – 2012. – №11. – С. 2-8.

⁸ Кужеков С.Л., Дегтярёв А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – №3. – С. 29-31.

Мощным методом выделения ортогональных составляющих является адаптивная фильтрация². Адаптивные фильтры способны за малый промежуток времени разложить сигнал на составляющие. Основным недостатком таких фильтров является то, что они сильно подвержены шумам. Для реализации адаптивной фильтрации необходимо решить задачу дешумизации входных аналоговых сигналов для релейной защиты.

В диссертации рассмотрены два способа дешумизации электрических процессов: сингулярный спектральный анализ и кратномасштабный анализ³.

4.1 Сингулярный спектральный анализ

Сингулярный анализ⁴ развивался с конца 60-х годов прошлого столетия как раздел вычислительной математики⁵, тесно связанный с теорией матриц⁶. Позднее выделилось отдельное направление; в отечественной литературе оно представлено методом под названием «Гусеница», а в зарубежной – как сингулярный спектральный анализ (SSA)⁷.

Сингулярный анализ для целей релейной защиты и автоматики применяется для адаптивной цифровой обработки тока короткого замыкания⁸. Он применён в разработке программного комплекса DISAN/LOCATOR⁹. Комплекс предназначен для обработки цифровых осциллограмм аварийных процессов и определения места повреждения линий электропередачи. Недавно появилось сообщение о новом применении сингулярных чисел – для формирования замеров

¹ Куликов А.Л., Фальшина В.А., Колобанов П.А. Алгоритмы подавления апериодической составляющей в аварийных токах // Электричество. – 2014. – №11. – С. 26-35.

² Лямец, Ю. Я. Адаптивные реле: теория и приложения к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем: дис. ... д-ра техн. наук. Научно-исслед. инст. электроэнергетики РФ, М., 1994.

³ Figueiredo M.B., Almeida A., Ribeiro B. Wavelet Decomposition and Singular Spectrum Analysis for Electrical Signal Denoising // Systems, Man, and Cybernetics. IEEE International Conference on. – 2011. – P. 3329-3334.

⁴ Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. – М.: Изд-во «Мир», 1980.

⁵ Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986.

⁶ Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990.

⁷ Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов. – Изд-во С.-Петербургского гос. ун-та, 2004.

⁸ Антонов В.И., Лямец Ю.Я. Разрешающая способность метода наименьших квадратов при оценивании основной гармоники тока короткого замыкания // Изв. вузов. Энергетика, 1990, №2, С. 48-51.

⁹ 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.

распознающего органа релейной защиты¹. Правда, здесь сингулярный анализ не играет самостоятельной роли, так как тесно переплетён с вейвлет-анализом и представлениями об энтропии получаемой информации. Представляется более перспективным построение на базе спектрального анализа легко реализуемых многомерных и адаптивных органов релейной защиты.

Применение сингулярного спектрального анализа позволяет разделить наблюдаемый процесс на составляющие. Предложен алгоритм выделения тренда в наблюдаемом процессе².

4.1.1 Постановка задачи

Сингулярный спектральный анализ оперирует отсчётами наблюдаемой величины, записываемыми в форме так называемой траекторной матрицы (матрица плана). Она принадлежит к типу ганкелевых матриц и обнаруживает явную связь между своими сингулярными числами и характером зафиксированного процесса³.

Имеется выборка из N отсчётов наблюдаемой величины: $i(k - N + 1) \dots i(k)$. Отсчёты записаны в дискретном времени $k = \text{ent}(t/\tau_d)$, где $\tau_d = 1/f_d$ – интервал дискретизации, f_d – частота дискретизации.

Составим траекторную матрицу $\mathbf{A}(k)$ размера $m \times n$

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} i(k - N + 1) & \dots & i(k - N + n) \\ i(k - N + 2) & \dots & i(k - N + n + 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ i(k - N + m) & \dots & i(k) \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

подметив, что

$$m + n = N + 1. \quad (4.2)$$

¹ He Z., Fu L., Lin S., Bo Z. Fault detection and classification in EHV transmission line based on wavelet singular entropy // IEEE Trans. Power Delivery, 2010, V. 25, №4, P. 2156-2163.

² Alexandrov T. A Method of Trend Extraction Using Singular Spectrum Analysis // REVSTAT – Statistical Journal. – 2009. – V.7. – №1. – P. 1-22.

³ Hassani H. Singular Spectrum Analysis: Methodology and Comparison // Journal of Data Science. – 2007. – №5. – P. 239-257.

Пусть $m \geq n$ и количество ненулевых сингулярных чисел $\sigma_p(k)$ матрицы $\mathbf{A}(k)$ равно n . Тогда сингулярное разложение этой матрицы состоит из n слагаемых $\mathbf{A}_p(k)$, каждое из которых связано с одним из сингулярных чисел

$$\mathbf{A}(k) = \sum_{p=1}^n \mathbf{A}_p(k) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{A}_p(k) = \sigma_p(k) \mathbf{u}_p(k) \mathbf{v}_p^T(k) \quad (4.4)$$

где $\mathbf{u}_p(k)$ и $\mathbf{v}_p^T(k)$ – ортонормированные векторы, $\mathbf{u}_p(k)$ – m -мерные, а $\mathbf{v}_p(k)$ – n -мерные.

Известно, что сингулярные числа положительны. Запишем их в порядке убывания: $\sigma_1(k) > \sigma_2(k) > \dots > \sigma_p(k) > \dots > \sigma_n(k)$. В каждой задаче, где они используются, существуют критерии, выделяющие из множества n сингулярных чисел подмножество q наибольших по величине, значимых для данной задачи. Отбросив $n - q$ незначительных чисел, понизим ранг матрицы $\mathbf{A}(k)$ до величины q и получим соответствующую оценку исходной матрицы

$$\hat{\mathbf{A}}(k) = \sum_{p=1}^q \mathbf{A}_p(k) = \mathbf{U}(k) \mathbf{S}(k) \mathbf{V}^T(k), \quad (4.5)$$

$$\mathbf{U}(k) = [\mathbf{u}_1(k), \dots, \mathbf{u}_q(k)], \quad \mathbf{V}(k) = [\mathbf{v}_1(k), \dots, \mathbf{v}_q(k)], \quad \mathbf{S}(k) = \text{diag}(\sigma_1(k), \dots, \sigma_q(k)),$$

где $\mathbf{U}(k)$ – матрица размера $m \times q$, а $\mathbf{V}(k)$ – размера $n \times q$, столбцы этих матриц – суть векторы $\mathbf{u}_p(k)$ и $\mathbf{v}_p(k)$ из формулы (4.4), $\mathbf{S}(k)$ – диагональная матрица значимых сингулярных чисел.

Матрица $\hat{\mathbf{A}}^+(k)$, псевдообратная по отношению к траекторной матрице $\hat{\mathbf{A}}(k)$, определяется по формуле, следующей из (4.4) и (4.5):

$$\hat{\mathbf{A}}^+(k) = \mathbf{V}(k) \mathbf{S}^{-1}(k) \mathbf{U}^T(k) = \sum_{p=1}^q \sigma_p^{-1}(k) \mathbf{v}_p(k) \mathbf{u}_p^T(k), \quad (4.6)$$

$$\mathbf{S}^{-1}(k) = \text{diag}(\sigma_1^{-1}(k), \dots, \sigma_q^{-1}(k)).$$

Каждой частичной матрице $\mathbf{A}_p(k)$ отвечает определённая часть последовательности отсчётов $i(k-N+1)\dots i(k)$ наблюдаемой величины. Преобразование $\mathbf{A}_p(k)$ в $\mathbf{i}_p(k)$ выполняется по методу диагонального усреднения¹.

Рассмотрим зависимость количества сингулярных чисел от составляющих сигнала. На рисунке 4.1 представлены сингулярные числа для различных процессов.

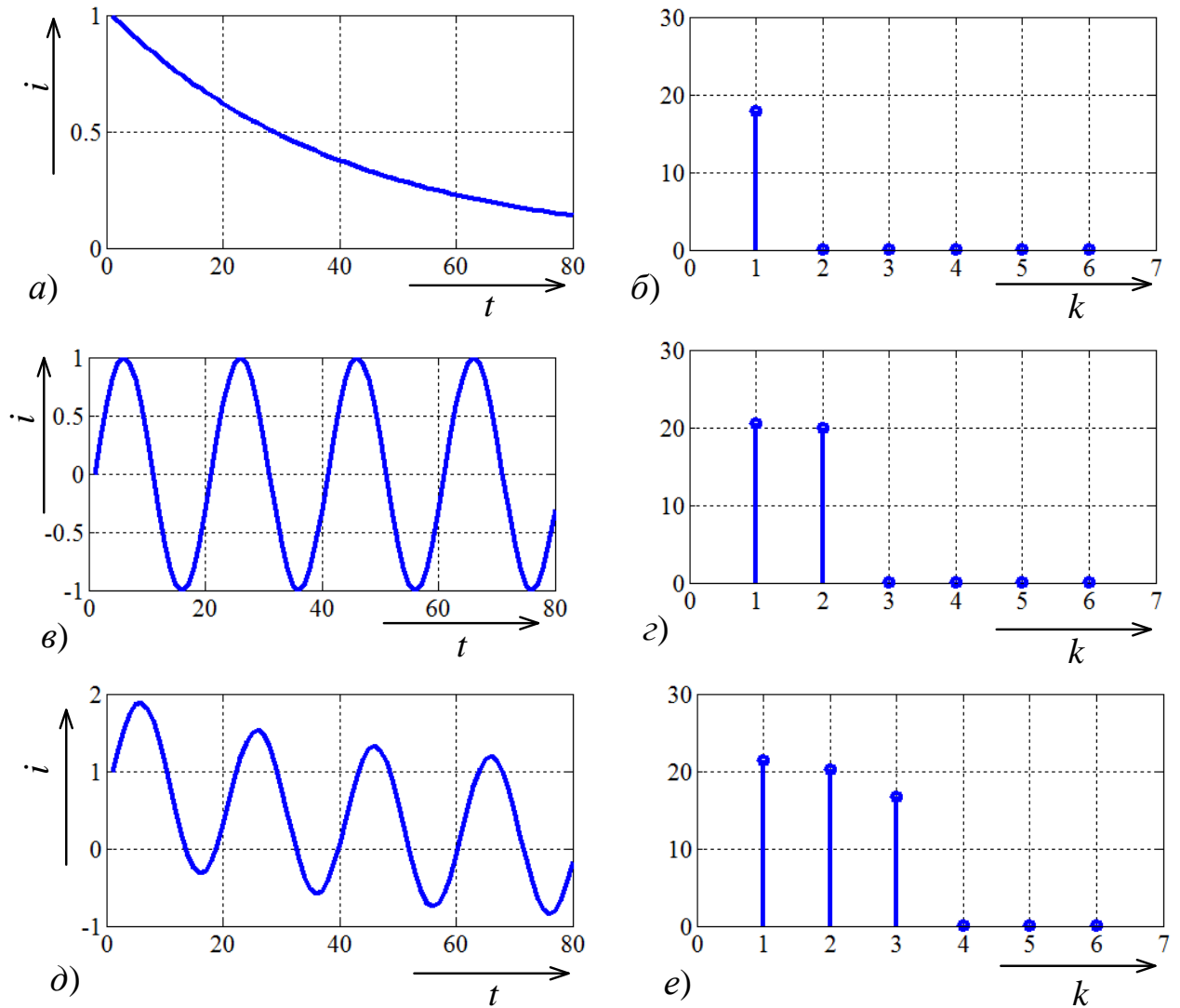


Рисунок 4.1 – Применение ССА к различным процессам: для экспоненциального сигнала (а), для синусоидального сигнала (б), для сигнала, содержащего периодическую и аperiodическую составляющую (в) и соответствующие сингулярные числа (б, г, е)

¹ Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов. – Изд-во С.-Петербургского гос. ун-та, 2004.

Сингулярный спектральный анализ применялся ко всему сигналу. Результаты показывают, что для экспоненциального сигнала существует только одно значимое сингулярное число, для синусоидального сигнала их два, а для сигнала, содержащего периодическую и аperiodическую составляющую их три. Такие результаты объясняются тем, что экспоненциальный сигнал является простейшим, в то время как синусоида является суммой двух комплексных экспонент (по формуле Эйлера) и содержит две простейшие составляющие.

На рисунке 4.2 показано применение ССА к нелинейно искажённому сигналу, получающемуся вследствие насыщения измерительных трансформаторов тока.

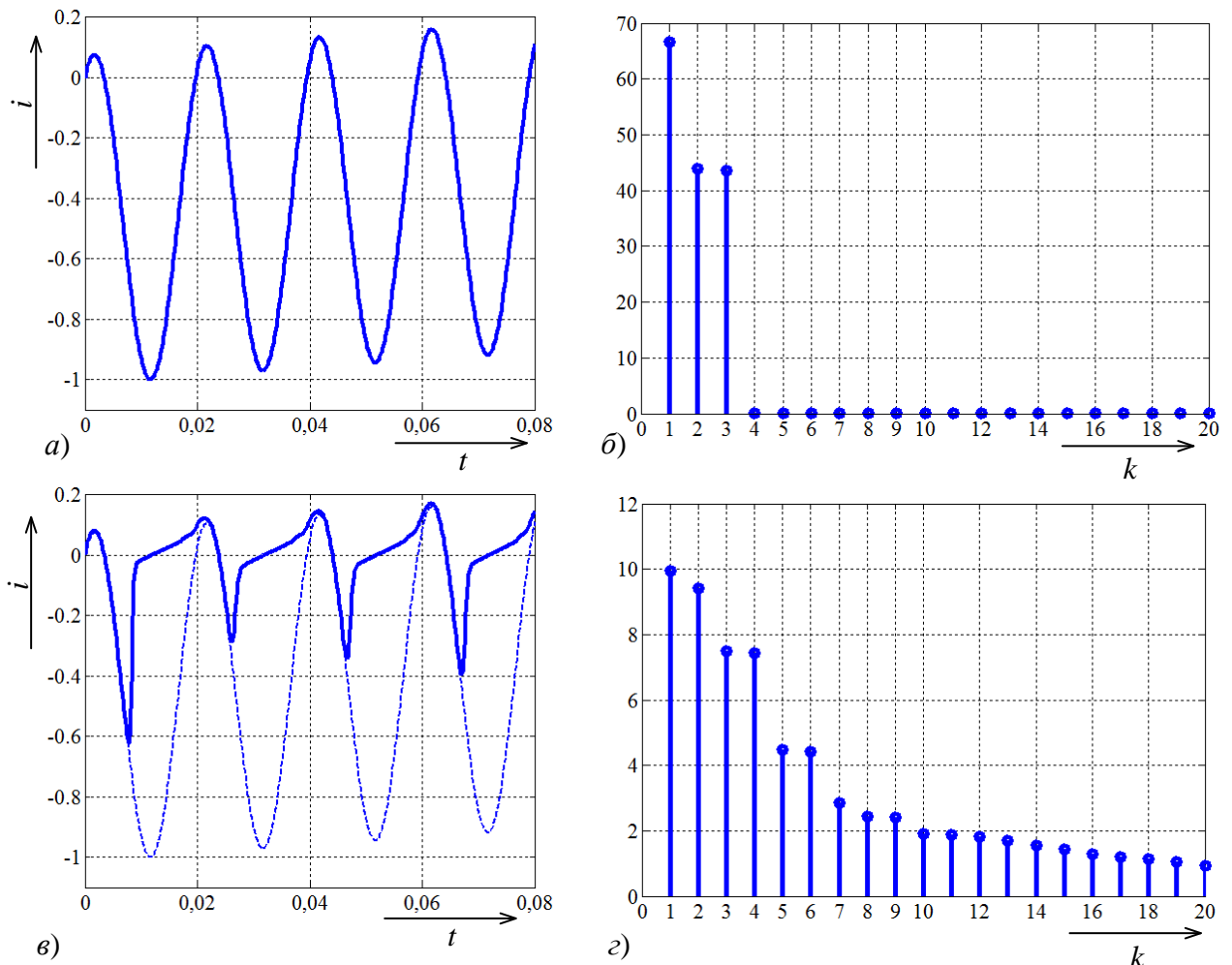


Рисунок 4.2 – Применение ССА к различным процессам: для экспоненциального сигнала (а), для синусоидального сигнала (б), для сигнала, содержащего периодическую и аperiodическую составляющую (в) и соответствующие сингулярные числа (б, г, е)

На рисунке 4.2а представлен сигнал, состоящий из аperiodической и периодической составляющей, а на рисунке 4.2б – сингулярные числа данного сигнала. На рисунке 4.2в представлен нелинейно искажённый сигнал, полученный в результате моделирования насыщения измерительных трансформаторов тока в среде Matlab/Simulink. На рисунке 4.2г представлены сингулярные числа полученного сигнала. Результаты показывают, что увеличение количества составляющих сигнала приводит к соответствующему увеличению количества значимых сингулярных чисел.

4.1.2 Влияние отношения n/m на сингулярные числа

Рассматривается модельный синусоидальный сигнал $i(k) = \sin(0,1\pi k)$ при частоте дискретизации $f_d = 1$ кГц ($\tau_d = 1$ мс). Процесс берёт начало при $k = 0$. Там же начинается окно наблюдения. Наблюдаемый процесс характеризуется двумя значимыми сингулярными числами σ_1 и σ_2 . На рисунке 4.3 они приведены в функции отношения n/m при трёх значениях N – один период основной частоты, 2,5 и 5 периодов. Как видим, признак синусоидальности процесса – близость двух сингулярных чисел – наиболее явно проявляется при окне наблюдения, кратном целому числу периодов, а в этом случае – ещё и при $m = n + 1$, что подводит к выбору максимально возможного значения n/m при соблюдении условия $m > n$.

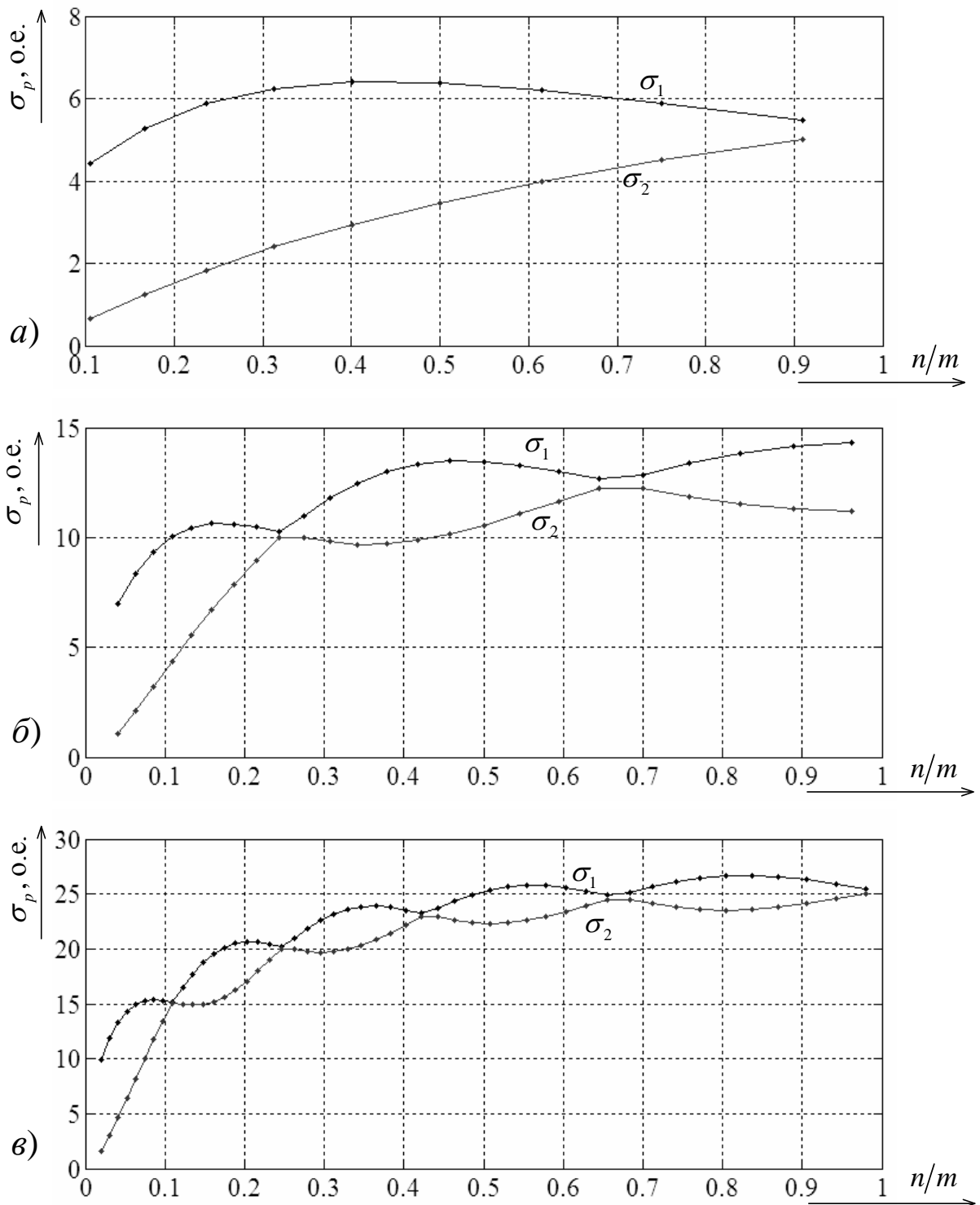


Рисунок 4.3 – Зависимость значимых сингулярных чисел синусоидального сигнала от соотношения n/m : а – $N = 20$, б – $N = 50$, в – $N = 100$

4.1.3 Динамика сингулярных чисел

Для того же синусоидального сигнала, а также для экспоненты $i(k) = \exp(-0,01k)$ на рисунке 4.4 приведены законы изменения двух первых сингулярных чисел при текущем окне наблюдения размером в период основной

частоты. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в первом случае сингулярные числа устанавливаются за время, меньшее окна наблюдения (рисунок 4.4а). Переходный процесс сопровождается появлением на время начального окна наблюдения ещё некоторого числа заметных, но затухающих сингулярных чисел. Во втором случае (рисунок 4.4б) за пределами начального окна существует только одно значимое сингулярное число $\sigma_1(k)$, но переходный процесс сопровождается появлением заметного числа $\sigma_2(k)$.

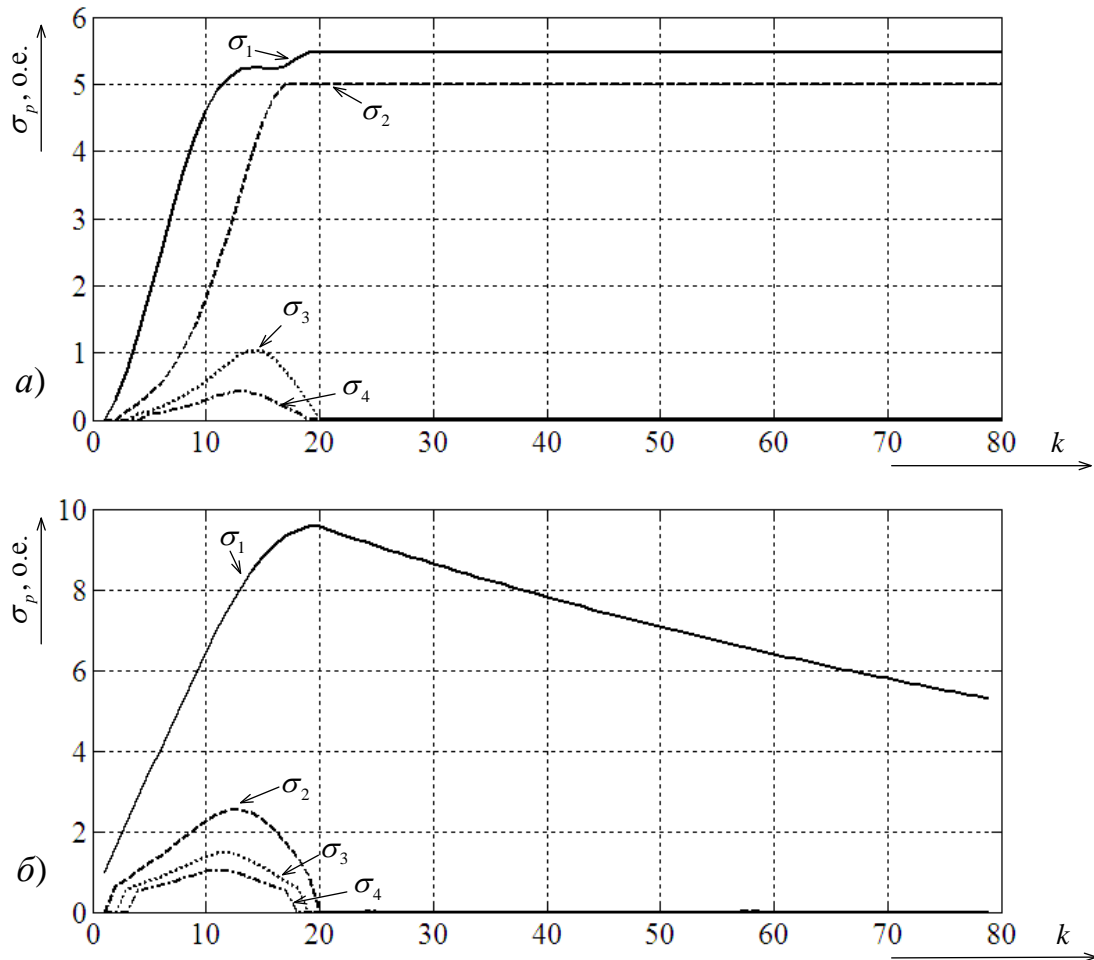


Рисунок 4.4 – Изменение сингулярных чисел при текущем окне наблюдения $N = 20$: а – для синусоидального сигнала, б – для экспоненциального сигнала

4.2 Кратномасштабный анализ

Кратномасштабный анализ¹ – разновидность вейвлет-анализа², признаваемая наиболее подходящей для задач релейной защиты и автоматики³. В отечественной литературе встречается ещё название «многомасштабный анализ»⁴.

У кратномасштабного и сингулярного анализа, несмотря на всё их математическое различие, есть одна общая, пусть и чисто формальная, черта. За анализом (разложением, декомпозицией) может последовать, если в этом возникает необходимость, синтез (реконструкция, восстановление) наблюдаемого процесса, имеющий целью его дешумизацию.

Процедуры кратномасштабного анализа рассмотрены в тех простейших вариантах, которые могут быть реализованы в терминалах релейной защиты и автоматики, в том числе и в реальном времени⁵.

4.2.1 Декомпозиция наблюдаемого процесса

На рисунке 4.5 представлен алгоритм кратномасштабного анализа наблюдаемого процесса $x(k)$, где $k = \text{ent}(f_d t)$ – дискретное время, f_d – частота дискретизации, $f_d/2$ – частота Найквиста, ограничивающая спектр наблюдаемого сигнала. Структура многоэтапного (на рисунке 4.5 – трёхэтапного) алгоритма включает в себя на каждом этапе пары квадратурно-зеркальных цифровых фильтров верхних и нижних частот (ВЧ и НЧ). В фильтрах используются вейвлет-коэффициенты. Задача пары таких фильтров состоит в разделении частотного диапазона входного сигнала на верхнюю и нижнюю половину⁶. Выходные сигналы фильтров подвергаются децимации – для них частота дискретизации

¹ Baussard A., Nicolier F., Truchetet F. Rational multiresolution analysis and fast wavelet transform: application to wavelet shrinkage denoising // Signal Processing. – 2004. – №84. – P. 1735-1747.

² Воробьёв В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – Изд-во Военного ун-та связи, С.-Пб, 1999.

³ Osman A.H., Malik O.P. Transmission Line Distance Protection Based on Wavelet Transform // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – №2. – P. 515-523.

⁴ Дрёмин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук, 2001, Том 171, №5, С. 465-501.

⁵ Лямец Ю.Я., Воронов П.И., Романов Ю.В. Кратномасштабный анализ процесса короткого замыкания // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – №5. – С. 135-143.

⁶ Tay P.C., Navlicek J.P. Frequency implementation of Discrete Wavelet Transforms // Image Analysis and Interpretation. 6th IEEE Southwest Symposium on. – 2004. – P. 167-171.

уменьшается вдвое, что иллюстрируется кружками с цифрой 2 и стрелкой, направленной вниз. Отсчёты входного сигнала, а также выходных сигналов фильтров нижних частот обозначены как a_{ij} , где $i = 0, 1, \dots$ – номер этапа декомпозиции, а $j = 0, 1, \dots$ – порядковый номер отсчёта. Нулевой этап введён чисто формально с тем, чтобы отсчёты наблюдаемой величины обозначались как a_{0j} . Номера j совпадают со значениями дискретного времени только на нулевом этапе: $a_{0j} = a_{0k} = x(k)$.

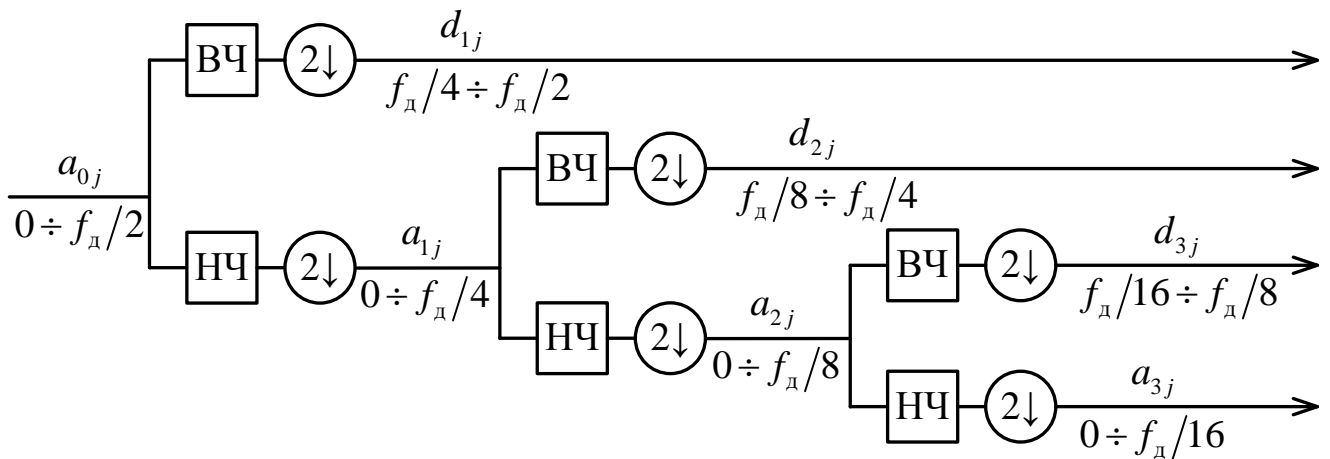


Рисунок 4.5 – Структура процедуры декомпозиции наблюдаемого процесса

Отсчёты выходных сигналов фильтров верхних частот обозначены d_{ij} ($i = 1, 2, \dots, j = 0, 1, \dots$). На рисунке 4.5 под обозначением каждого сигнала указан его расчётный частотный диапазон.

4.2.2 Реконструкция процесса

Дешумизацию наблюдаемой величины осуществляет процедура реконструкции, насчитывающая столько же этапов, сколько и предварительно выполненная декомпозиция, но проводимая в обратной последовательности. На рисунке 4.6 представлена трёхэтапная процедура реконструкции, обратная по отношению к декомпозиции по рисунку 4.5. Из всего множества сигналов a_{ij} , получаемых при декомпозиции, при реконструкции используется сигнал a_{pj} только последнего p -го этапа ($p = 3$ на рисунке 4.6). Главную роль в реконструкции играют операции с сигналами d_{ij} верхних частот. Они

подвергаются нелинейной обработке, например по правилу жёсткого трешолдинга¹

$$d_{ij} = \begin{cases} d_{ij}, & \text{если } |d_{ij}| \geq \eta |d_{ij}|_{\max} \\ 0, & \text{если } |d_{ij}| < \eta |d_{ij}|_{\max} \end{cases}, \quad (4.7)$$

где $\eta < 1$ – пороговый коэффициент (уставка порогового элемента ПЭ) при максимальном по абсолютному значению отсчёте сигнала i -го этапа

$$|d_{ij}|_{\max} = \max_j |d_{ij}|. \quad (4.8)$$

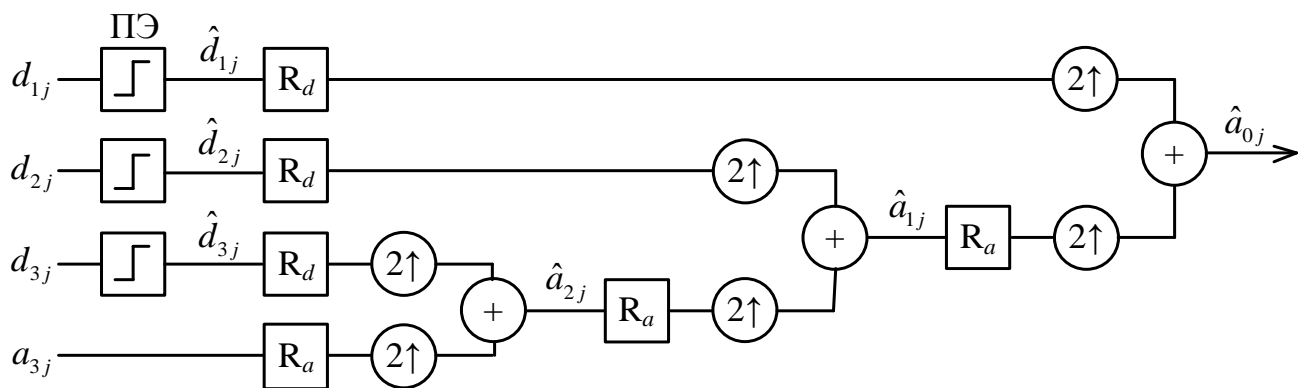


Рисунок 4.6 – Структура процедуры реконструкции процесса после его декомпозиции;

ПЭ – пороговые элементы, R – преобразователи реконструируемых сигналов

4.2.3 Временное описание декомпозиции и реконструкции

Структуры алгоритмов в частотной области (рисунки 4.5 и 4.6) поясняют идею кратномасштабного анализа, но не раскрывают механизм его действия, реализуемый цифровыми фильтрами с вейвлет-коэффициентами. Эта разновидность нерекурсивных фильтров примечательна тем, что она обходится единым для структур декомпозиции и реконструкции набором коэффициентов h_r , $r = \overline{0, q-1}$, где q – их общее число. Для задачи обработки переходного процесса короткого замыкания необходимо ещё ввести в рассмотрение размер наблюдаемой выборки n_0 – числа отсчётов a_{0j} , $j = \overline{0, n_0-1}$. Общие структуры

¹ Strang Gilbert, Nguyen Truong. Wavelets and filter banks. Wellesley-Cambridge Press, 1996.

рисунков 4.5 и 4.6 инвариантны по отношению к числам q и n_0 . В кратномасштабном анализе зачастую ставится условие равенства числа n_0 сумме отсчётов всех выходных сигналов

$$n_0 = 2 \sum_{i=1}^p n_i, \quad (4.9)$$

где n_i – число отсчётов как сигналов a_{ij} , так и d_{ij} , на i -ом этапе. Иногда добавляется условие равенства n_0 целой степени числа 2, например, $n_0 = 2^p$, тогда на последнем этапе $n_p = 1$. Оба условия нельзя считать обязательными, тем не менее они нуждаются в рассмотрении. Их удаётся совместить с действием нерекурсивных фильтров в одном из двух случаев. Первый – это когда используются фильтры только с двумя коэффициентами (вейвлет Хаара или, что то же, вейвлет Добеши 1, обозначаемый как db1). Второй – когда наблюдается периодический сигнал, и окно наблюдения равно периоду. Методы, связанные с экстраполяцией произвольного процесса за пределы окна наблюдения¹, для обработки процесса короткого замыкания рекомендованы быть не могут.

Рассмотрим детальнее процедуры прямого и обратного преобразования, составляющих содержание кратномасштабного анализа. Для иллюстрации действия фильтров прибегнем к введённой ранее мнемонике².

Вейвлет-фильтр с двумя коэффициентами h_0 и h_1 реализует прямое преобразование

$$a_{i+1,j} = \sqrt{2} (h_0 a_{i,2j} + h_1 a_{i,2j+1}), \quad (4.10)$$

$$d_{i+1,j} = \sqrt{2} (h_1 a_{i,2j} - h_0 a_{i,2j+1}) \quad (4.11)$$

и соответствующее обратное преобразование

$$\hat{a}_{i,2j} = (1/\sqrt{2}) (h_0 \hat{a}_{i+1,j} + h_1 \hat{d}_{i+1,j}), \quad (4.12)$$

$$\hat{a}_{i,2j+1} = (1/\sqrt{2}) (h_1 \hat{a}_{i+1,j} - h_0 \hat{d}_{i+1,j}). \quad (4.13)$$

¹ Strang Gilbert, Nguyen Truong. Wavelets and filter banks. Wellesley-Cambridge Press, 1996.

² Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Арсентьев А.П. Адаптивная цифровая обработка входных величин релейной защиты // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп., 1988, №6, С. 51-59.

Преобразование (4.10), (4.11) проиллюстрировано на рисунке 4.7а, а преобразование (4.12), (4.13) – на рисунке 4.7б. Отсчёты сигналов изображены в виде прямоугольников. Линии соответствуют коэффициентам h_r и объединяют отсчёт выходного сигнала, к которому обращены стрелки, с отсчётами формирующих его входных сигналов. При изображении процедуры многоэтапной декомпозиции сигналы a_{ij} и d_{ij} помещены в разных местах диаграммы (рисунок 4.8а): низкочастотные a_{ij} снизу от a_{0j} , а высокочастотные d_{ij} – сверху. Сохранить подобное расположение сигналов при изображении процедуры многоэтапной реконструкции неудобно, в связи с чем сигналы a_{ij} и d_{ij} одного и того же этапа расположены в одну строку, а пары изображений сигналов \hat{a}_{ij} и \hat{d}_{ij} с одинаковыми индексами состыкованы (рисунок 4.8б).

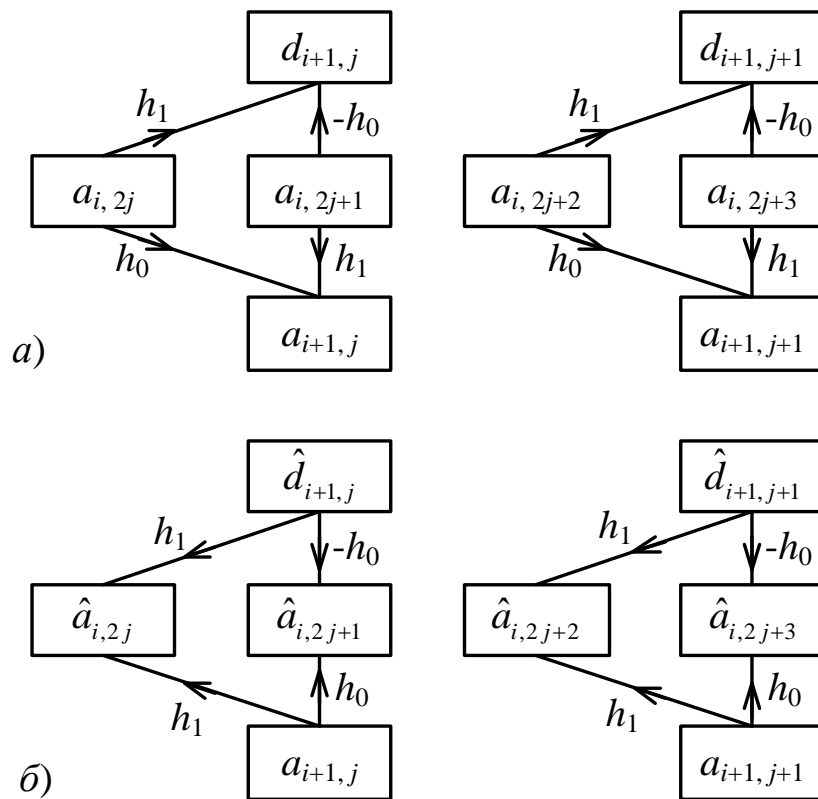


Рисунок 4.7 – Иллюстрация процедур кратномасштабного анализа вейвлет-фильтрами с двумя коэффициентами
 а – декомпозиция; б – реконструкция

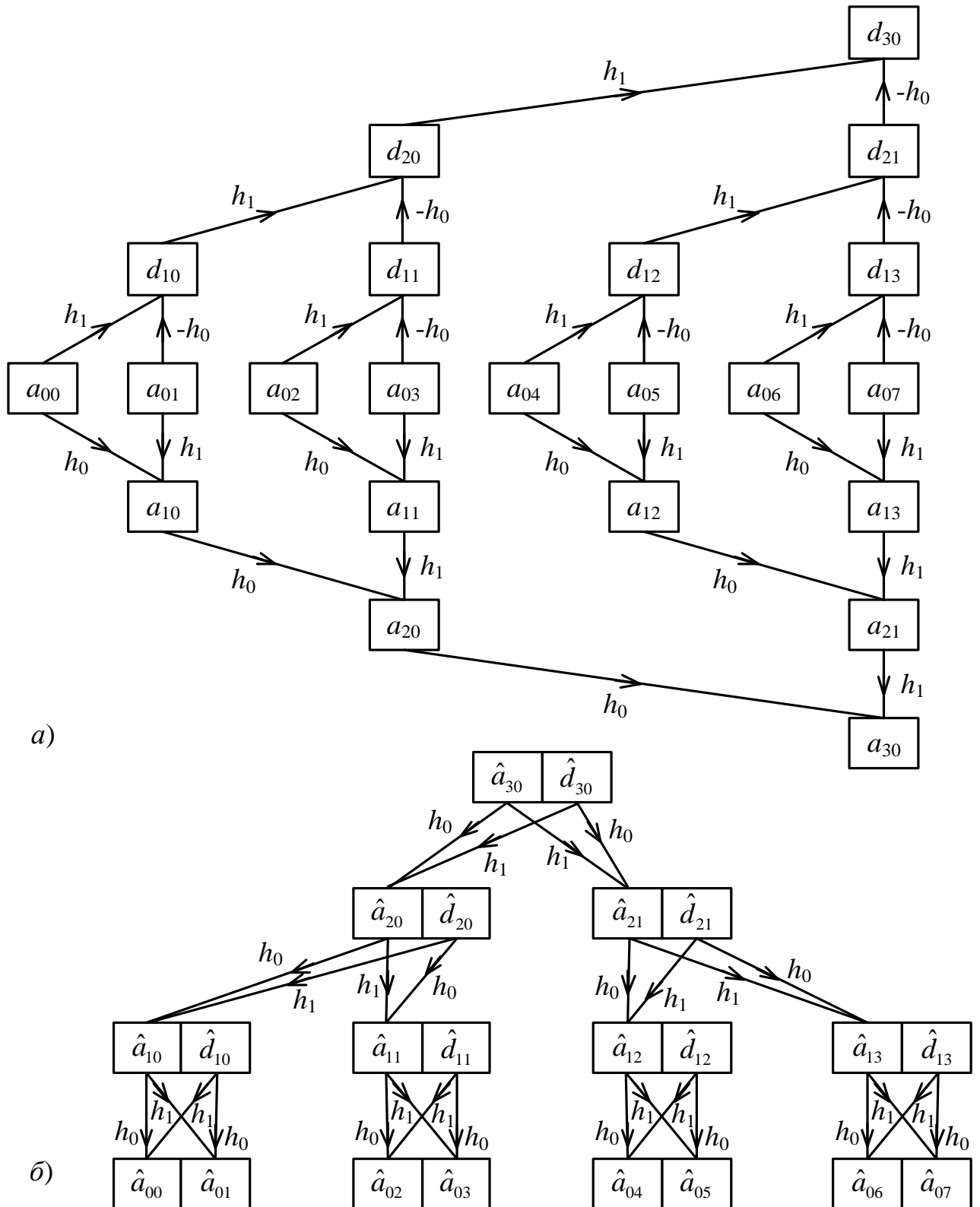


Рисунок 4.8 – Иллюстрация трёхэтапного кратномасштабного анализа выборки из восьми отсчётов наблюдаемой величины вейвлет-фильтрами с двумя коэффициентами: a – декомпозиция, \hat{b} – реконструкция

4.2.4 Кратномасштабный анализ на основе длинных вейвлет-фильтров

Длинными будем полагать фильтры с числом коэффициентов больше двух ($q > 1$). Принципиальное отличие от фильтров с двумя коэффициентами заключается в том, что при переходе к следующему этапу декомпозиции не удаётся получить число отсчётов равным половине числа отсчётов предыдущего этапа. Например, фильтры с четырьмя коэффициентами реализуют следующие алгоритмы декомпозиции

$$a_{i+1,j} = \sqrt{2} (h_0 a_{i,2j} + h_1 a_{i,2j+1} + h_2 a_{i,2j+2} + h_3 a_{i,2j+3}), \quad (4.14)$$

$$d_{i+1,j} = \sqrt{2} (h_3 a_{i,2j} - h_2 a_{i,2j+1} + h_1 a_{i,2j+2} - h_0 a_{i,2j+3}); \quad (4.15)$$

и реконструкции

$$\hat{a}_{i,2j+2} = (1/\sqrt{2}) (h_2 \hat{a}_{i+1,j} + h_0 \hat{a}_{i+1,j+1} + h_1 \hat{d}_{i+1,j} + h_3 \hat{d}_{i+1,j+1}), \quad (4.16)$$

$$\hat{a}_{i,2j+3} = (1/\sqrt{2}) (h_3 \hat{a}_{i+1,j} + h_1 \hat{a}_{i+1,j+1} - h_0 \hat{d}_{i+1,j} - h_2 \hat{d}_{i+1,j+1}), \quad (4.17)$$

поясняемые диаграммами на рисунках 4.9а и 4.9б.

Как видно из рисунка 4.9а, фильтры с четырьмя коэффициентами преобразуют при декомпозиции восемь отсчётов сигнала a_{ij} в три пары отсчётов сигналов $a_{i+1,j}$, $d_{i+1,j}$. А при реконструкции три эти пары способны восстановить только четыре центральных отсчёта выборки i -го этапа. Два начальных и два конечных отсчёта без дополнительных мероприятий, скажем, периодизации процесса, реконструкции не поддаются.

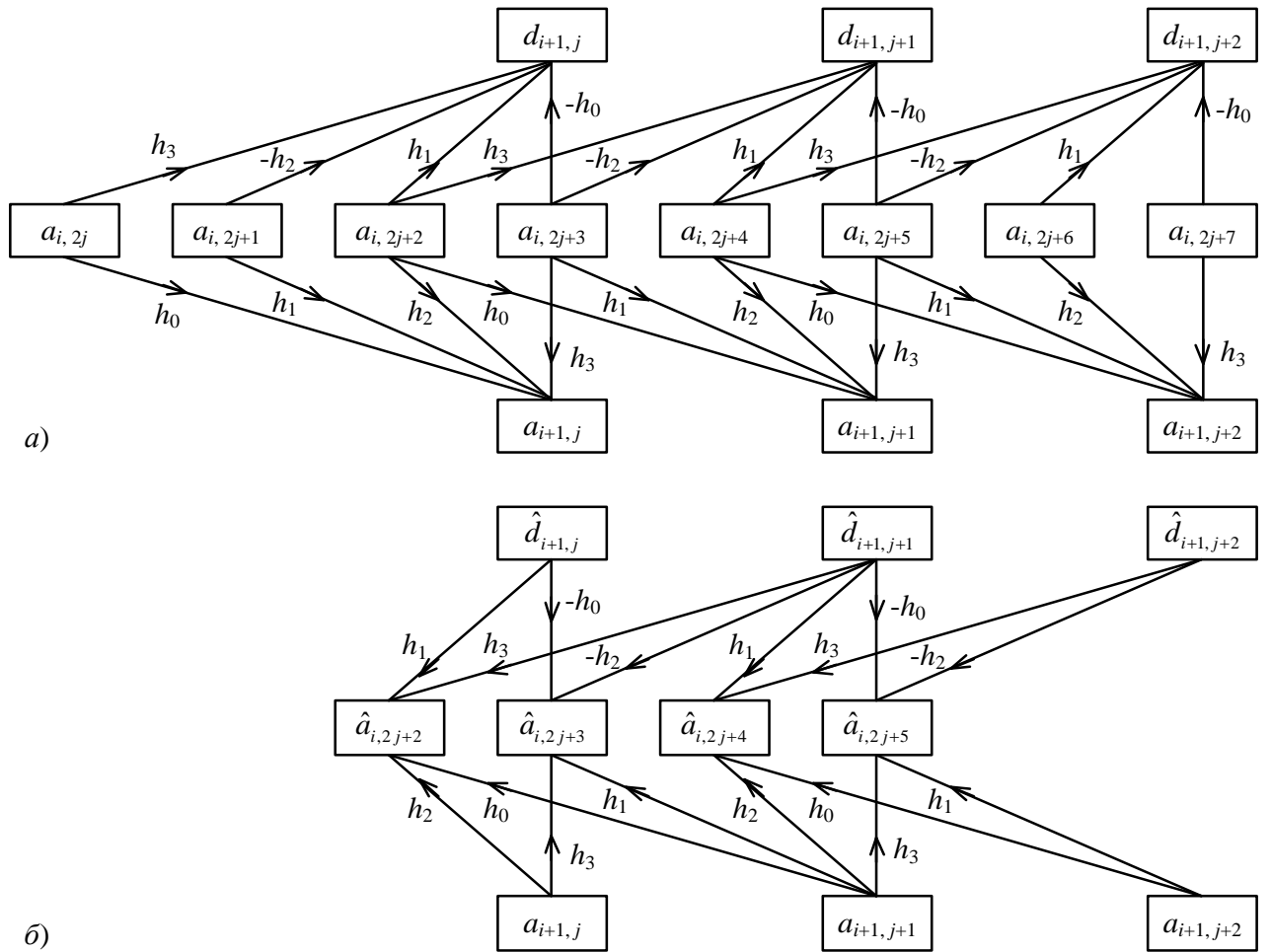


Рисунок 4.9 – Иллюстрация процедур кратномасштабного анализа вейвлет-фильтрами с четырьмя коэффициентами: *а* – декомпозиция, *б* – реконструкция

На каждом очередном этапе как декомпозиции, так и реконструкции, длинные фильтры неизбежно приводят к потере числа отсчётов. На рисунке 4.10 предельно упрощённые диаграммы демонстрируют преобразование двадцати наблюдаемых отсчётов a_{0j} . На первом этапе декомпозиции они дают по девять отсчётов $a_{i+1,j}$ и $d_{i+1,j}$, а на втором – только по три отсчёта $a_{i+2,j}$ и $d_{i+2,j}$. Что же касается реконструкции, то три пары отсчётов $a_{i+2,j}$, $d_{i+2,j}$ формируют всего лишь четыре отсчёта $\hat{a}_{i+1,j}$, а четыре пары отсчётов $\hat{a}_{i+1,j}$, $\hat{d}_{i+1,j}$ – только шесть реконструированных отсчётов \hat{a}_{0j} из двадцати исходных.

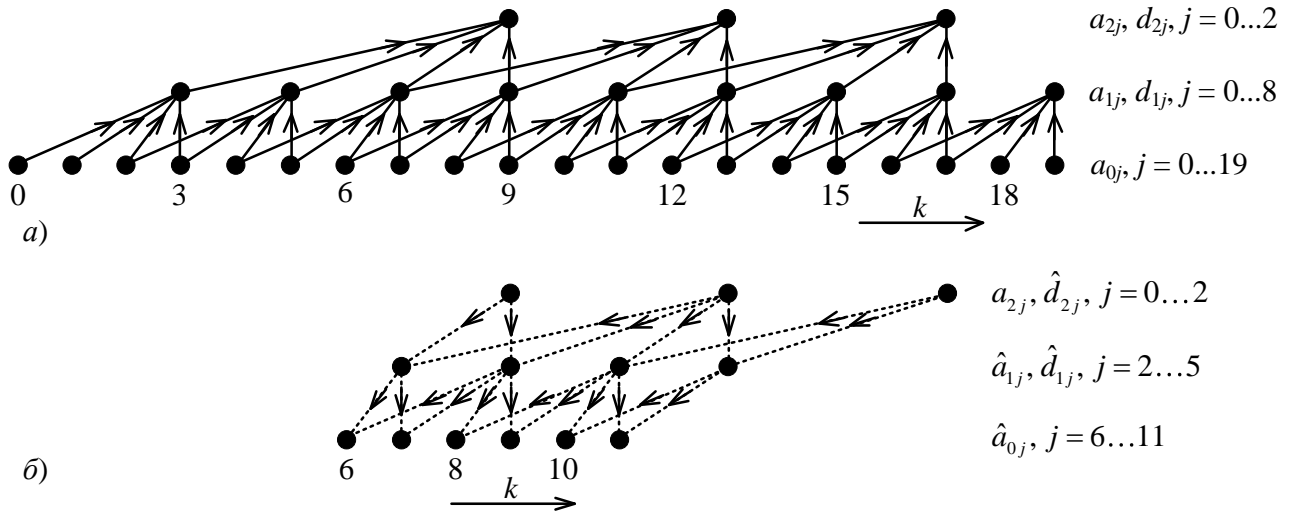


Рисунок 4.10 – Упрощённая мнемоника процедуры обработки выборки из двадцати отсчётов фильтрами с четырьмя коэффициентами
a – декомпозиция, *б* – реконструкция

4.3 Соединение со спектральным анализом (адаптивные фильтры)

4.3.1 Адаптивный фильтр с псевдоинверсией

Построим по методу производящих уравнений¹ нерекурсивный фильтр ортогональных составляющих $(n - 1)$ -го порядка. Производящее уравнение имеет вид

$$i(k) + \sum_{p=1}^{n-1} b_{n-p} i(k - p) = I'_{m1} \sin \alpha k + I'_{m2} \cos \alpha k, \quad (4.18)$$

где b_{n-p} – неизвестные коэффициенты фильтра, I'_{m1} и I'_{m2} – преобразованные фильтром ортогональные составляющие, $\alpha = \omega_0 \tau_d$, ω_0 – частота сети. Алгебраическое уравнение настройки фильтра на интервале наблюдения из N отсчётов следует из разностного уравнения (4.18), записываемого m раз для последних моментов времени $k - m + 1, \dots, k$:

$$\mathbf{B}(k)\mathbf{x}(k) = -\mathbf{g}(k), \quad (4.19)$$

¹ Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Фильтры информационных составляющих тока и напряжения электрической сети // Изв. РАН. Энергетика, 1995, №3, С. 174-189.

$$\mathbf{B}(k) = \begin{bmatrix} i(k-m-n+2) & \dots & i(k-m) & -\sin \alpha(k-m+1) & -\cos \alpha(k-m+1) \\ i(k-m-n+3) & \dots & i(k-m+1) & -\sin \alpha(k-m+2) & -\cos \alpha(k-m+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i(k-n+1) & \dots & i(k-1) & -\sin \alpha k & -\cos \alpha k \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \\ I'_{m1} \\ I'_{m2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g}(k) = \begin{bmatrix} i(k-m+1) \\ i(k-m+2) \\ \vdots \\ i(k) \end{bmatrix}.$$

Порядок фильтра задан с таким расчётом, чтобы сохранить соотношение (4.2).

Из переопределённой при $m > n + 1$ системы уравнений (4.19) следует оценка вектора $\mathbf{x}(k)$

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = -\mathbf{B}^+(k)\mathbf{g}(k), \quad (4.21)$$

где $\mathbf{B}^+(k)$ – матрица, псевдообратная по отношению к $\mathbf{B}(k)$. В $\hat{\mathbf{x}}(k)$ содержатся оценки всех неизвестных коэффициентов производящего уравнения (4.19). Располагая ими, можно определить оценки комплекса составляющей частоты сети

$$\hat{\underline{I}}_m = \frac{\hat{I}'_{m1} + j\hat{I}'_{m2}}{1 + \sum_{p=1}^{n-1} \hat{b}_{n-p} e^{-j\alpha p}}. \quad (4.22)$$

Сопоставляя (4.20) и (4.1), приходим к заключению, что $\mathbf{B}(k)$ – разновидность траекторной матрицы, так как введение в неё отсчётов модельного сигнала не изменяет принципа её построения. Появление в алгоритме работы фильтра (4.21), (4.22) псевдообратной матрицы $\mathbf{B}^+(k)$ свидетельствует о том, что адаптивный фильтр строится с использованием сингулярного анализа. Правда, вектор $\mathbf{g}(k)$ остаётся незатронутым сингулярным анализом, и именно в этом обстоятельстве видится возможность дальнейшего совершенствования метода производящих уравнений. Идея заключается в том, чтобы наблюдаемый сигнал предварительно подвергнуть сингулярному анализу с целью отделить стационарный процесс от наложившихся на него шумов. Последующие примеры

подтверждают способность сингулярного анализа справиться с этой задачей и тем самым повысить точность адаптивного фильтра ортогональных составляющих.

4.3.2 Сингулярный анализ зашумлённого сигнала

На рисунке 4.11 приведён тестовый сигнал

$$i(k) = \cos(0,1\pi k) - \exp(-0,1\pi k) + \mathcal{G}(k), \quad (4.23)$$

где $\mathcal{G}(k)$ – случайная составляющая в виде белого шума, изменяющегося в диапазоне $\pm 0,1$.

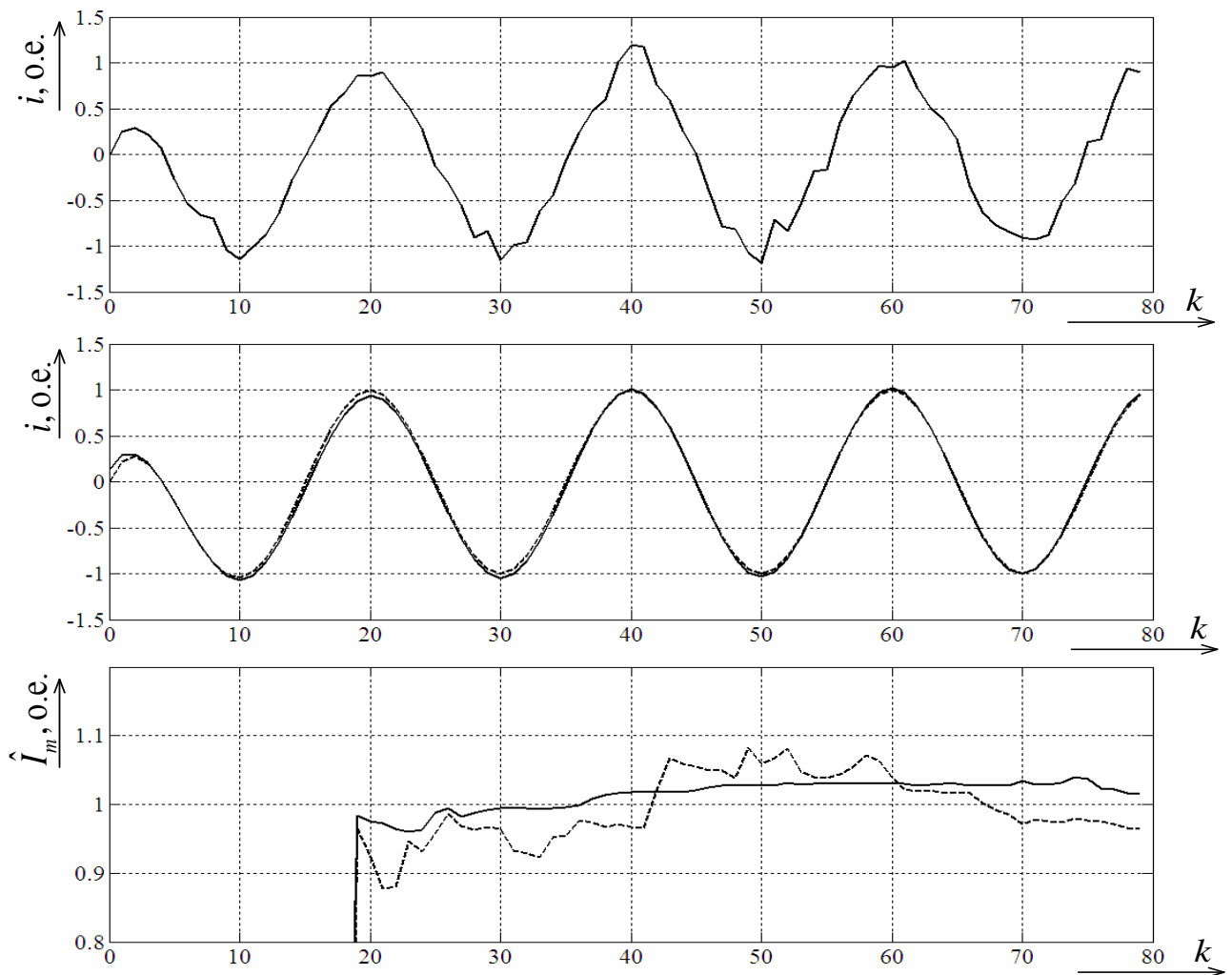


Рисунок 4.11 – Сигнал с шумом до и после восстановления
a – исходный сигнал (4.23); *b* – восстановление посредством сингулярного анализа (сплошная линия), пунктиром показана детерминированная часть исходного сигнала $\cos(0,1\pi k) - \exp(-0,1\pi k)$; *в* – выделение модуля I_m гармонической составляющей адаптивным фильтром: сплошная линия – с предварительным сингулярным анализом, пунктирная – без такового

Там же представлены результаты обработки этого сигнала адаптивным фильтром первого порядка ($n - 1 = 1$). Рассматривались два варианта: непосредственное применение алгоритма (4.21), (4.22) к сигналу (4.23) или же применение его после предварительного отделения составляющей $\mathcal{G}(k)$ с помощью сингулярного анализа. Текущее окно наблюдения в обоих случаях охватывало 20 отсчётов при $f_d = 1$ кГц. Как видим, соединение адаптивной фильтрации с сингулярным анализом приводит к ощутимо лучшему результату, чем одна лишь адаптивная обработка входного сигнала.

4.3.3 Кратномасштабный анализ тока реального короткого замыкания

На рисунке 4.12 представлена осциллограмма тока короткого замыкания, записанная терминалом релейной защиты с частотой дискретизации $f_d = 1$ кГц. Замыкание произошло между 92-ым и 93-м отсчётами тока при том начальном отсчёте, который принят на рисунке 4.12. Ток короткого замыкания содержит значительную апериодическую слагаемую. Кроме того, на нём сказываются шумы, созданные аналого-цифровым преобразованием. Ставится задача выделить амплитуду синусоидальной составляющей тока короткого замыкания (КЗ) при времени наблюдения процесса КЗ, равном 10 мс. Отсчёты тока КЗ составляют выборку $i(k) = a_{0k}$, $k = j = 93 \dots 112$. Интервал КЗ входит в состав окна наблюдения, которое взято достаточно протяжённым, оно составляет 98 отсчётов, т.е. на 10 отсчётов тока КЗ приходится 88 отсчётов тока предшествующего режима. Привлекательная для релейной защиты особенность кратномасштабного анализа заключается в том, что он в равной степени применим как к стационарным, так и к нестационарным процессам. Более того, нестационарный процесс смены нормального состояния электрической сети режимом короткого замыкания имеет даже некоторое преимущество перед стационарным режимом, что объясняется более очевидной организацией процедуры трешолдинга (4.7), (4.8) в первом случае. Дело в том, что смена режима сопровождается резким ростом верхнечастотных сигналов d_{ij} , которые и задают пороги $\left| d_{ij} \right|_{\max}$ в (4.7). Полагаем,

что именно этим обстоятельством можно объяснить результат, полученный в других работах при обработке волнового процесса¹.

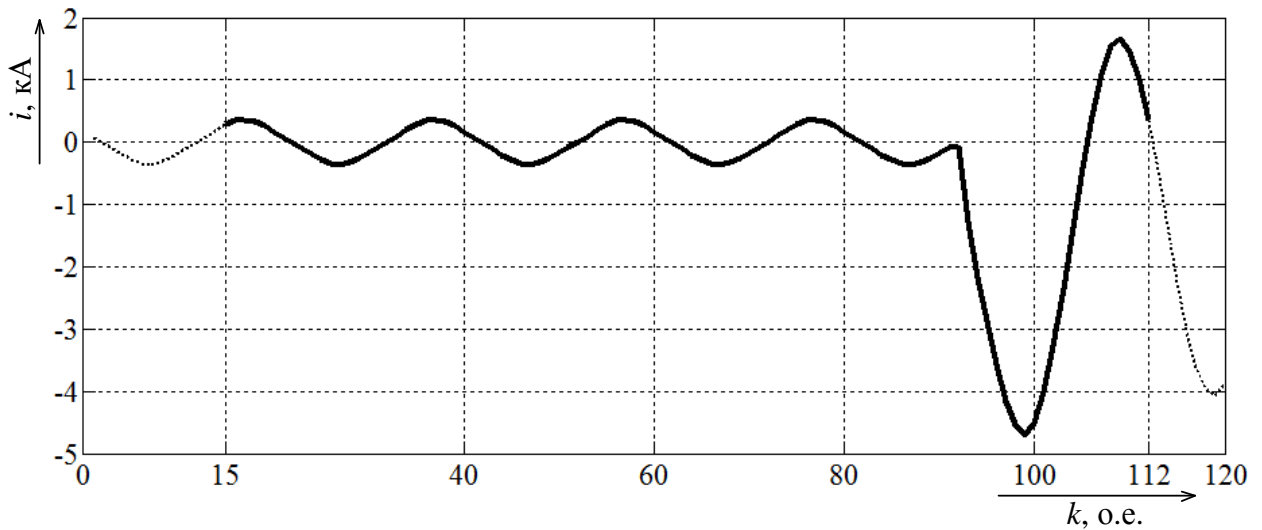


Рисунок 4.12 – Осциллограмма тока короткого замыкания на линии 500 кВ «Приморская ГРЭС – подстанция Хехцир-2»

Рассмотрим применение кратномасштабного анализа как дополнения к фильтрам ортогональных составляющих входных величин релейной защиты. Сопоставим действие фильтров ортогональных составляющих двух типов: простейшего с заграждением двух боковых частот и адаптивного, конструируемого по методу производящих уравнений². Алгоритм действия фильтра первого типа включает в себя операцию смещения боковых частот входной величины $i(k)$ на $(-j\omega_0)$, где ω_0 – частота сети

$$\underline{i}(k) = 2ji(k)\exp(-j\alpha k), \quad (4.24)$$

$\alpha = \omega_0/f_d$, и в подавлении составляющих частот $(-2j\omega_0)$ и $(-j\omega_0)$ с нормированием выходного сигнала на нулевой частоте

$$\underline{v}(k) = \frac{1}{1 - e^{-j2\alpha}} \left(\underline{i}(k) - e^{-j2\alpha} \underline{i}(k-1) \right), \quad (4.25)$$

¹ Пивоваров П.И., Бычков Ю.В. Применение вейвлет-анализа для задач фильтрации цифровых шумов // Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. 8-й Всеросс. науч.-техн. конф. Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та, С. 239-240.

² Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания // Электричество, 2012, №4, С. 9-13.

$$\underline{w}(k) = \frac{1}{1 - e^{-j\alpha}} \left(\underline{v}(k) - e^{-j\alpha} \underline{v}(k-1) \right). \quad (4.26)$$

Сигнал $\underline{w}(k)$ идентифицируется с комплексом I_m синусоидальной составляющей тока короткого замыкания. На рисунке 4.13 пунктиром показаны результаты применения алгоритма (4.24)-(4.26) к осциллограмме тока КЗ по рисунку 4.12, а сплошной линией – результаты дешумизации с помощью пятиэтапного кратномасштабного анализа на базе вейвлета Хаара при указанных в подрисуночной подписи значениях коэффициентов жёсткого трешолдинга.

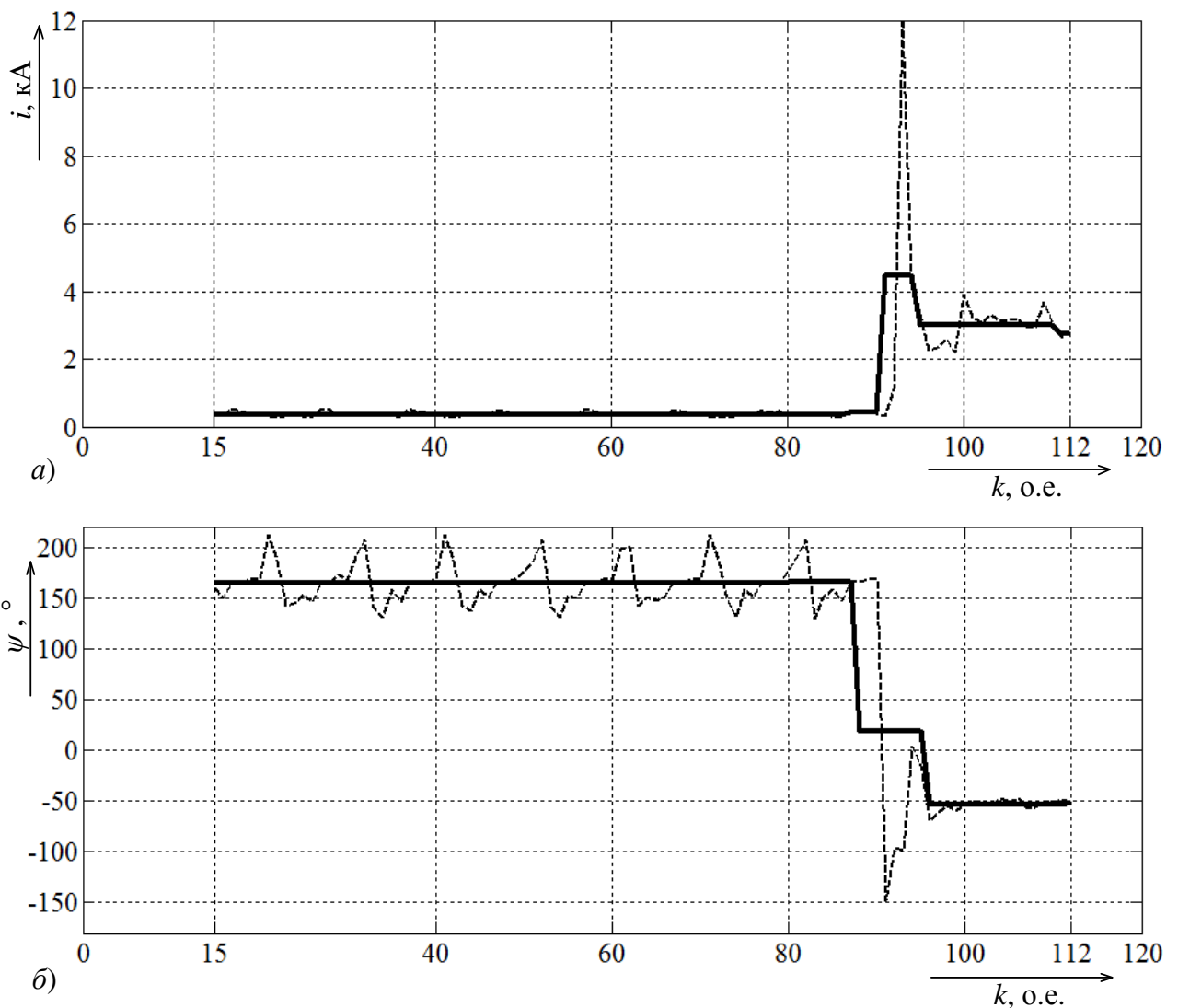


Рисунок 4.13 – Амплитуда и фаза выходного сигнала простейшего фильтра ортогональных составляющих до и после кратномасштабного анализа с коэффициентами жёсткого трешолдинга:

а) $\eta_i = 1; 1; 1; 1; 0,2$, б) $\eta_i = 1; 1; 0,8; 0,6; 0,5$, $i = 1 \dots 5$

Адаптивный фильтр ортогональных составляющих, пригодный для работы в реальном времени, построим на основе производящего разностного уравнения¹ с неизвестным комплексным коэффициентом \underline{a} и неизвестным комплексом в правой части

$$\underline{v}(k) + \underline{a}\underline{v}(k-1) = \underline{I}'_m, \quad (4.27)$$

где $\underline{v}(k)$ – выходной сигнал фильтра (4.25). Значения \underline{a} и \underline{I}'_m оценивались по текущим выборкам из восьми отсчётов сигнала $\underline{v}(k)$. Искомый комплекс оценивался путём обратной передачи через фильтр в левой части уравнения (4.27) постоянного сигнала \underline{I}'_m

$$\underline{I}'_m = \frac{\hat{\underline{I}}'_m}{1 + \hat{\underline{a}}}, \quad (4.28)$$

где $\hat{\underline{I}}'_m$ и $\hat{\underline{a}}$ – оценки соответствующих параметров.

На рисунке 4.14 пунктиром показаны результаты применения алгоритма (4.24), (4.25), (4.27), (4.28) к тому же процессу КЗ по рисунку 4.12, а сплошной линией – итоги применения такой же процедуры кратномасштабного анализа, как и ранее, но с новым подбором коэффициентов трешолдинга.

¹ Лямец Ю.Я., Романов Ю.В., Широкин М.Ю. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания // Электричество, 2012, №4, С. 9-13.

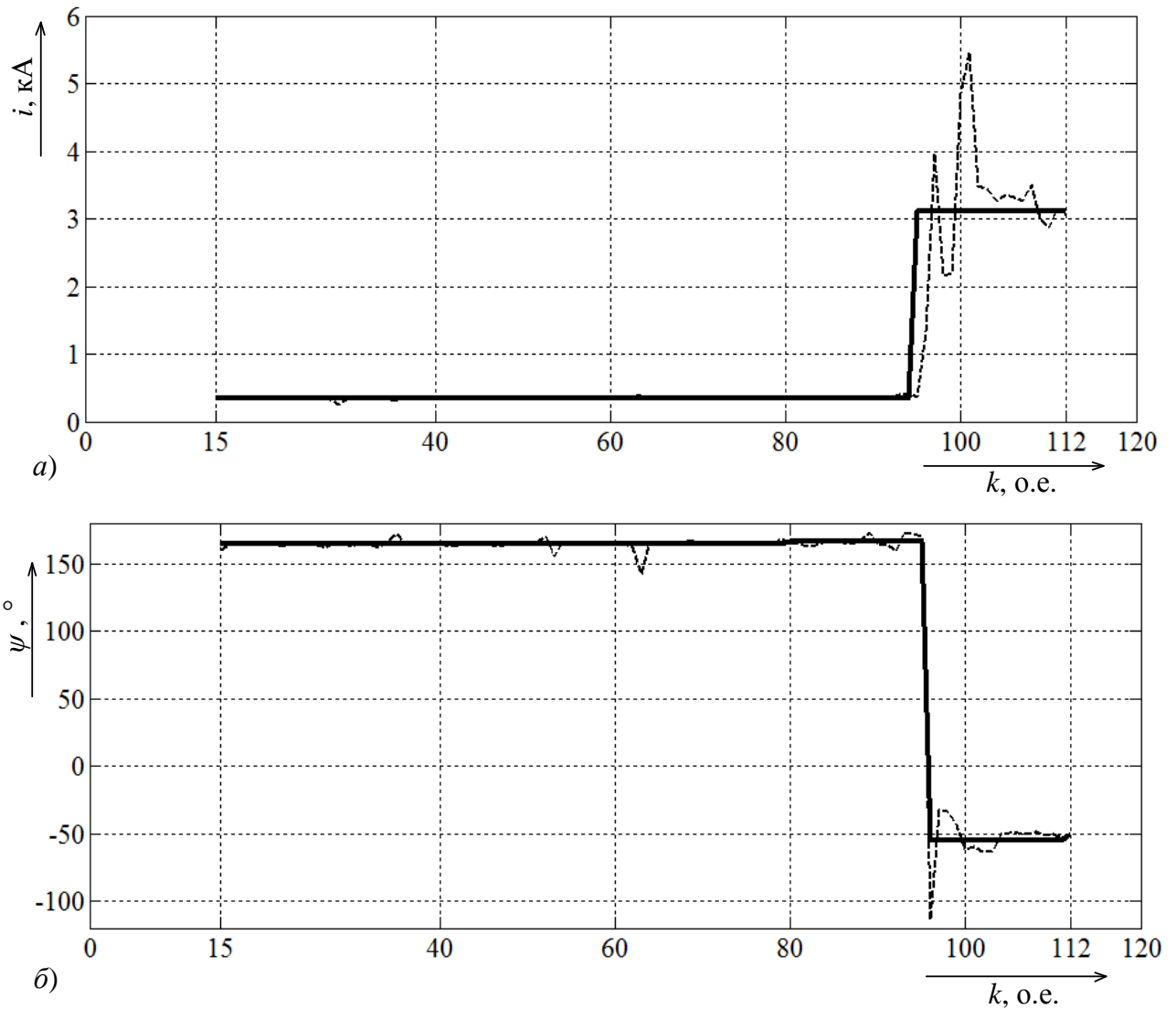


Рисунок 4.14 – Амплитуда и фаза выходного сигнала адаптивного фильтра ортогональных составляющих до и после кратномасштабного анализа с коэффициентами жёсткого трешолдинга:

а) $\eta_i = 1; 1; 1; 1; 0,4$, б) $\eta_i = 1; 1; 1; 0,9; 0,8$, $i = 1 \dots 5$

Как видим, кратномасштабный анализ подчёркивает превосходство адаптивного выделения ортогональных составляющих над неадаптивным, что в первую очередь объясняется лучшей настройкой адаптивного фильтра (4.27) на подавление произвольной апериодической составляющей, чем это делает заграждающий фильтр (4.26), настроенный на подавление постоянной составляющей входного сигнала $i(k)$.

4.4 Выводы

1. Различным процессам, наблюдаемым в электрических системах, отвечает характерное поведение сингулярных чисел траекторной матрицы. Так,

синусоидальный процесс характеризуется двумя близкими сингулярными числами, экспоненциальный процесс – только одним сингулярным числом. При неизменном по размеру текущем окне наблюдения сингулярные числа формируются на интервале установления со своей спецификой для различных наблюдаемых процессов.

2. При возникновении короткого замыкания пара главных сингулярных чисел устремляется в рост, начиная со своих значений в предшествующем режиме.

3. Способность сингулярного анализа разделять квазидетерминированную и случайную составляющие наблюдаемого процесса удачно сочетается со способностью адаптивного фильтра выделять слагаемую основной частоты из смеси экспонент и гармоник, в том числе и затухающих.

4. Кратномасштабный анализ может быть отнесён к числу алгоритмов реального времени, особенно если он построен на базе вейвлета Хаара, а коэффициенты трешолдинга выбираются из ограниченного набора значений. Применение вейвлетов с числом коэффициентов больше двух усложняет анализ не только увеличением числа операций, но и своеобразным «краевым эффектом»: окно реконструируемого процесса сужается относительно окна наблюдения.

5. Кратномасштабный анализ обеспечивает дешумизацию обрабатываемого процесса без предварительного его разделения на стационарные участки режимов до и после короткого замыкания, благодаря чему появляется возможность применять быстродействующие фильтры ортогональных составляющих, несмотря на то, что они дают усиление шумов во входных сигналах.

6. Приведены алгоритмы дешумизации электрических сигналов в том виде, в котором они могут быть реализованы на базе современных микропроцессорных устройств релейной защиты. Показана целесообразность применения сингулярного спектрального и кратномасштабного анализов в дополнение адаптивной фильтрации.

ГЛАВА 5 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).

5.1 Адаптивная дистанционная защита

Многомерная дискретная структура и способ прямой адаптации дистанционной защиты были применены в разработке микропроцессорного устройства «ТОР 300 АДЗ 110» производства ИЦ «Бреслер» (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Устройство адаптивной дистанционной защиты «ТОР 300 АДЗ 110»

Для повышения чувствительности защиты характеристика срабатывания задаётся произвольным числом точек. На способ задания условий срабатывания релейной защиты получен патент на изобретение¹. Предложено выполнять проверку условий срабатывания путём сравнения составляющих текущего сигнала с соответствующими составляющими граничных сигналов четырёх типов. Имея в виду положение граничных сигналов относительно текущего сигнала, выделены такие типы: верхний, нижний, левый и правый. Граничные сигналы верхнего и нижнего типа определяют как ближайшие по своим

¹ Способ задания условий срабатывания релейной защиты // Патент РФ № 2537652, БИ №1, 2015.

горизонтальным составляющим к горизонтальной составляющей текущего сигнала. Соответственно граничные сигналы правого и левого типа определяют как ближайшие по своим вертикальным составляющим к вертикальной составляющей текущего сигнала. Условия срабатывания сводятся к сопоставлению составляющих текущего сигнала с соответствующими составляющими граничных сигналов четырёх упомянутых типов. Условия срабатывания заключаются в том, что вертикальная составляющая текущего сигнала оказывается между вертикальными составляющими верхних и нижних граничных сигналов, в то время как горизонтальная составляющая помещается между горизонтальными составляющими правых и левых граничных условий (приложение Б).

Рассмотрим построение адаптивной дистанционной защиты на примере имитационной модели рисунка 2.5 (стр. 46) с вариацией объектных параметров, представленной в таблице 5.1 (как в главе 2 диссертации).

Таблица 5.1 – Параметры имитационной модели

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
$R_{f\alpha}$, Ом	0	100
$R_{f\beta}$, Ом	0	∞
$x_{f\alpha}$, км	0	85
$x_{f\beta}$, км	85	100
δ , град	-180	180
Z_s , Ом	1	100
$\arg(Z_s)$, град	70	90
Z_r , Ом	1	100
$\arg(Z_r)$, град	70	90
k_s, k_r , о.е.	0,9	1,1

Многомерная дискретная структура для данной модели представлена на рисунке 2.10 (стр. 51). На рисунке 2.11 (стр. 52) приведён результат обучения реле

для зачернённой ячейки с кодом $\mathbf{K}_{\text{пд}} = [2, 2, 1]^T$. Построим аналогичные характеристики для других ячеек структуры. Характеристики строятся с помощью автоматизированной программы, написанной в программном комплексе Matlab.

Для ячейки с кодом $\mathbf{K}_{\text{пд}} = [3, 2, 1]^T$ со сторонами $P_{\text{пд}} \in (8; 182)$ МВт, $Q_{\text{пд}} \in (66; 252)$ МВАр, $I_{\text{пд}} \in (0; 1,16)$ кА характеристика срабатывания представлена на рисунке 5.2, а объектная характеристика – на рисунке 5.3.

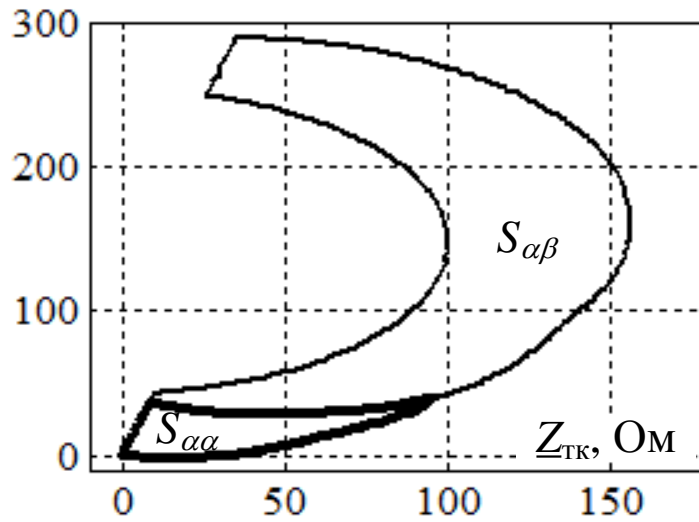


Рисунок 5.2 – Область срабатывания адаптивного реле сопротивления для расширенного диапазона изменения параметров имитационной модели

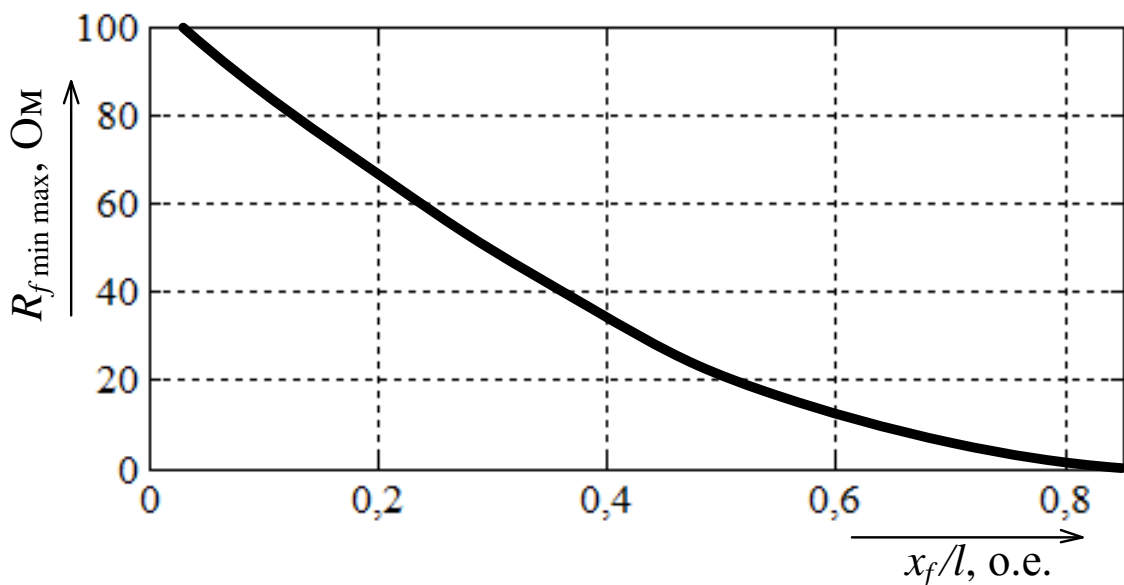


Рисунок 5.3 – Объектная характеристика реле с областью срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ по рисунку 5.2

Для ячейки с кодом $\mathbf{K}_{\text{пд}} = [3, 3, 2]^T$ со сторонами $P_{\text{пд}} \in (8; 182)$ МВт, $Q_{\text{пд}} \in (252; 438)$ МВАр, $I_{\text{пд}} \in (1,16; 2,32)$ кА характеристика срабатывания представлена на рисунке 5.4, а объектная характеристика – на рисунке 5.5.

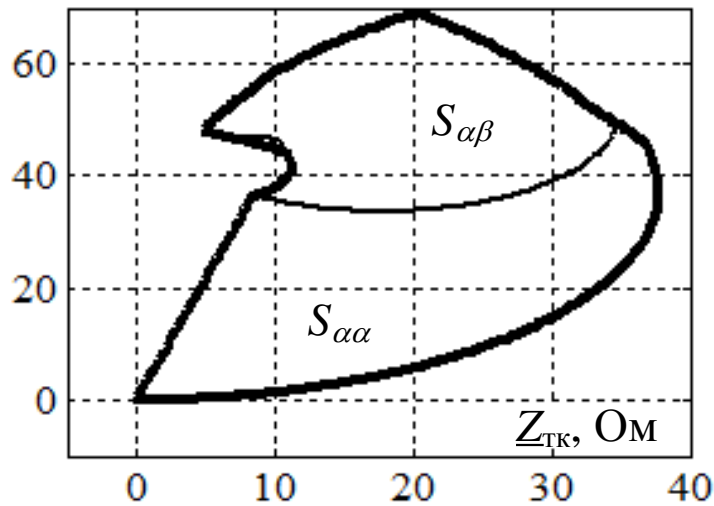


Рисунок 5.4 – Область срабатывания адаптивного реле сопротивления для расширенного диапазона изменения параметров имитационной модели

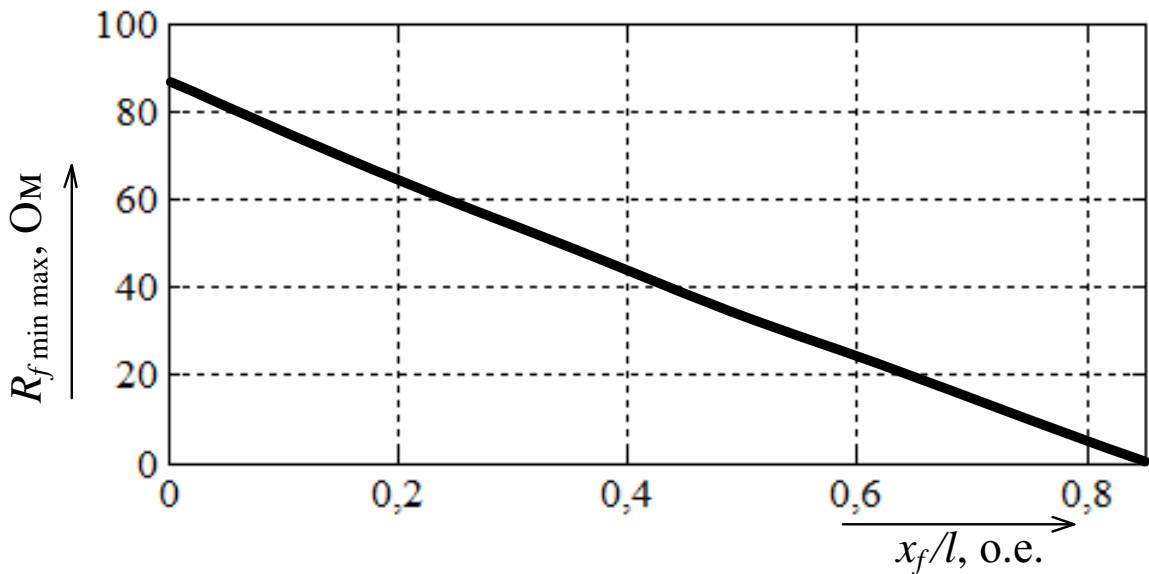


Рисунок 5.5 – Объектная характеристика реле с областью срабатывания $S_{\alpha\alpha}$ по рисунку 5.4

Аналогичным образом строятся характеристики срабатывания для остальных ячеек и объектная характеристика. Предложенная защита обеспечивает селективную работу в режимах коротких замыканий, в том числе на фоне асинхронного режима, при этом обладает высокой распознающей способностью.

5.2 Локатор повреждений при двухстороннем наблюдении

Критерии повреждений при двухстороннем наблюдении и сингулярный спектральный анализ применены в разработке локатора повреждений линий электропередачи при двухстороннем наблюдении на базе терминала «ТОР 300 ЛОК 220» производства ИЦ «Бреслер» (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Локатор повреждений при двухстороннем наблюдении «ТОР 300 ЛОК 220»

Для повышения точности и предотвращения неоднозначности определения места повреждения в локаторе используется совокупность критериев, а место повреждения определяется из анализа результатов, полученных различными критериями. Рассмотрим алгоритм работы локатора на примере линии электропередачи напряжением 110 кВ с двухсторонним наблюдением, имитационная модель которой представлена на рисунке 5.7. Длина линии $l = 200$ км, удельное сопротивление линии по прямой последовательности $\underline{Z}_1^0 = 0,2 + j0,4$ Ом/км, по нулевой – $\underline{Z}_0^0 = 0,35 + j1,2$ Ом/км. Удельные проводимости линии $\underline{Y}_1^0 = j2,8$ мкСм/км, $\underline{Y}_0^0 = j2,2$ мкСм/км. Сопротивления систем по прямой последовательности $\underline{Z}_{s1} = \underline{Z}_{r1} = 10 \angle 88^\circ$ Ом, по нулевой – $\underline{Z}_{s0} = \underline{Z}_{r0} = 15 \angle 86^\circ$ Ом. Удельные параметры линии и её длина задаются в качестве уставок терминала. Они необходимы для составления алгоритмической модели защищаемого объекта.

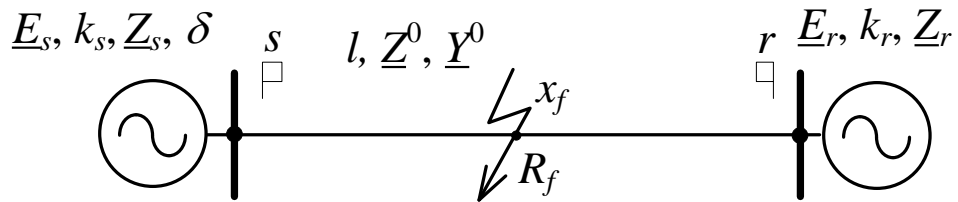


Рисунок 5.7 – Модель линии электропередачи с двухсторонним наблюдением

Смоделируем режим двухфазного замыкания на землю фаз *B* и *C* в середине защищаемой линии, переходные сопротивления в месте короткого замыкания равны 1 Ом. Модель повреждения представлена на рисунке 5.8. Угол передачи мощности $\delta = 10^\circ$.

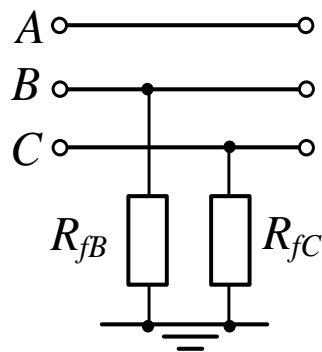


Рисунок 5.8 – Модель линии электропередачи с двухсторонним наблюдением

Токи и напряжения, полученные при таком замыкании, сведены в таблицу 5.2. Считаем, что наблюдения синхронизированы. При наличии несинхронизированных наблюдений производится искусственная синхронизация наблюдаемых величин путём оптимизационной процедуры¹.

Таблица 5.2 – Наблюдаемые на подстанциях токи и напряжения

Величина	Левая система <i>s</i>	Правая система <i>r</i>
\underline{U}_A , кВ	64,94 \angle 9,2°	64,21 \angle 1,0°
\underline{U}_B , кВ	54,93 \angle -115,6°	55,09 \angle -125,2°
\underline{U}_C , кВ	52,74 \angle 127,5°	52,43 \angle 117,5°
\underline{I}_A , А	110,9 \angle 36,6°	96,8 \angle 16,5°
\underline{I}_B , А	1036,2 \angle -161,3°	980,2 \angle 7,5°
\underline{I}_C , А	1048,8 \angle 49,7°	1094,6 \angle -141,0°

¹ Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двухстороннем наблюдении // Патент РФ №2492493, БИ №25, 2013.

Применим различные критерии ОМП. На рисунке 5.9 представлены результаты определения места повреждения с помощью этих критериев.

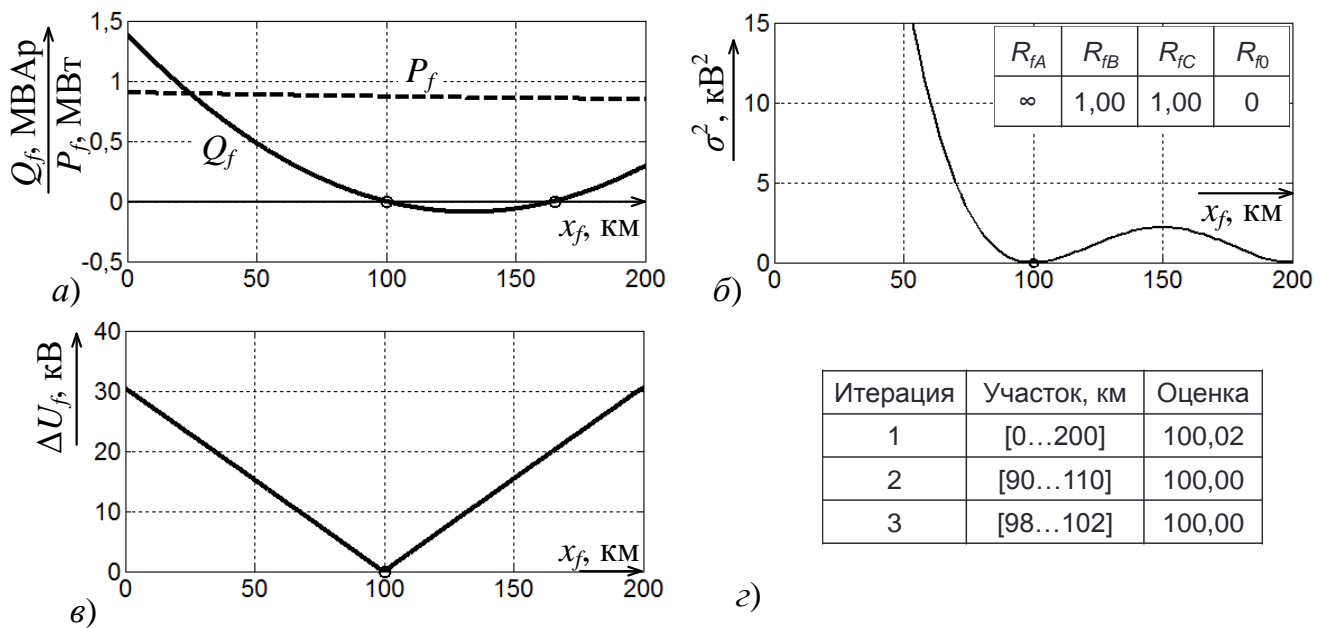


Рисунок 5.9 – Применение критериев повреждения при двухстороннем наблюдении: *а* – энергетический критерий; *б* – критерий невязки; *в* – критерий равенства напряжений; *г* – итерационный критерий

Из рисунка 5.9*а* видно, что для данного режима короткого замыкания энергетический критерий определяет две точки повреждения на наблюдаемой линии (точки пересечения с нулём), при этом в обеих точках активная мощность положительна. Применение только одного энергетического критерия, таким образом, не всегда позволяет однозначно определить расстояние до места повреждения. Именно поэтому в диссертации предложено использование нескольких критериев повреждения для того, чтобы такие неоднозначности можно было решить. Критерий равенства напряжений точно определяет расстояние до места повреждения (рисунки 5.9*в*), как и критерий невязки. Критерий невязки, кроме всего прочего, точно определяет параметры модели повреждения. Итерационный критерий уже на второй итерации позволяет определить расстояние до места повреждения.

Таким образом, применение всех критериев в микропроцессорном терминале ОМП при двухстороннем наблюдении позволяет реализовать точное

определения расстояния до мест коротких замыканий. Кроме того, реализованный энергетический критерий оценивает расстояние до мест коротких замыканий с обрывами проводов, а также определяет расстояние до мест двойных замыканий.

5.3 Автоматика опережающего деления сети

Кратномасштабный анализ использован в разработке быстродействующего токового реле. Реле применено в качестве основного измерительного органа (ИО) в автоматике опережающего деления сети (АОДС).

Энергетической системой называется группа электрических станций, связанных электрическими сетями между собой и с приёмниками – потребителями электроэнергии. Объединение электрических станций и электрических сетей на параллельную работу имеет ряд известных преимуществ, однако в некоторых критических ситуациях параллельная работа становится опасной и должна искусственно прерываться с помощью специальных автоматических устройств, называемых автоматикой деления сети или делительными защитами¹.

Опережающее деление сети в режиме короткого замыкания – экономически эффективное мероприятие, так как для его осуществления требуются незначительные материальные затраты и время по сравнению с заменой выключателей присоединений с недостаточной отключающей способностью². В нормативных документах оно рекомендовано как первоочередное мероприятие по ограничению токов короткого замыкания³. Область применения опережающего деления сети ограничена такой степенью несоответствия уровня токов короткого замыкания и отключающей способности выключателей, при которой можно выбрать в схеме распределительного устройства (РУ) один-два выключателя, опережающее отключение которых приведёт к требуемому облегчению условий

¹ Шабад М.А. Делительные защиты – автоматика деления при авариях // Приложение к журналу «Энергетик», вып. 7, 2006 г.

² Неклепаев Б.Н. Методы ограничения токов короткого замыкания в энергосистемах // М.: Энергия, 1978. – 52 с.

³ РД 34.20.175. Указания по ограничению токов короткого замыкания в сетях напряжением 110 кВ и выше, решение №36 от 9 апреля 1976 г.

отключения остальных выключателей. Наиболее часто такими выключателями являются шиносоединительный, секционный или выключатели автотрансформатора, связывающего РУ высшего и среднего напряжений электростанции.

Предложено большое число реле тока, предназначенных для использования в качестве ИО в АОДС, обладающих повышенным быстродействием. Например, для расчёта ортогональных составляющих было предложено использование производной в замере тока на каждом периоде промышленной частоты¹. Необходимым условием устойчивого функционирования большинства токовых реле является работа высоковольтных измерительных трансформаторов тока (ТТ) без существенных погрешностей. Однако ввиду того, что АОДС применяется в наиболее мощных узлах энергосистем и срабатывает при близких коротких замыканиях, условия для насыщения ТТ возникают достаточно часто. Поэтому ИО АОДС должны действовать правильно и без замедления в режимах, когда погрешности ТТ обуславливают снижение интегральных значений вторичного тока по сравнению с приведённым первичным. В этих условиях реле, реагирующие на интегральные значения тока, могут отказывать в срабатывании или срабатывать со значительными задержками в переходных процессах КЗ.

Другим способом обеспечения правильного функционирования реле может выступать предварительная сегментация наблюдаемого процесса на участки однородности путём преобразования цифровым фильтром ортогональных составляющих². Также предлагается использование быстродействующих реле, реагирующих на аварийные составляющие³, или восстановление кривой наблюдаемого тока⁴. Однако для целей АОДС необходимо иметь алгоритмы,

¹ Способ сверхбыстродействующей аварийной защиты элементов электроэнергетических систем переменного тока и устройство для его осуществления // Патент РФ №2400899. БИ №27, 2010.

² Способ определения интервалов однородности электрической величины // Патент РФ №2418268. БИ №13, 2011.

³ Ultra-high-speed relay // Патент США №44504971, 1984 г.

⁴ Кужеков С.Л., Дегтярёв А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – №3. – С. 29-31.

обладающие повышенным быстродействием и лишённые дополнительных операций с наблюдаемыми величинами.

Для устранения указанных недостатков были предложены реле тока быстродействующие (РТБ), в том числе и направленного действия, основанные на принципе замера периодической слагающей тока по мгновенным значениям его первой производной в интервале точной трансформации ТТ¹. В предлагаемом реле производится замер производной тока в интервале совпадения знаков самого сигнала и его производной. Совпадение знаков тока и его производной является устойчивым признаком, позволяющим отстроиться от насыщения ТТ. На рисунке 5.10 представлены примеры осциллограмм вторичного тока i_2 с насыщением и интервалы времени $\Delta t_{\text{совп}}$, в которых данное реле производит замеры. Такое выполнение обеспечивает устойчивое функционирование реле при искажениях тока, обусловленных насыщением магнитопровода высоковольтных ТТ.

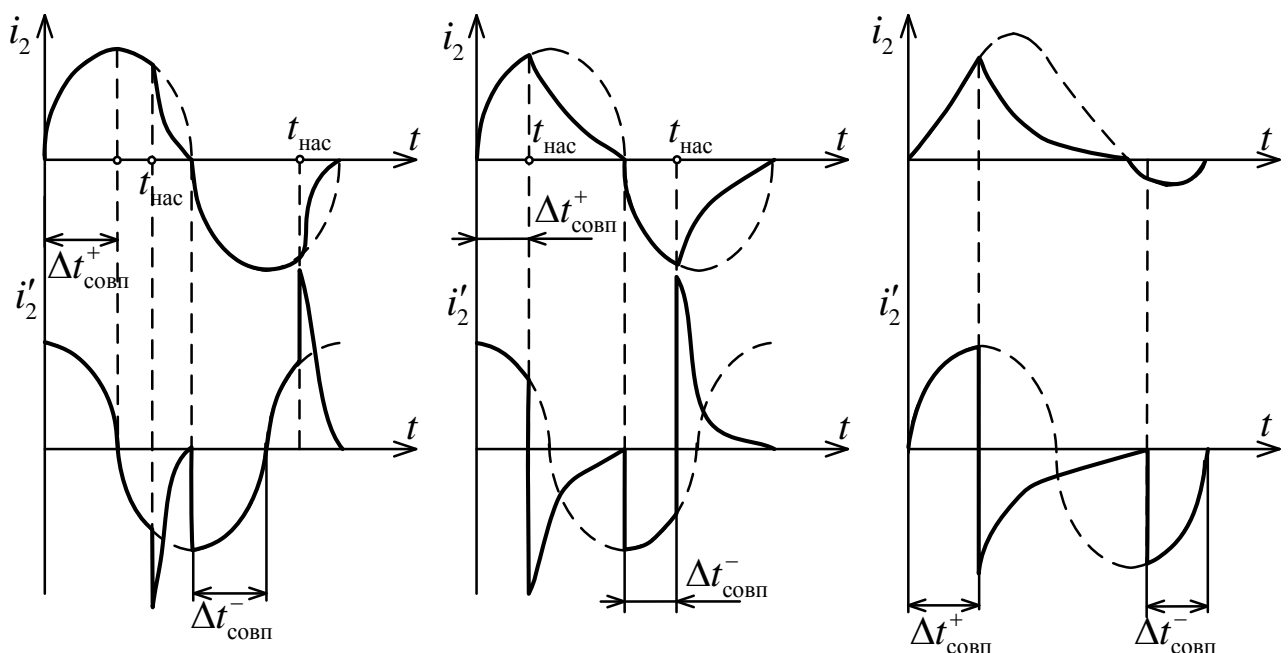


Рисунок 5.10 – Примеры осциллограмм тока с насыщением магнитопровода ТТ и работа применяемого фильтра

¹ Куцовский С.М., Королев Е.П. Реле тока для автоматики опережающего деления сети // Электрические станции. – 1979. – №1. – С. 49-53.

Для повышения быстродействия реле РТБ было предложено применение кратномасштабного анализа для целей предварительной дешумизации токов короткого замыкания. На рисунке 5.11 представлена структурная схема быстродействующего реле для АОДС. Структурная схема АОДС ненаправленного действия состоит из трёх блоков. Блок 1 представляет собой блок отстройки от насыщения измерительных трансформаторов тока. Блок 2 представляет собой блок фильтрации. Наконец, блок 3 – блок логики.

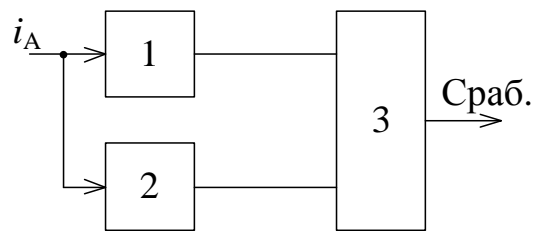


Рисунок 5.11 – Структурная схема быстродействующего ИО для АОДС ненаправленного действия

На рисунке 5.12 представлена структурная схема направленного реле тока для АОДС. Данная схема отличается лишь наличием органа направления мощности 4.

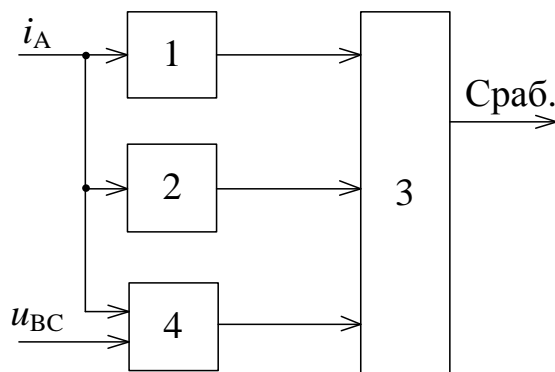


Рисунок 5.12 – Структурная схема быстродействующего ИО для АОДС направленного действия

На рисунке 5.13 представлена логическая схема АОДС. Реле тока устанавливается на каждую фазу.

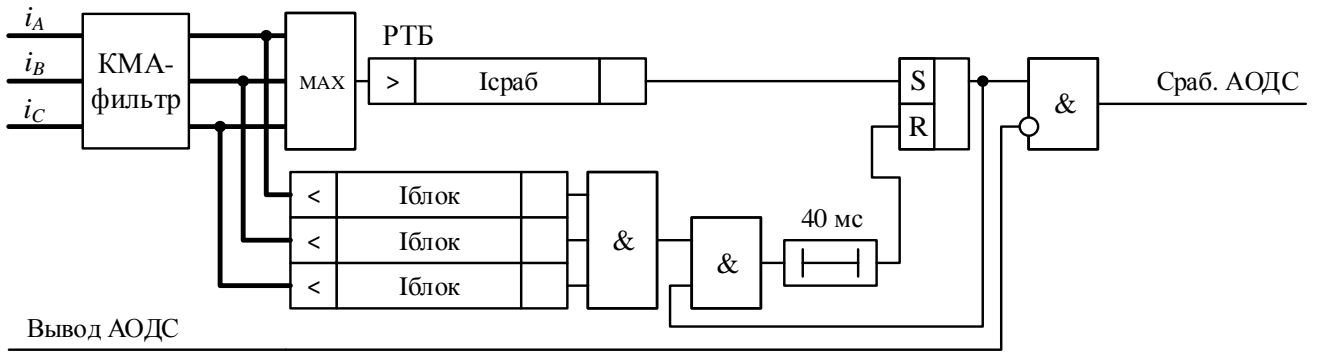


Рисунок 5.13 – Логическая схема АОДС

Для иллюстрации работы быстродействующего ИО тока сопоставим его с ИО, построенным на основе фильтра Фурье. На рисунке 5.14 представлена модельная осциллограмма тока КЗ, амплитудное значение периодической составляющей которого составляет 280 А. На рисунке 5.15 показаны временные диаграммы срабатывания. Из рисунка видно, что время срабатывания быстродействующего ИО на 3 мс меньше времени срабатывания ИО с фильтром Фурье. Уставки обоих ИО выбраны одинаковыми и равными 220 А.

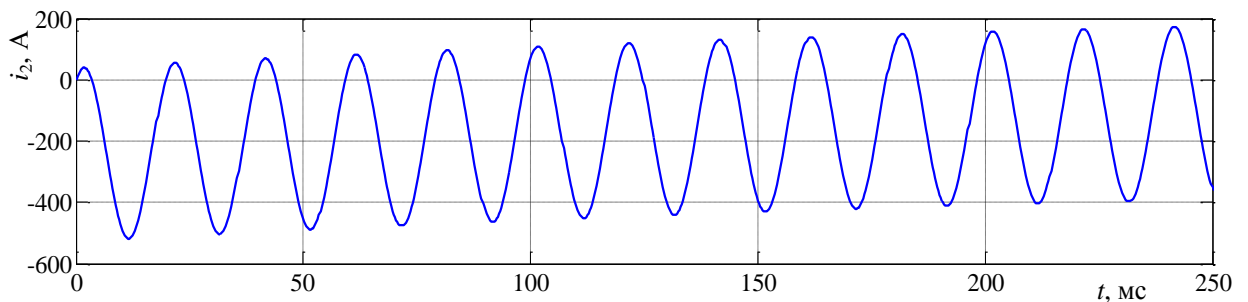


Рисунок 5.14 – Рассматриваемый сигнал

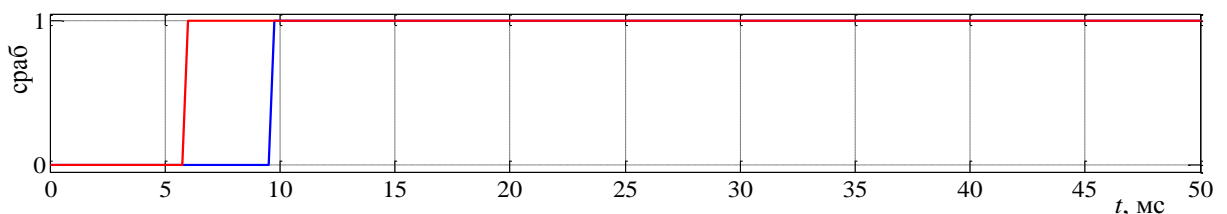


Рисунок 5.15 – Временные диаграммы срабатывания рассматриваемых измерительных органов

Однако намного лучше быстродействующий ИО проявляет себя в случае глубокого насыщения ТТ, характерного для близких КЗ с токами, превышающими отключающую способность выключателя. Так, на рисунке 5.16 приведена модельная осциллограмма нелинейно искажённого вследствие

насыщения ТТ вторичного тока. На рисунке 5.17 представлены времена срабатывания ИО.

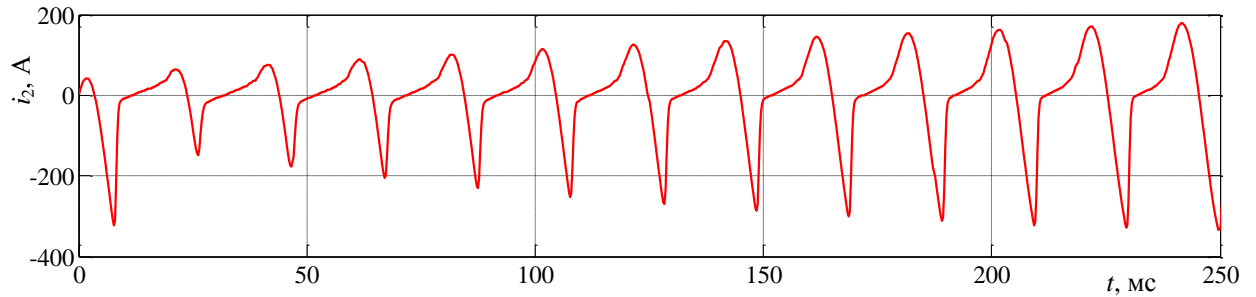


Рисунок 5.16 – Модельная осциллограмма насыщенного тока

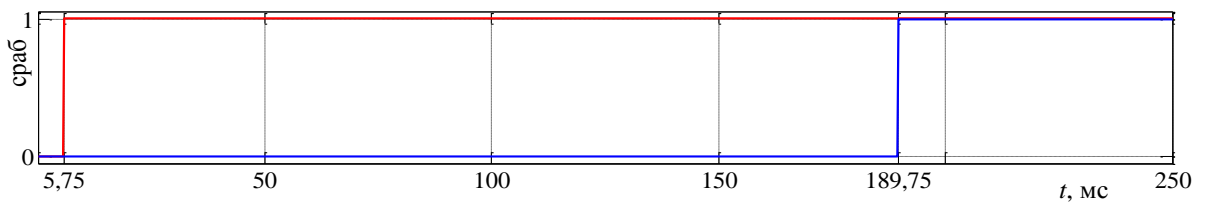


Рисунок 5.17 – Временные диаграммы срабатывания рассматриваемых измерительных органов

В данном случае время срабатывания быстродействующего ИО составляет всего 5,75 мс, в то время как токовая отсечка на основе фильтра Фурье выдаёт сигнал на отключение не ранее 190 мс от момента возникновения КЗ. Таким образом, на простом примере мы видим, что обычные токовые отсечки на базе фильтрации Фурье не могут быть применены для построения АОДС.

В настоящее время устройство АОДС реализовано на базе терминала микропроцессорной защиты типа «ТОР 300 АОДС 503», представленного на рисунке 5.18.



Рисунок 5.18 – Устройство «ТОР 300 АОДС 503», выполняющее функцию АОДС

Проведённые в лаборатории ИЦ «Бреслер» испытания показали, что типичное время срабатывания разработанной автоматики составляет 5 мс, максимальное – не превышает 11 мс. Условия эксперимента следующие. Уставки автоматики: $I_{сраб} = 1$ А; $I_{блок} = 0,6$ А. Кратность подаваемой периодической составляющей тока к уставке равна 1,2. Время срабатывания измерялось с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-51. Для измерения времени срабатывания на быстродействующие выходные реле конфигурировался сигнал срабатывания АОДС, этот сигнал заводился на дискретный вход РЕТОМа. Время измерялось в программе Comtrade.

Подавался ток $i_2(t) = 1,2\sqrt{2}(\sin(100\pi t) - \sin(150^\circ)e^{-t/0,1})$ с моделированием нелинейных искажений, вызванных насыщением измерительного ТТ. Осциллограмма тока представлена на рисунке 5.19.

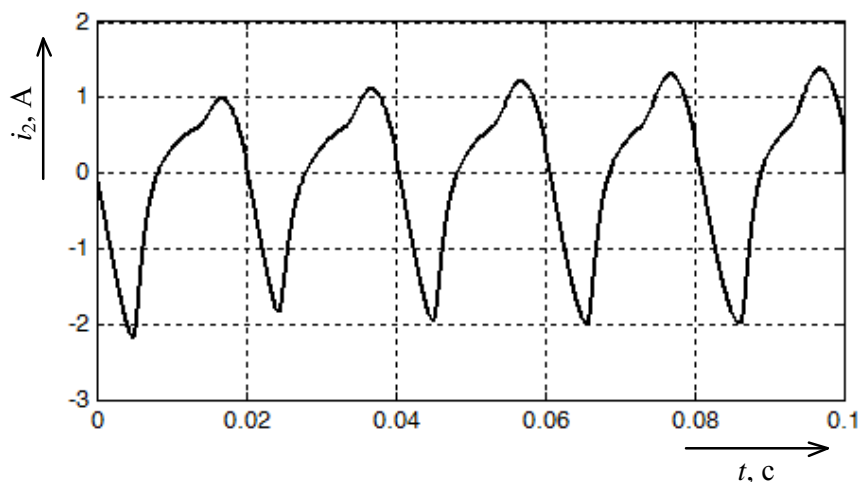


Рисунок 5.19 – Пример модельной осциллограммы нелинейно искажённого тока

Время срабатывания устройства АОДС в данном случае составило 3,8 мс. Аналогичным образом проверялось время срабатывания при других значениях тока. В таблицу 5.3 сведены полученные времена срабатывания при различном времени затухания экспоненциальной составляющей τ и различных углах синусоиды для сигналов без насыщения. В таблицу 5.4 сведены полученные времена срабатывания при различном времени затухания экспоненциальной составляющей τ и различных углах синусоиды для сигналов с насыщением.

Таблица 5.3 – Время срабатывания АОДС в режимах без насыщения, мс

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$\tau = 0,1 \text{ с}$	3,6	10,3	8,7	7,4	5,0	3,9	3,9	10,2	8,7	7,5	5,0	4,1
$\tau = 0,2 \text{ с}$	3,6	9,8	8,6	7,6	5,0	3,9	4,0	9,9	8,3	7,3	4,7	4,1
$\tau = 0,4 \text{ с}$	3,6	9,5	8,6	6,4	4,8	4,0	4,0	10,2	8,1	6,7	4,6	4,0

Таблица 5.4 – Время срабатывания АОДС в режимах с насыщением, мс

$\delta, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$\tau = 0,1 \text{ с}$	3,4	10,3	8,0	7,5	4,5	3,8	4,0	9,8	8,1	6,9	4,7	3,7
$\tau = 0,2 \text{ с}$	3,4	9,7	8,2	7,5	4,4	3,5	3,5	9,4	8,2	7,1	4,9	3,9
$\tau = 0,4 \text{ с}$	3,4	9,7	7,7	6,7	5,1	3,9	3,8	9,8	7,6	6,6	4,5	3,4

На рисунке 5.20 представлена зависимость времени срабатывания от угла: на рисунке 5.20а – для режимов без насыщения, на рисунке 5.20б – для режимов с насыщением.

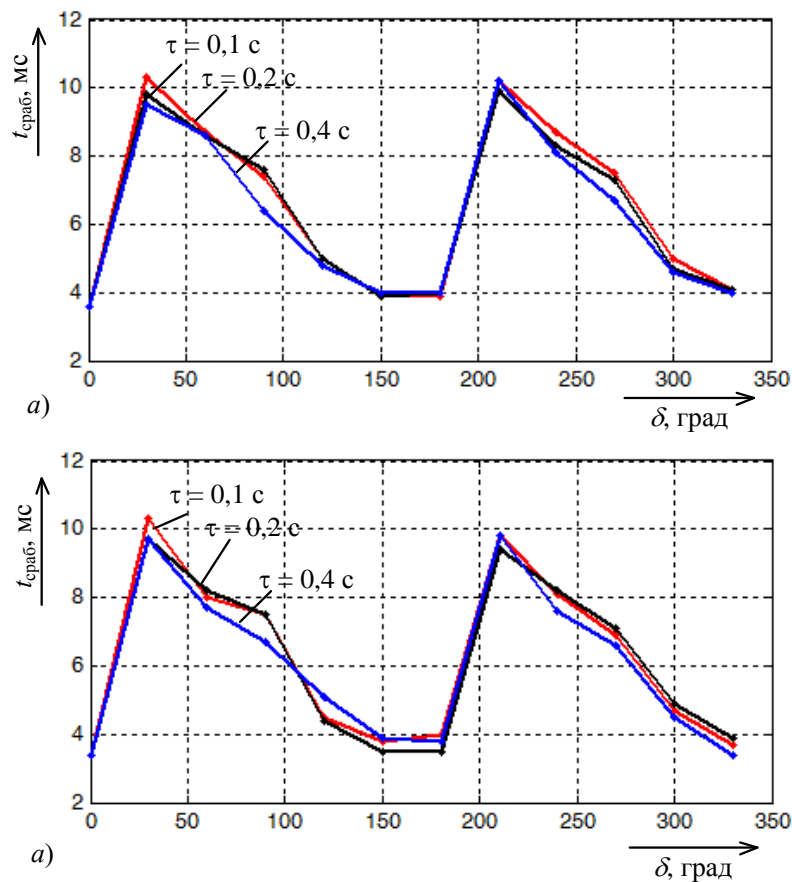


Рисунок 5.20 – Зависимость времени срабатывания АОДС в зависимости от угла включения: *а* – в режимах без насыщения; *б* – в режимах с насыщением

Автоматика введена в эксплуатацию на Южноуральской ГРЭС.

5.4 Выводы

1. Алгоритм адаптивной защиты с прямой адаптацией и применением многомерной дискретной структуры принят к внедрению в микропроцессорном терминале «ТОР 300 АДЗ 110». Защита сохраняет селективность при работе в режимах асинхронного хода.

2. Критерии локации повреждений и обработки сигналов на основе сингулярного спектрального анализа применены в разработке микропроцессорного терминала определения места повреждения при двухстороннем наблюдении «ТОР 300 ЛОК 220». Предложено применение совокупности критериев для устранения неоднозначности локации повреждений.

3. Обработка сигналов на основе кратномасштабного анализа внедрена в микропроцессорном терминале автоматики опережающего деления сети «ТОР 300 АОДС 503». Типичное время срабатывания автоматики составляет 5 мс, максимальное – не превышает 13 мс. Автоматика установлена в эксплуатацию на Южноуральской ГРЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Разработана многомерная дискретная структура для решения информационных задач релейной защиты. Выявлены основные закономерности, присущие таким структурам. Предложенная структура позволяет решить задачу окаймления многомерной области в пространстве произвольной размерности.

2. Исследовано явление нераспознаваемости трёхфазных коротких замыканий в асинхронных режимах линий электропередачи. Обнаружено различие последствий нераспознаваемости для задачи локации (определения места повреждения) и задачи дистанционной защиты (распознавания замыкания в защищаемой зоне).

3. Исследованы информационные аспекты адаптации в режимах коротких замыканий. Выделены два вида адаптации: прямая и косвенная. Косвенная адаптация заключается в применении априорной информации в замере защиты, прямая – в изменении характеристики срабатывания защиты в зависимости от априорной информации. Разработан алгоритм дистанционной защиты по способу прямой адаптации с применением многомерной дискретной структуры. Предложенный алгоритм обеспечивает предельно возможную распознающую способность защиты в режимах коротких замыканий на фоне асинхронного хода. Алгоритм принят к внедрению в микропроцессорном терминале «ТОР 300 АДЗ 110».

4. Исследованы информационные аспекты локации повреждений. Предложена наиболее общая модель повреждения, позволяющая моделировать все виды коротких замыканий, в том числе с обрывами проводов. Разработаны критерии локации повреждений многопроводной электрической сети при двухстороннем наблюдении, позволяющие определять места замыканий с обрывами проводов и места двойных замыканий на землю. Предложено использование совокупности критериев для повышения точности и исключения неопределённости локации повреждений.

5. Приведены новые информационные составляющие, названные нормальными и локальными токами, обнаруженные в полностью наблюдаемой системе. Разработан алгоритм локации повреждений с применением этих информационных составляющих процесса короткого замыкания.

6. Исследованы информационные аспекты цифровой обработки процессов. Разработаны алгоритмы дешумизации электрических сигналов в том виде, в котором они могут быть реализованы на базе микропроцессорных терминалов релейной защиты. Рассмотрены сингулярный спектральный анализ и кратномасштабный анализ. Сингулярный спектральный анализ применён для обработки стационарных сигналов, кратномасштабный анализ – нестационарных сигналов. Показана эффективность дешумизации как дополнение адаптивной обработки сигналов.

7. Критерии локации повреждений и обработки сигналов на основе сингулярного спектрального анализа применены в микропроцессорном терминале определения места повреждения при двухстороннем наблюдении «ТОР 300 ЛОК 220».

8. Обработка сигналов на основе кратномасштабного анализа внедрена в микропроцессорном терминале автоматики опережающего деления сети «ТОР 300 АОДС 503». Максимальное время срабатывания автоматики не превышает 11 мс. Автоматика установлена в эксплуатацию на Южноуральской ГРЭС.

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. Арцишевский, Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью / Я. Л. Арцишевский. М.: Высшая школа, 1988. – 95 с.
3. Атабеков, Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г. И. Атабеков. М.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.
4. Воробьёв, В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьёв, В. Г. Грибунин. СПб: Изд-во Военного ун-та связи, 1999. – 204 с.
5. Голяндина, Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов / Н. Э. Голяндина. СПб: Изд-во С.-Петербургского гос. ун-та, 2004. – 76 с.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2008. – 708 с.
7. Куликов, А. Л. Дистанционное определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования / А. Л. Куликов. М.: Энергоатомиздат, 2006. – 148 с.
8. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. М.: Наука, 1986. – 232 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. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. М.: Мир, 1990. – 584 с.
11. Неклепаев, Б. Н. Методы ограничения токов короткого замыкания в энергосистемах / Б. Н. Неклепаев. М.: Энергия, 1978. – 52 с.
12. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. М.: Мир, 1989. – 478 с.

13. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С. А. Ульянов. М.: Энергия, 1970. – 519 с.
14. Форсайт, Дж. Машинные методы математических вычислений / Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер. М.: Мир, 1980. – 280 с.
15. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
16. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
17. Шабад, М. А. Делительные защиты – автоматика деления при авариях / М. А. Шабад. Приложение к журналу «Энергетик», вып. 7, 2006 г.
18. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
19. Strang, Gilbert. Wavelets and filter banks / Gilbert Strang, Truong Nguyen. Wellesley-Cambridge Press, 1996. – 520 p.

Статьи

20. Антонов, В. И. Разрешающая способность метода наименьших квадратов при оценивании основной гармоники тока короткого замыкания / В. И. Антонов, Ю. Я. Лямец // Изв. вузов. Энергетика. – 1990. – №2. – С. 48-51.
21. Антонов, В. И. Эффективные структурные модели входных сигналов цифровой релейной защиты и автоматики / В. И. Антонов, В. А. Наумов, А. И. Фомин // Электричество. – 2012. – №11. – С. 2-8.
22. 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.
23. Дрёмин, И. М. Вейвлеты и их использование / И. М. Дрёмин, О. В. Иванов, В. А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – №5. – С. 465-501.

24. Ильин, В. А. Задачи и методы спектрального анализа переходных процессов в электрических сетях / В. А. Ильин, Ю. Я. Лямец // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. – №6. – С. 46-62.
25. Ильин, В. В. Режимы и уставки / В. В. Ильин, Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман // Динамика нелинейных электротехн. и электрон. систем: мат. V Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2003. – С. 262-265.
26. Караев, Р. И. О применении разностных уравнений длинной линии / Р. И. Караев, Ю. Я. Лямец // Электричество. – 1972. – №11. – С. 28-36.
27. Кужеков, С. Л. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – №3. – С. 29-31.
28. 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.
29. 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.
30. Куликов, А. Л. Алгоритмы подавления апериодической составляющей в аварийных токах / А. Л. Куликов, В. А. Фальшина, П. А. Колобанов // Электричество. – 2014. – №11. – С. 26-35.
31. 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.
32. Куцовский, С. М. Реле тока для автоматики опережающего деления сети / С. М. Куцовский, Е. П. Королёв // Электрические станции. – 1979. – №1. – С. 49-53.
33. 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.

34. Лямец, Ю. Я. Адаптивная цифровая обработка входных величин релейной защиты / Ю. Я. Лямец, В. И. Антонов, А. П. Арсентьев // Изв. академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – №6. – С. 51-59.

35. Лямец, Ю. Я. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. Ю. Широкин // Электричество. – № 4. – 2012. – С. 9-13.

36. Лямец, Ю. Я. Граничная задача релейной защиты / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 16-22.

37. Лямец, Ю. Я. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Ч. 1. Граничные условия и обучающие процедуры / Ю. Я. Лямец [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 24-30.

38. Лямец, Ю. Я. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Ч. 2. Обучение реле сопротивления / Ю. Я. Лямец [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 53-59.

39. Лямец, Ю. Я. Граничные режимы в методике обучения релейной защиты. Ч. 3. Обучение защит с абсолютной селективностью / Ю. Я. Лямец [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 53-58.

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. Кратномасштабный анализ процесса короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, Ю. В. Романов // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – №5. – С. 135-143.

43. Лямец, Ю. Я. Локация повреждений многопроводной сети при двухстороннем наблюдении / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов // Изв. РАН. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 96-107.
44. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч. 1. Теоретические предпосылки / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2009. – №10. – С. 17-25.
45. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч. 2. Анализ распознающей способности реле / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2009. – №11. – С. 9-15.
46. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч. 3. Эквивалентирование моделей / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2010. – №1. – С. 9-15.
47. 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.
48. 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.
49. Лямец, Ю. Я. Мониторинг процессов в электрической системе. Ч. 2. Цифровая обработка осциллограмм токов короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, Д. В. Зиновьев // Электричество. – 2006. – № 11. – С. 2-10.
50. Лямец, Ю. Я. Об информационной теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец [и др.] // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2009. – № 1. – С. 32-44.
51. Лямец, Ю. Я. Об информационной теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман // Релейщик. – 2009. – № 3. – С. 36-37.
52. Лямец, Ю. Я. Обучаемая релейная защита. Ч. 1. Методы условных отображений / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 15-19.
53. Лямец, Ю. Я. Обучаемая релейная защита. Ч. 2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 12-18.
54. Лямец, Ю. Я. Объектные характеристики дистанционной защиты / Ю. Я. Лямец, Н. В. Николаева, А. О. Павлов // Материалы II Всеросс. научно-

техн. конф. «Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике». – Чебоксары, Чуваш. ун-т., 1998. – С. 141-144.

55. 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.

56. 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.

57. Лямец, Ю. Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 1. Распознаваемость места повреждений / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2001. – № 2. – С. 16-23.

58. Лямец, Ю. Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 2. Общие вопросы распознаваемости поврежденных фаз / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2001. – № 3. – С. 16-24.

59. Лямец, Ю. Я. Распознаваемость повреждений электропередачи. Ч. 3. Распознаваемость междуфазных коротких замыканий / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 9-22.

60. Лямец, Ю. Я. Распознавание противостоящих режимов электрической системы / Ю. Я. Лямец [и др.] // Нелинейный мир. – 2011. – №9. – Т.9. – С. 600-606.

61. Лямец, Ю. Я. Сингулярный анализ процессов в электрических системах / Ю. Я. Лямец [и др.] // Изв. РАН. Энергетика. – 2012. – №5. – С. 22-29.

62. 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.

63. Лямец, Ю. Я. Формирование информационной базы в многомерной релейной защите / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов // Известия АЭН РФ. – 2010. – №1. – С. 6-14.

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

65. Лямец, Ю. Я. Эффекты многомерности при обучении релейной защиты / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 48-54.
66. Нагай, В. И. Адаптивные измерительные органы аварийных составляющих резервных защит электрических распределительных сетей / В. И. Нагай, В. В. Нагай, И. В. Нагай // Совр. напр. разв. систем релейной защиты и автоматики энергосистем. – 2009. – С. 134-140.
67. Пивоваров, П. И. Применение вейвлет-анализа для задач фильтрации цифровых шумов / П. И. Пивоваров, Ю. В. Бычков // Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. 8-й Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та. – 2012. – С. 239-240.
68. Хо, Дя-Ли. Новый принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения / Хо Дя-Ли [и др.] // Электричество. – 2015. – № 2. – С. 17-21.
69. Alexandrov, T. A Method of Trend Extraction Using Singular Spectrum Analysis / T. Alexandrov // REVSTAT – Statistical Journal. – 2009. – V. 7. – №1. – P. 1-22.
70. Baussard, A. Rational multiresolution analysis and fast wavelet transform: application to wavelet shrinkage denoising / A. Baussard, F. Nicolier, F. Truchetet // Signal Processing. – 2004. – №84. – P. 1735-1747.
71. Bozek, M. Adaptive distance protection of double-circuit lines based on differential equation fault loop model / M. Bozek, J. Izykowski // Universities Power Engineering Conference. UPEC, 43rd International. – 2008. – P. 1-5.
72. Calero, F. Adaptive Phase and Ground Quadrilateral Distance Elements / F. Calero, A. Guzman, G. Benmoual // 36th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA. – 2009. – P. 1-18.
73. 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.

74. Figueiredo, M. B. Wavelet Decomposition and Singular Spectrum Analysis for Electrical Signal Denoising / M. B. Figueiredo, A. de Almeida, B. Ribeiro // Systems, Man, and Cybernetics. IEEE International Conference on. – 2011. – P. 3329-3334.
75. Hassani, H. Singular Spectrum Analysis: Methodology and Comparison / H. Hassani // Journal of Data Science. – 2007. – №5. – P. 239-257.
76. He, Z. Fault detection and classification in EHV transmission line based on wavelet singular entropy / Z. He [et al.] // IEEE Trans. Power Delivery. – 2010. – V. 25. – №4. – P. 2156-2163.
77. Hu, Yi. Improving Parallel Line Distance Protection with Adaptive Techniques / Yi Hu [et al.] // IEEE. Power Engineering Society Winter Meeting. – 2000. – V. 3. – P. 1973-1978.
78. 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.
79. Izykowski, J. Accurate Non-Iterative Fault Location Algorithm for Three-Terminal Line / J. Izykowski, E. Rosolowski // Electrical and Electronics Engineering. ELECO 2009. International Conference on. – 2009. – P. 154-158.
80. Izykowski, J. Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end / J. Izykowski, E. Rosolowski, M. Saha // IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. – 2009. – V. 151. – №2. – P. 268-273.
81. Jarchi, D. Singular Spectrum Analysis for Gait Patterns / D. Jarchi, G.-Z. Yang // IEEE International Conference on, USA, Cambridge. – 2013. – P. 1-6.
82. Liamets, Y. The phenomena of uncertainty and ambiguity in identification of faults in electrical systems / Y. Liamets, S. Ivanov, G. Nudelman // SIGRE SC B5 Colloquium, Calgary, Canada. – 2005. – Paper 313. – P. 1-7.
83. Makwana, V. H. A New Digital Distance Relaying Scheme for Compensation of High-Resistance Faults on Transmission Line / V. H. Makwana, B. R. Bhalja // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27. – №4. – P. 2133-2140.

84. 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.
85. Mohamed, D. Accurate Fault Location Algorithm on Power Transmission Lines with use of Two-end Unsynchronized Measurements / D. Mohamed, S. Houari, T. Bouthiba // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2012. – V. 9. – №2. – P. 189-200.
86. Moore, P. J. Adaptive Digital Distance Protection / P. J. Moore, A. T. Johns // Developments in Power Systems Protection. 4th International Conference on. – 1989. – P. 187-191.
87. Osman, A. H. Transmission Line Distance Protection Based on Wavelet Transform / A. H. Osman, O. P. Malik // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – V. 19. – №2. – P. 515-523.
88. 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.
89. Sachdev, M. S. A new algorithm for digital impedance relays / M. S. Sachdev, M. A. Baribeau // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1979. – V. PAS-98. – № 6. – P. 2232-2240.
90. Saha, M. M. A New Fault Location Algorithm for Use With Current Differential Protective Relays of Series Compensated Transmission Lines / M. M. Saha, E. Rosolowski, J. Izykowski // Developments in Power Systems Protection DPSP. 11th International Conference on. – 2012. – P. 1-8.
91. Su, B. Fast Detector of Symmetrical Fault during Power Swing for Distance Relay / B. Su, X. Z. Dong, Z. Q. Bo, Y.-Z. Sun // Power Engineering Society General Meeting. – 2005. – V. 2. – P. 1836-1841.
92. Tay, P. C. Frequency implementation of Discrete Wavelet Transforms / P. C. Tay, J. P. Havlicek // Image Analysis and Interpretation. 6th IEEE Southwest Symposium on. – 2004. – P. 167-171.

93. 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.

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

95. Xia, Y. Q. Adaptive Relay Setting for Stand-Alone Digital Distance Protection / Y. Q. Xia, K. K. Li, A. K. David // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – V. 9. – №1. – P. 480-491.

96. Yan, L. Research of One New Adaptive Mho Relay / L. Yan, C. Deshu, Y. Xianggen // Power System Technology. International Conference on. – 2002. – V. 4. – P. 2604-2607.

97. Zhizhe, Zhang. An Adaptive Approach in Digital Distance Protection / Zhang Zhizhe, Chen Deshu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1991. – V. 6. – №1. – P. 135-142.

98. Zimmerman, K. Impedance-Based Fault Location Experience / K. Zimmerman, D. Costello // Protective Relay Engineers, 58th Annual Conference for. – 2005. – P. 211-226.

99. РД 34.20.175. Указания по ограничению токов короткого замыкания в сетях напряжением 110 кВ и выше, решение №36 от 9 апреля 1976 г.

Патенты

100. Дистанционный способ защиты и автоматики линии электропередачи [Текст] : пат. 2066511 Российская Федерация : .МПК H02H3/40, G01R31/08 / Лямец Ю. Я., Антонов В. И., Ефремов В. А., Нудельман Г. С. ; заявитель и патентообладатель Лямец Ю. Я., Антонов В. И., Ефремов В. А., Нудельман Г. С. – № 5055129/07; заявл. 16.07.1992 ; опубл. 10.09.1996. – 15 с.

101. 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.

сельскохозяйств. произв. – № 3362509/18-21 ; заявл. 09.12.1981 ; опубл. 23.05.1983, Бюл. № 19. – 3 с.

102.Способ выделения аварийной слагаемой тока короткого замыкания [Текст] : пат. 2035815 Российская Федерация : МПК H02H3/38, H02H7/26, H01H83/22 / Лямец Ю. Я., Ефремов В. А., Ильин В. А. ; заявитель и патентообладатель Чувашский гос. унив. им. И. Н. Ульянова. – № 5058747/07 ; заявл. 14.08.1992 ; опубл. 20.05.1995. – 9 с.

103.Способ выделения ортогональных составляющих тока короткого замыкания [Текст] : пат. 2030052 Российская Федерация : МПК H02H3/40, H01H83/22 / Лямец Ю. Я., Сидиряков Е. В. ; заявитель и патентообладатель Чувашский гос. унив. им. И. Н. Ульянова. – № 5058184/07 ; заявл. 07.08.1992 ; опубл. 27.02.1995. – 9 с.

104.Способ дистанционной защиты линии электропередачи [Текст] : пат. 2248077 Российская Федерация : МПК H02H3/40 / Лямец Ю. Я., Нудельман Г. С., Ефимов Е. Б., Ефремов В. А. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2002126894/28 ; заявл. 07.10.2002 ; опубл. 10.03.2005, Бюл. № 7. – 9 с.

105.Способ определения интервалов однородности электрической величины [Текст] : пат. 2418268 Российская Федерация : МПК G01D/06, G01R31/02 / Куликов А. Л. ; заявитель и патентообладатель Куликов А. В. – № 2010108840/28 ; заявл. 09.03.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13. – 7 с.

106.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.

107.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.

108.Способ определения места повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении [Текст] : пат. 2492565 Российская Федерация : МПК Н02Н3/28 / 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.

109.Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двухстороннем наблюдении [Текст] : пат. 2492493 Российская Федерация : МПК G01R31/08 / Лямец Ю. Я., Романов Ю.В, Воронов П.И., Исмуков Г.Н. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2011147688/28 ; заявл. 23.11.2011 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25. – 11 с.

110.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.

111.Способ релейной защиты энергообъекта [Текст] : пат. 2247456 Российская Федерация : МПК Н02Н3/40 / Лямец Ю. Я., Ефимов Е. Б., Нудельман Г. С. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2002121184/28 ; заявл. 05.08.2002 ; опубл. 27.02.2005, Бюл. № 6. – 9 с.

112.Способ сверхбыстродействующей аварийной защиты элементов электроэнергетических систем переменного тока и устройство для его осуществления [Текст] : пат. 2400899 Российская Федерация : МПК Н02Н7/26, Н02Н3/28 / Кужеков С. Л., Пекарский А. А. ; заявитель и патентообладатель Гос. образов. учрежд. высш. проф. Образования «Южно-Российский гос. техн. ун-т (Новочеркасский политех. инст.). – № 2009123086/09 ; заявл. 16.06.2009 ; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 27. – 9 с.

113. Устройство для выбора повреждённой фазы для защиты воздушной линии электропередачи от короткого замыкания [Текст] : авт. свид. 1148071 СССР : МПК H02H7/26, G01R31/08 / Ермоленко В. М., Любарский Д. Р. ; заявитель и патентообладатель Всесоюз. гос. проектно-изыскат. и науч.-исслед. инст. энерг. систем и электр. сетей «Энергосетьпроект». – № 3665152/24-07 ; заявл. 25.11.1983 ; опубл. 30.03.1985, Бюл. № 12. – 4 с.

114. Устройство для выбора повреждённых фаз в трёхфазной электрической сети переменного тока [Текст] : авт. свид. 1374324 СССР : МПК H02H3/26 / Петров С. Я., Любарский Д. Р. ; заявитель и патентообладатель Всесоюз. гос. проектно-изыскат. и науч.-исслед. инст. энерг. систем и электр. сетей «Энергосетьпроект». – № 4122175/24-07 ; заявл. 19.09.1986 ; опубл. 15.02.1988, Бюл. № 6. – 5 с.

115. Устройство для выделения ортогональных составляющих электрических величин [Текст] : авт. свид. 1744733 СССР / Лямец Ю. Я., Антонов В. И. ; заявитель и патентообладатель Чувашский гос. унив. им. И.Н. Ульянова и Всесоюз. науч.-исслед., проектн.-констр. инст. релестроения. – № 4703209/07 ; заявл. 08.06.1989 ; опубл. 30.06.1992, Бюл. № 24. – 6 с.

116. Устройство для защиты высоковольтных линии передачи от замыканий между фазами [Текст] : авт. свид. 66343 СССР / Бреслер А. М. ; заявитель и патентообладатель Бреслер А. М. – заявл. 23.12.1944. – 3 с.

117. 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.

118. Формирователь доаварийной слагаемой тока (напряжения) [Текст] : авт. свид. 1817153 СССР / Лямец Ю. Я., Антонов В. И., Ахметзянов С. Х. ; заявитель и патентообладатель Чувашский гос. унив. им. И.Н. Ульянова и Всесоюз. науч.-исслед., проектн.-констр. инст. релестроения. – № 4942413/07 ; заявл. 18.04.1991 ; опубл. 23.05.1993, Бюл. № 19. – 6 с.

119. Adaptive distance protection system [Text] : пат. 5956220 США : МПК H02H3/00 / D. Novosel, Yi Hu, M. M. Saha ; заявитель и патентообладатель ABB Power T&D Company, Inc., ABB Network Partner AB ; заявл. 05.02.1998 ; опубл. 21.09.1999. – 14 с.

120. Adaptive protection algorithm and system [Text] : пат. 7525782 США : МПК H02H7/00 / P. Hedrick, H. L. Toms, R. M. Miller ; заявитель и патентообладатель United States Department of Energy ; заявл. 31.03.2005 ; опубл. 28.04.2009. – 7 с.

121. Adaptive quadrilateral characteristic distance relay [Text] : пат. 5796258 США : МПК H02H3/38, G01R31/02 / L. Yang ; заявитель и патентообладатель ABB Power T&D Company, Inc. ; заявл. 30.01.1997 ; опубл. 18.08.1998. – 14 с.

122. Adaptive regulating method for preventing overload mis-operation by distance protection [Text] : пат. 101335450 КНР : МПК H02H7/26 / Wu Xiaogang [et al.] ; заявитель и патентообладатель NARI Technology Development Co., Ltd. – 200810024418.0 ; заявл. 21.03.2008 ; опубл. 14.07.2010. – 10 с.

123. Adaptive weak power supply mode longitudinal protection method [Text] : пат. 101986495 КНР : МПК H02H7/26 / L. Zhang [et al.] ; заявитель и патентообладатель State Grid Electric Power Research Institute. – 201010588710.2 ; заявл. 15.12.2010 ; опубл. 10.04.2013. – 9 с.

124. Digital distance relay [Text] : пат. 1168558 EP : МПК H02H3/40 / M. Tetsuo, A. Hidenari, S. Hiroshi [et al.] ; заявитель и патентообладатель Kabushiki Kaisha Toshiba. – JP2000194556 ; заявл. 28.06.2000 ; опубл. 02.01.2002. – 27 с.

125. Distance relay measured by variable of operating frequency [Text] : пат. 86107283 КНР : МПК H02H7/26 / S. Guorong, A. Lee, Zhu S. ; заявитель и патентообладатель Nanjing Automation Research Institute of Ministry of Water Resources ; заявл. 23.10.1986 ; опубл. 04.05.1988. – 8 с.

126. 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.

127. Electrical power system phase and ground protection using an adaptive quadrilateral characteristics [Text] : пат. 8410785 США : МПК G01R31/14 / J. F. Calero, A. Guzman-Casillas, G. Benmouyal ; заявитель и патентообладатель Schweitzer Engineering Laboratories Inc. ; заявл. 17.09.2010 ; опубл. 02.04.2013. – 20 с.

128. Fault detecting system for locating a fault point with a fault resistance separately measured [Text] : пат. 4313169 США : МПК G01R31/08, G06F15/56 / Т. Takagi, Y. Yamakoshi ; заявитель и патентообладатель Tokyo Denryoku Kabushiki Kaisha ; заявл. 03.08.1979 ; опубл. 26.01.1982. – 13 с.

129. 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.

130. Longitudinal line protection device to protect the high-impedance ground zero sequence phase selection method [Text] : пат. 102769279 КНР : МПК H02H7/26 / Yue Wei [et al.] ; заявитель и патентообладатель NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing NARI Group Corporation. – 201210255725.6 ; заявл. 23.07.2012 ; опубл. 10.08.2014. – 10 с.

131. Method and adaptive distance protection relay for power transmission lines [Text] : пат. 7872478 США : МПК G01R31/00, H02H3/00 / Saha M., Rosolowski E., Izykowski J. ; заявитель и патентообладатель ABB Technology Ltd. ; заявл. 21.12.2006 ; опубл. 18.01.2011. – 13 с.

132. 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.

133. 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.

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

135. Method for realizing longitudinal distance protection at adaptive weak power side [Text] : пат. 101764396 КНР : МПК H02H7/26 / Xi Wei [et al.] ; заявитель и патентообладатель Shenzhen NARI Technologies Co., Ltd. – 200910113655.9 ; заявл. 30.12.2009 ; опубл. 13.06.2012. – 10 с.

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

137. Ultra-high-speed relay [Text] : пат. 4450497 США : МПК H02H3/40 / А. М. Bignell ; заявитель и патентообладатель Westinghouse Canada ; заявл. 22.10.1982 ; опубл. 22.05.1984. – 13 с.

Авторефераты диссертаций

138. 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.

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

140. Ефремов, В. А. Адаптивный дистанционный принцип защиты и автоматики линий электропередачи и средства его реализации: автореф. дис. ... к-та техн. наук. СПбГТУ, СПб, 1993. – 28 с.

141. Зиновьев, Д. В. Развитие теории информационного анализа процессов в электрических системах и ее приложение к релейной защите: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2009. – 24 с.

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

143. 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.

144. 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.

145. Романов, Ю. В. Метод информационного анализа процессов в электрических системах в приложении к защитах генераторов и линий электропередачи: автореф. дис. ... к-та техн. наук. Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2009. – 24 с.

Диссертации

146. Лямец, Ю. Я. Адаптивные реле: теория и приложения к задачам релейной защиты и автоматики электрических систем: дис. ... д-ра техн. наук. Научно-исслед. инст. электроэнергетики РФ, М., 1994. – 538 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ
ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ НАБЛЮДЕНИИ**

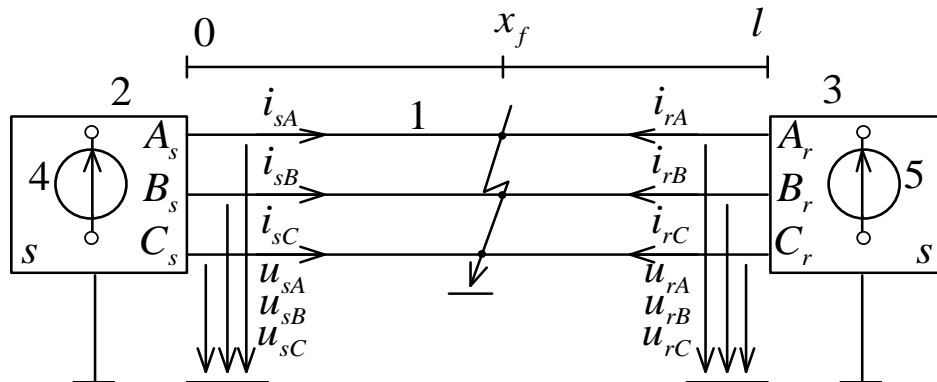


Рисунок А.1 – Схема линии электропередачи с неизвестным местом повреждения

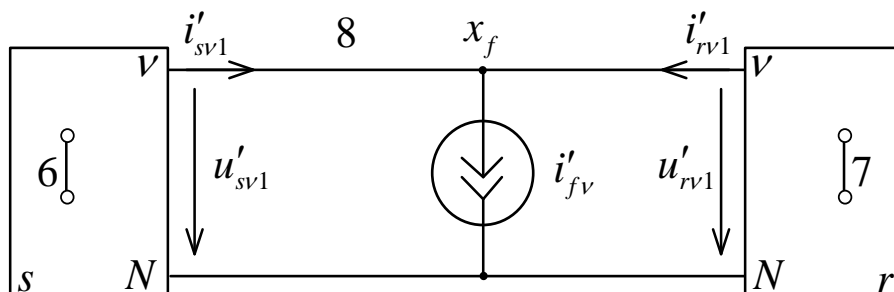


Рисунок А.2 – Двухпроводная модель прямой последовательности для произвольной фазы

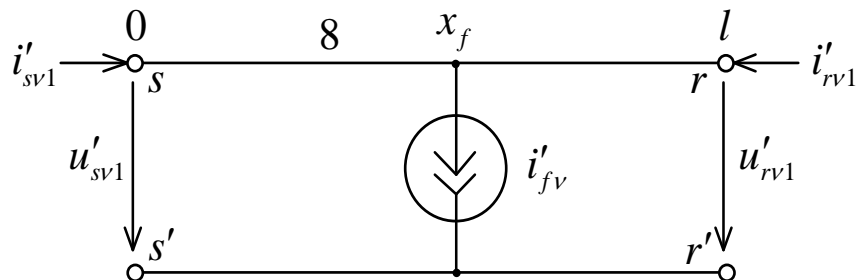


Рисунок А.3 – Выделенная локальная двухпроводная модель

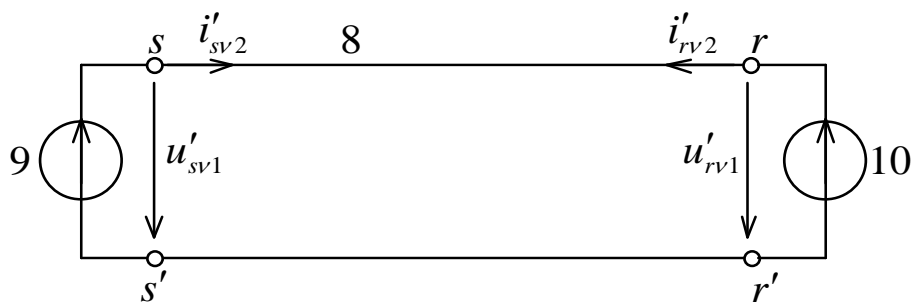


Рисунок А.4 – Локальная модель в пассивном режиме

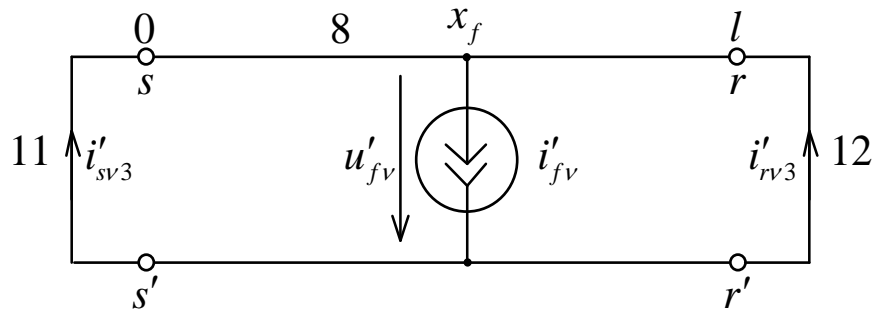


Рисунок А.5 – Локальная модель в активном режиме

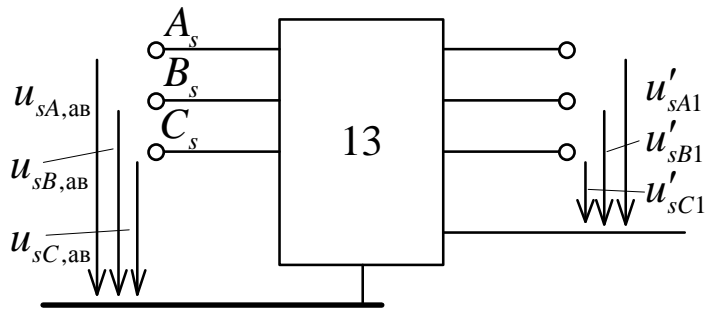


Рисунок А.6 – Формирование первых напряжений из аварийных составляющих начала линии

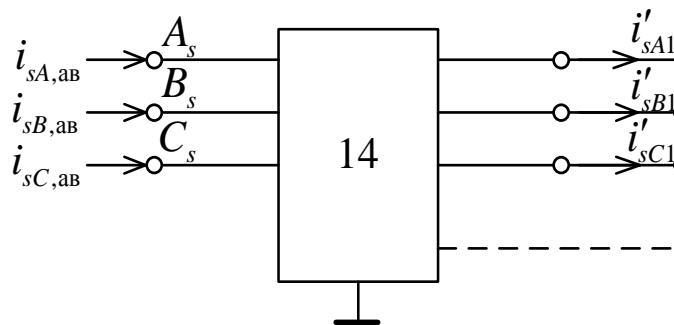


Рисунок А.7 – Формирование первых токов из аварийных составляющих начала линии

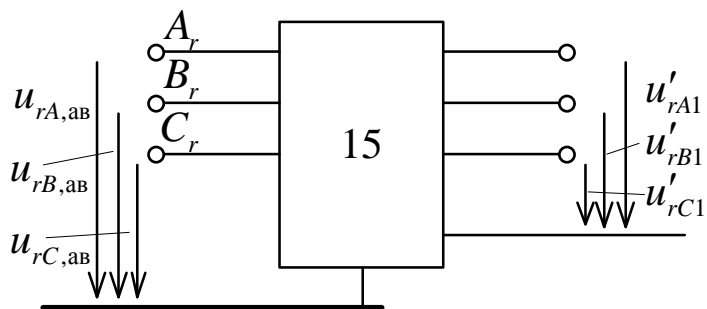


Рисунок А.8 – Формирование первых напряжений из аварийных составляющих конца линии

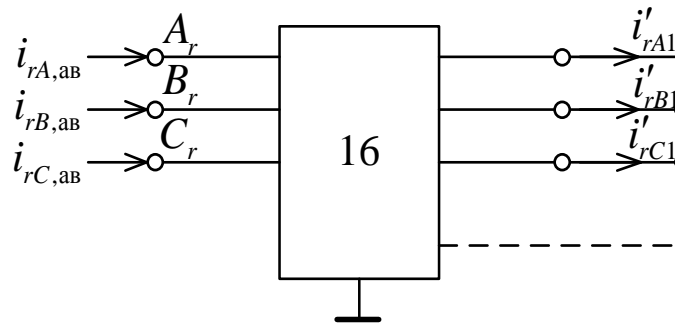


Рисунок А.9 – Формирование первых токов из аварийных составляющих конца линии

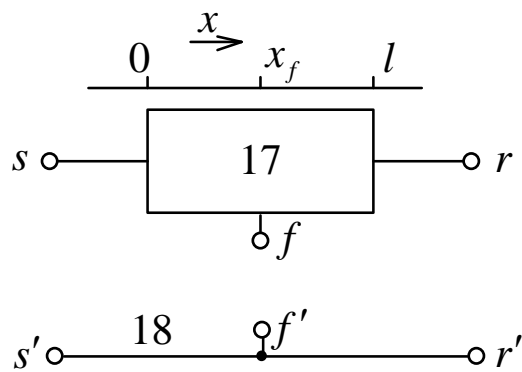


Рисунок А.10 – Двухпроводная модель электропередачи произвольного вида

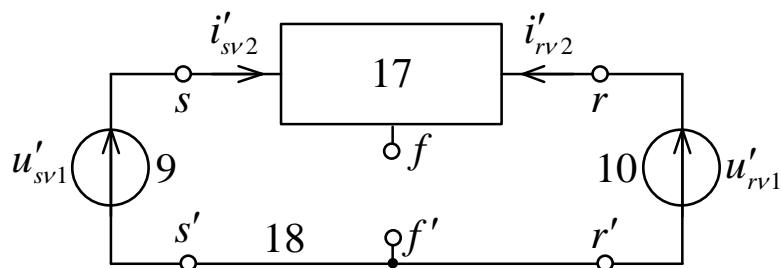


Рисунок А.11 – Двухпроводная модель электропередачи произвольного вида в пассивном режиме

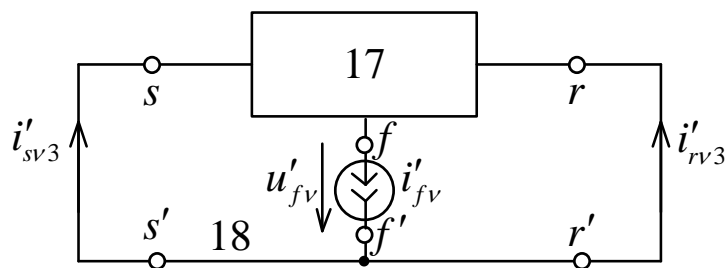


Рисунок А.12 – Двухпроводная модель электропередачи произвольного вида в активном режиме

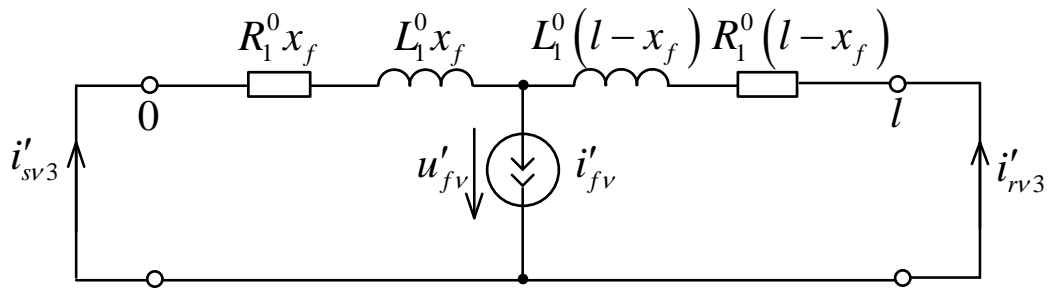


Рисунок А.13 – Простейшая двухпроводная модель

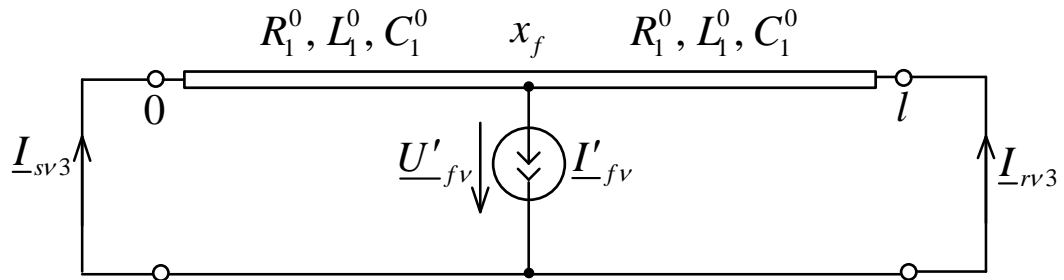


Рисунок А.14 – Двухпроводная модель с учётом распределённых параметров

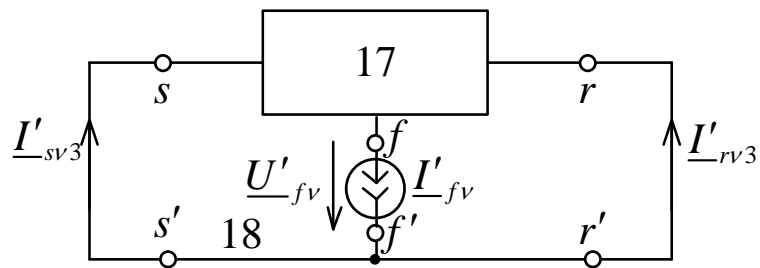


Рисунок А.15 – Неоднородная модель

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. СПОСОБ ЗАДАНИЯ УСЛОВИЙ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Предположим, в результате обучения получено множество граничных сигналов, образующих граничную линию, окаймляющую область отображения режимов срабатывания.

В рабочем режиме на вход реагирующего органа поступает текущий двумерный сигнал \mathbf{z}_T . Необходимо определить, попадает ли этот сигнал в область срабатывания. В основе работы способа лежит принцип отбора сигналов характеристики срабатывания для сравнения с ними текущего сигнала \mathbf{z}_T . Каждый двумерный сигнал имеет горизонтальную и вертикальную составляющие z_1 и z_2 . У сигнала \mathbf{z}_T имеются составляющие z_{T1} и z_{T2} . Из всех сигналов характеристики срабатывания отбираются четыре отдельных сигнала (рисунок Б.1) или четыре пары сигналов (рисунок Б.2) верхнего, нижнего, правого и левого типа. Сигналы каждого типа выбираются из подмножества граничных сигналов характеристики срабатывания, отвечающих условиям

$$z_{B2} > z_{T2}, \quad (\text{Б.1})$$

$$z_{H2} < z_{T2}, \quad (\text{Б.2})$$

$$z_{П1} > z_{T1}, \quad (\text{Б.3})$$

$$z_{Л1} > z_{T1}, \quad (\text{Б.4})$$

где индексы "в", "н", "п" и "л" обозначают соответствующие типы. Единственный сигнал каждого типа (рисунок Б.1) должен отвечать дополнительному требованию

$$|z_{B1} - z_{T1}| \rightarrow \min_{z_B}, \quad (\text{Б.5})$$

$$|z_{H1} - z_{T1}| \rightarrow \min_{z_H}, \quad (\text{Б.6})$$

$$|z_{П2} - z_{T2}| \rightarrow \min_{z_П}, \quad (\text{Б.7})$$

$$|z_{Л2} - z_{T2}| \rightarrow \min_{z_Л}, \quad (\text{Б.8})$$

где z_B , z_H , z_P и z_L – сигналы, отвечающие соответственно условиям (Б.1), (Б.2), (Б.3), (Б.4). Операции (Б.5)-(Б.8) оставляют из всего множества всего четыре сигнала, которые отмечены на рисунке Б.1 крупными точками, и условия срабатывания сводятся к последним четырём операциям сравнения

$$z_{T2} \leq z_{B2}, \quad (\text{Б.9})$$

$$z_{T2} \geq z_{H2}, \quad (\text{Б.10})$$

$$z_{T1} \leq z_{P1}, \quad (\text{Б.11})$$

$$z_{T1} \geq z_{L1}, \quad (\text{Б.12})$$

в которых задействованы только эти оставшиеся сигналы.

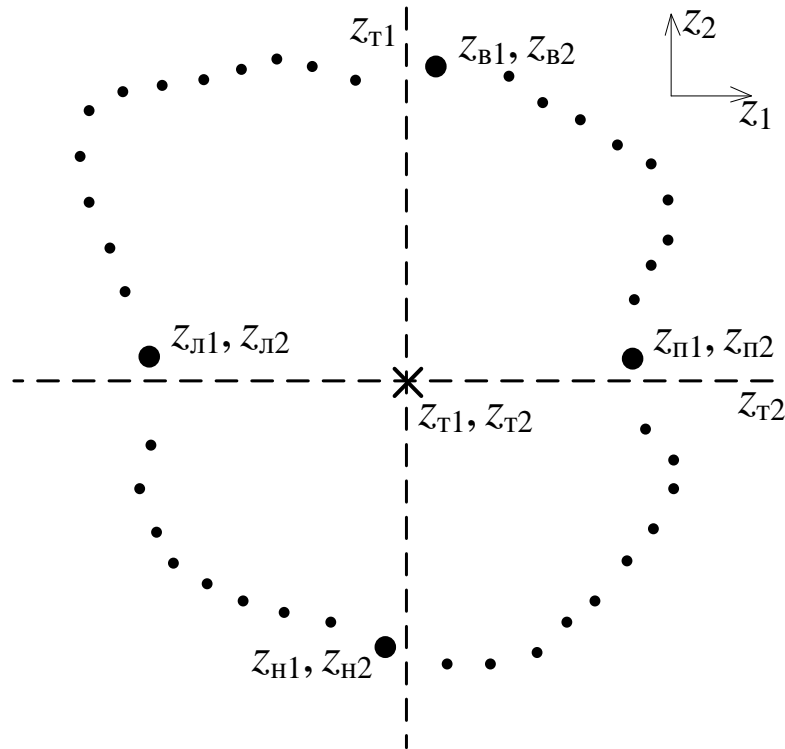


Рисунок Б.1 – Характеристика срабатывания и текущий режим

Разработана вторая модификация задания условий срабатывания защиты (рисунок Б.2), где каждый сигнал, подобранный по каждому из условий (Б.5)-(Б.8), дополняется его парой по правилу разных знаков

$$\text{sign}(z_{si}^+ - z_{Ti}) \neq \text{sign}(z_{si}^- - z_{Ti}), \quad (\text{Б.13})$$

где $i = 1, 2$, верхние индексы различают сигналы в паре, $s = B, H, P, L$ – общее обозначение стороны на той плоскости, где задаётся характеристика срабатывания.

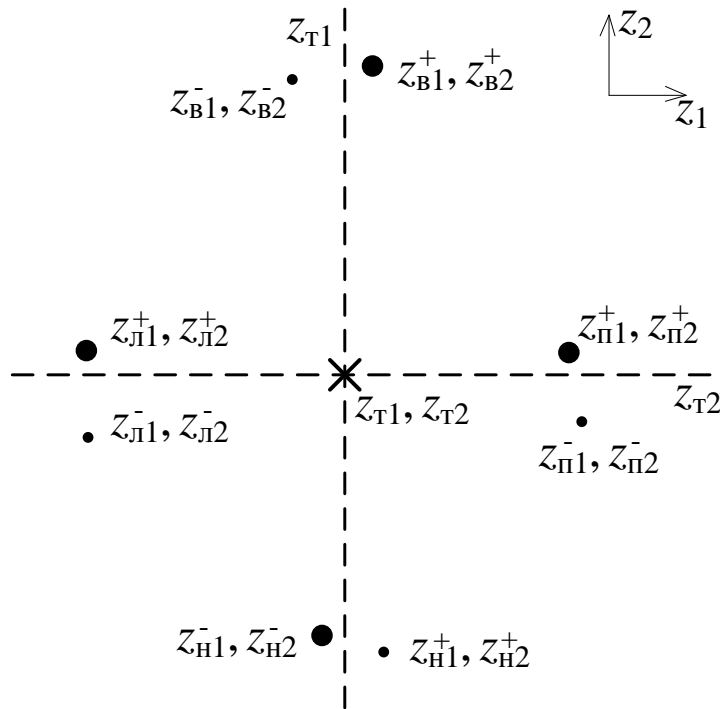


Рисунок Б.2 – Выбранные пары сигналов

Каждая пара сигналов задаёт свою уставку. Правило её определения проиллюстрировано на рисунке Б.3 для пары сигналов правой стороны. Уставка $z_{пу}$ определяется координатой точки пересечения двух прямых линий, одна соединяет точки $z_{п1}^+$ и $z_{п1}^-$, а вторая – линия $z_{т2} = \text{const}$. Обозначенные координаты связаны соотношением

$$\frac{z_{пу} - z_{п1}^-}{z_{п1}^+ - z_{п1}^-} = \frac{z_{т2} - z_{п2}^-}{z_{п2}^+ - z_{п2}^-},$$

откуда следует выражение уставки

$$z_{пу} = z_{п1}^- + \frac{(z_{п1}^+ - z_{п1}^-)(z_{т2} - z_{п2}^-)}{z_{п2}^+ - z_{п2}^-},$$

которое обобщается и для других сторон формулой

$$z_{sy} = z_{si}^+ + \frac{z_{si}^+ - z_{si}^-}{z_{sj}^+ - z_{sj}^-} (z_{tj} - z_{sj}^-), \quad (\text{Б.14})$$

где j – индекс второго сигнала в паре: если $i = 1$, то $j = 2$, а если $i = 2$, то $j = 1$.

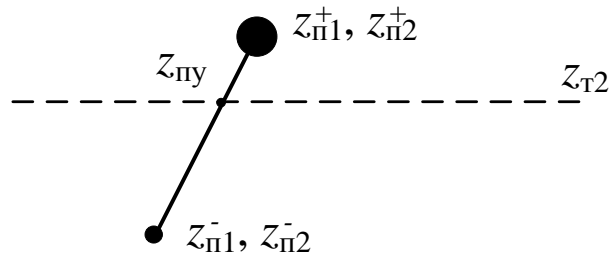


Рисунок Б.3 – Правило определения дополнительного сигнала

Условия срабатывания отличаются от (Б.9)-(Б.12) только правыми частями:

$$z_{т2} \leq z_{ву}, \quad (\text{Б.15})$$

$$z_{т2} \geq z_{ну}, \quad (\text{Б.16})$$

$$z_{т1} \leq z_{пу}, \quad (\text{Б.17})$$

$$z_{т1} \geq z_{лу}. \quad (\text{Б.18})$$

Предложенный способ легко реализуется в микропроцессорных терминалах релейной защиты. Значительную часть его операций составляет сравнение составляющих сигналов $\mathbf{z}_с$, образующих характеристику срабатывания, и составляющих текущего сигнала $\mathbf{z}_т$. Это операции (Б.1)-(Б.4), а также операции перебора текущих сигналов (Б.5)-(Б.8), проверки условий срабатывания (Б.9)-(Б.12) или (Б.15)-(Б.18) и операция сравнения знаков (Б.13).