

На правах рукописи



ВОРОНОВ Павел Ильич

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ И ЛОКАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Чебоксары 2015

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары).

Научный руководитель:

Лямец Юрий Яковлевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты:

Любарский Дмитрий Романович

доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе Открытого акционерного общества «Институт «ЭНЕРГОСЕТЫПРОЕКТ» (г. Москва)

Лачугин Владимир Фёдорович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике Открытого акционерного общества «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН», г. Москва)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород)

Защита состоится 4 декабря 2015 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в зале заседания Учёного совета (г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус (корпус № 3), третий этаж, к. 301).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя учёного секретаря диссертационного совета по адресу: 428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, (8352) 45-02-07, library@chuvsu.ru) и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан 19 октября 2015 г.

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.301.02, к.т.н.



Серебрянников
Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы работы. 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. Отсюда 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. Релейная защита во всё большей степени становится наукой о распознавании аварийных ситуаций в электрических системах. Терминалы защиты создают все необходимые предпосылки для реализации процедур адаптации и обучения. 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 алгоритмов РЗА, определением места сложных повреждений.

В диссертации разрабатываются методы эффективного использования всей имеющейся информации о наблюдаемом объекте и его режимах работы для задач 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. Результаты теоретических исследований использованы в разработках устройств РЗА, выполненных при участии автора в исследовательском центре (ИЦ) «Бреслер», где автора консультировали к.т.н. Ю.В. Романов, к.т.н. В.А. Ефремов, к.т.н. А.В. Шевелёв и к.т.н. М.В. Мартынов.

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.

Основные задачи, решаемые в работе. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Построение многомерной дискретной структуры для отображения информации и анализ её свойств.
2. Исследование информационных аспектов адаптации в режимах короткого замыкания в линиях электропередачи, в том числе на фоне асинхронного хода, и разработка на их основе адаптивной дистанционной защиты.

3. Исследование информационных аспектов локации повреждений в линиях электропередачи при двухстороннем наблюдении и разработка критериев определения места повреждения (ОМП).

4. Исследование информационных аспектов цифровой обработки наблюдаемых процессов и разработка способов дешумизации стационарных и нестационарных сигналов.

Основные методы научных исследований. Для решения поставленных задач применялись методы теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, вычислительной геометрии, цифровой обработки сигналов, математического и имитационного моделирования с использованием программного комплекса MATLAB.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием проверенных методов исследования, обсуждением основных результатов работы с отечественными и зарубежными специалистами, совпадением результатов математического моделирования и экспериментов, опытом применения.

Соответствие паспорту специальности. *Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» (технические науки): в диссертационной работе целью исследования является совершенствование теоретической и технической базы одной из областей электроэнергетики с целью обеспечения надёжной передачи электроэнергии, предметом исследований является алгоритмическая база РЗА, а именно многомерная дискретная структура для отображения информации о наблюдаемом объекте, способ построения адаптивной дистанционной защиты линий электропередачи, способы определения места повреждения в линиях электропередачи, способы дешумизации электрических сигналов для целей релейной защиты и локации повреждений.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02, а именно:

- к п.9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» относятся разработанная многомерная дискретная структура для отображения информации, способ построения адаптивной дистанционной защиты линий электропередачи, работоспособной при замыканиях в режимах асинхронного хода, способы определения места повреждения в линиях электропередачи при двухстороннем наблюдении, способы дешумизации электрических сигналов для целей релейной защиты и локации повреждений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура дискретного многомерного пространства для отображения информации о контролируемом объекте.
2. Способ прямой адаптации дистанционной защиты.
3. Критерии повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении.
4. Способы дешумизации электрических сигналов.

Научную новизну работы представляют:

1. Разработанная структура многомерного дискретного пространства для отображения информации и приложения такой структуры.
2. Разработанный способ адаптивной дистанционной защиты линий электропередачи, обеспечивающий селективную работу при коротком замыкании в асинхронном режиме.
3. Разработанные способы определения места повреждения в многопроводных системах при двухстороннем наблюдении, в том числе мест сложных повреждений (коротких замыканий с обрывами проводов, мест двойных замыканий).
4. Разработанные способы дешумизации наблюдаемых процессов на основе сингулярного анализа для стационарных процессов, на основе кратномасштабного анализа – для нестационарных процессов.

Практическую ценность диссертации представляют разработанные в ней:

1. Метод модификации характеристик релейной защиты (метод прямой адаптации), обеспечивающий высокую чувствительность при гарантированной селективности.
2. Методика построения адаптивной дистанционной защиты, обладающей повышенной распознающей способностью, в том числе при замыканиях в режимах асинхронного хода.
3. Критерии повреждений (коротких замыканий, в том числе с обрывами проводов) в линиях электропередачи при двухстороннем наблюдении.
4. Методика дешумизации электрических сигналов на основе сингулярного и кратномасштабного анализов, позволяющая повысить точность оценки ортогональных составляющих.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, проводимых в «ИЦ «Бреслер», и внедрены в различных устройствах релейной защиты, а именно:

1. Дистанционная защита с применением прямой адаптации – в микропроцессорном терминале защиты линий электропередачи «ТОР 300 АДЗ 110».
2. Функция определения места повреждения при двухстороннем наблюдении – в микропроцессорном терминале «ТОР 300 ЛОК 220».
3. Методика дешумизации электрических сигналов – в микропроцессорном терминале автоматики опережающего деления сети «ТОР 300 АОДС 503».

Личный вклад автора заключается в участии в разработке структуры многомерного дискретного пространства, в обнаружении различия в явлениях нераспознаваемости места и зоны повреждения, в разграничении методов прямой и косвенной адаптации, в обнаружении эффекта повышения распознающей способности адаптивной дистанционной защиты в режимах асинхронного хода при использовании прямой адаптации, в разработке критериев повреждения при двухстороннем наблюдении, в разработке способов дешумизации наблюдаемых процессов короткого замыкания.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и

республиканских конференциях: «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (СИГРЭ, г. Санкт-Петербург, 2011 г.; г. Екатеринбург, 2013 г.), «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Томск, 2014 г.), II Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (РЕЛАВЭКСПО, г. Чебоксары, 2013 г.), «Релейная защита и автоматизация» (г. Москва, 2014 г.), «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС, г. Чебоксары, 2011 г., 2013 г., 2015 г.), «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ, г. Чебоксары, 2010 г., 2012 г., 2014 г.), Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов академии электротехнических наук Чувашской Республики (г. Чебоксары, 2010 г., 2011 г., 2012 г.), «Человек. Гражданин. Учёный» (Ч.Г.У., г. Чебоксары, 2010 г.).

Публикации. Содержание диссертационной работы нашло отражение в 56 научных работах, среди которых 12 статей в изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых в SCOPUS, и 10 патентов на изобретения.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (146 наименований) и 2 приложений. Общий объём составляет 149 стр., в том числе основного текста 124 стр., 85 рисунков, 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена структура диссертации.

В первой главе приведён обзор источников, обобщена цель исследования, приведён понятийный аппарат, необходимый для описания информационных аспектов обеспечения селективности, чувствительности и быстродействия релейной защиты.

Задачи релейной защиты рассматриваются с позиций противостояния контролируемых и альтернативных режимов (α - и β -режимы) наблюдаемого объекта. Релейная защита, важнейшим из свойств которой является селективность, должна обеспечить срабатывание в как можно большей области α -режимов при гарантированной отстройке от всех β -режимов. Обеспечить селективность релейной защиты призвано её обучение с учителем. Учителем защиты является имитационная модель наблюдаемого объекта, воспроизводящая различные режимы, ограничиваемые областью определения объектных параметров G_α для контролируемых режимов и областью G_β для альтернативных. Эти объектные области задают вариации как нормальных $\mathbf{x}_{\text{норм}}$, так и аварийных параметров наблюдаемого объекта. К последним относятся переходное сопротивление R_f и координата места короткого замыкания x_f .

Процесс обучения с учителем включает в себя несколько операций (рис. 1). Первая – отображение на плоскости замера \mathbf{z} различных режимов имитационной модели $\mathbf{z}_\alpha = F(G_\alpha)$ и $\mathbf{z}_\beta = F(G_\beta)$. Вторая – процедура триангуляции – окаймление граничными линиями L_α и L_β областей отображения S_α и S_β соответственно α - и β -режимов. Третья – определение области срабатывания реле $S_{\alpha\alpha} = S_\alpha \setminus S_\beta$ как разности областей S_α и S_β . Наряду с областью $S_{\alpha\alpha}$ определяется ещё и важная для понимания свойств реле подобласть $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\beta$ – пересечения областей S_α и S_β , а возможно и $S_{\beta\beta} = S_\beta \setminus S_\alpha$.

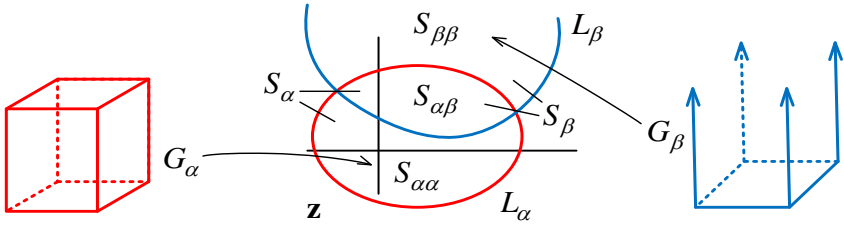


Рис. 1. Иллюстрация процедуры обучения релейной защиты

После проведения обучения оценивается распознающая способность релейной защиты путём построения объектной характеристики

$$R_{f \min \max}(x_f) = \min_{\mathbf{x}_{\text{norm}}} \max_{R_f} \arg[\mathbf{z}_\alpha(R_f, x_f, \mathbf{x}_{\text{norm}}) \in S_{\alpha\alpha}].$$

Распознающая способность релейной защиты имеет физический предел, обусловленный явлением нераспознаваемости коротких замыканий, которое объясняется неопределённостью или неоднозначностью решения уравнений защищаемого объекта в некоторых режимах его работы. Например, не распознаётся место трёхфазного замыкания в линии электропередачи без потерь, если его координата x_f и переходное сопротивление R_f связаны зависимостью

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

где l – длина линии, δ – угол передачи, X^0 – удельное индуктивное сопротивление. В тех местах x_f , где $R_{f \text{ нр}} < 0$, нераспознаваемость не проявляется. Алгоритм считается совершенным, если при данном объёме информации он способен распознать все режимы коротких замыканий, кроме физически нераспознаваемых. Зависимость (1) для простейшей имитационной модели позволяет оценить предел распознающей способности, обусловленный явлением неопределённости. В такой модели, отвечающей случаю симметричного трёхфазного замыкания, три варьируемых параметра: угол передачи δ , координата места замыкания x_f и переходное сопротивление R_f . Фиксированы удельное сопротивление X^0 , длина линии l . На рис. 2 представлены характеристики нераспознаваемости трёхфазных коротких замыканий для различных углов передачи. Нечётная функция (1) для угла δ даёт в первом и втором квадрантах зеркальные отражения зависимостей, построенных соответственно для четвёртого и третьего квадрантов. В четвёртом квадранте (рис. 2а) нераспознаваемость в зоне защиты адекватна нераспознаваемости мест замыкания. В первом квадранте, где $R_{f \text{ нр}} < 0$, нераспознаваемость не проявляется. В третьем квадранте (рис. 2б) функция (1) знакопеременна (отрицательные значения не показаны), соответственно нераспознаваемые режимы проявляются не по всей длине защищаемой линии. Во втором квадранте она инверсна той, что показана для третьего квадранта. Поведение функции (1) накладывает свой отпечаток на условие нераспознаваемости применительно к дистанционной защите. Пусть l_3 – длина защищаемой зоны ($l_3 < l$). В третьем квадранте (рис. 2б), если $l_3 > x_{f \text{ кр}}$ (координата $x_{f \text{ кр}}$ критического места, где $R_{f \text{ нр}} = 0$, определяется из выражения $x_{f \text{ кр}} = l / 2 \sin^2(\delta/2)$), зависимость $R_{f \text{ нр}}(x_f)$ вне зоны становится физически недостоверной, так как $R_{f \text{ нр}}(x_f) < 0$ при $x_f > l_3$, говоря о том, что нераспознаваемость не проявляется. Отсюда следует различие яв-

лений нераспознаваемости места и зоны замыкания, коль скоро неотличимые друг от друга места могут не выходить за пределы защищаемой зоны.

Одним из способов повышения распознающей способности релейной защиты является применение адаптации. Выделены два вида адаптации: прямая и косвенная. Косвенная адаптация заключается в формировании

замера защиты с использованием априорной информации. Прямая адаптация – в модифицировании характеристик срабатывания защиты в зависимости от априорной информации. В диссертации приведена реализация дистанционной защиты линий электропередачи с применением обоих видов адаптации. Для реализации дистанционной защиты с прямой адаптацией применена многомерная дискретная структура. Рассмотрены основные её свойства.

Многомерная структура в дискретном пространстве, состоящая из однотипных ячеек прямоугольной формы, может выполнять различные функции, определяемые видом связанной с ячейкой информации. Простейшее применение дискретного пространства ограничивается логической информацией: если с помощью такой структуры задаётся

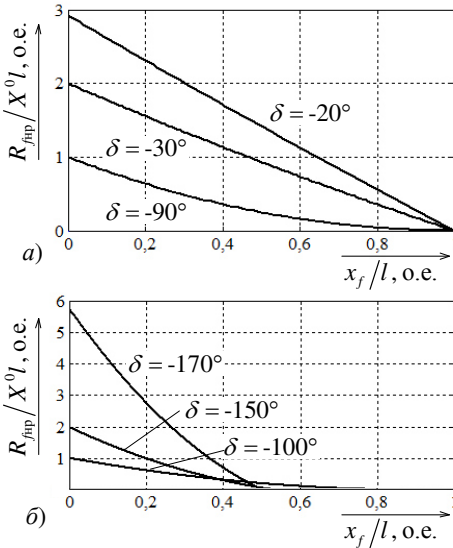
Рис. 2. Характеристика нераспознаваемости трёхфазных коротких замыканий
 а – при угле передачи в четвёртом квадранте,
 б – в третьем квадранте

область срабатывания защиты, то с ячейкой срабатывания связывается логическая единица, а с ячейкой несрабатывания – логический ноль. В более сложном случае с каждой ячейкой связываются значения некоторых параметров, например, параметров эквивалентной имитационной модели.

Рассмотрены закономерности образования многомерных дискретных структур, что важно знать для проверки односвязности массива ячеек и определения тех их них, которые располагаются на границе. В сплошном массиве ячеек можно обнаружить ячейки двух типов – внутренние и внешние. Последние выходят на границу массива. Каждая внутренняя m -мерная ячейка соприкасается с окрестными ячейками; их число $N_m = 3^m - 1$. Если разложить число $3^m = (2 + 1)^m$ в бином Ньютона, то в составе N_m ячеек обнаружатся слагаемые

$$N_m = \sum_{n=0}^{m-1} N_m^n = \sum_{n=0}^{m-1} C_n^m 2^{m-n},$$

где $C_n^m = m! / (n!(m-n)!)$ – число сочетаний из m элементов по n . Каждому значению n отвечает что-то одно из геометрии многогранника: значению $n = 0$ – вершины, $n = 1$ – рёбра, $n = 2 \dots m - 1$ – грани нарастающих порядков. Иначе говоря, n – это число варьируемых



параметров на той или иной части поверхности ячейки. У граничной ячейки не обнаруживается хотя бы один из возможных соседей, что служит ключом к решению задач окаймления области в многомерном пространстве.

Показано, что косвенная адаптация менее эффективна, чем прямая. Дистанционная защита с косвенной адаптацией обучается при вариации объектных параметров во всём диапазоне области определения, в то время как размеры ячейки дискретного пространства ограничивают вариацию отображаемых режимов защищаемого энергообъекта, улучшая тем самым условия обучения адаптивной дистанционной защиты с прямой адаптацией.

Вторая глава посвящена информационным аспектам адаптации дистанционной защиты и её обучения. Приведена реализация многомерной структуры для построения адаптивной защиты линий электропередачи. Многомерная дискретная структура проходит обучение в режимах коротких замыканий на фоне асинхронного хода.

Приведено сравнение адаптивных реле сопротивления между собой и с неадаптивным реле. Алгоритмы прямой и косвенной адаптации сопоставлены на примере имитационной модели по рис. 3, исследована их распознающая способность и оценена степень влияния явления нераспознаваемости. Варьируются параметры x_f , R_f и δ без ограничения диапазона изменения угла передачи. Фиксированы значения сопротивлений систем $Z_s = Z_s \angle \varphi_s = Z_r = Z_r \angle \varphi_r = 1 + j10$ Ом, удельное сопротивление $Z^0 = 0,1 + j0,43$ Ом/км и ЭДС $E = 220/\sqrt{3}$ кВ с коэффициентами $k_s = k_r = 1$. Длина линии $l = 100$ км, протяжённость защищаемой зоны $l_3 = 85$ км. Аварийные параметры с индексом α относятся к замыканиям в зоне (контролируемые режимы), $R_{f\alpha} \in (0, 100)$ Ом; с индексом β – к замыканиям вне зоны (альтернативные режимы), $R_{f\beta} \in (0, \infty)$, где верхний предел отвечает нормальному 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.

Регистрировались величины – комплексы тока и напряжения в начале линии: $\underline{I}_{\text{пл}}(0)$, $\underline{U}_{\text{пл}}(0)$ – в предшествующем режиме; $\underline{I}_{\text{тк}}(0)$, $\underline{U}_{\text{тк}}(0)$ – в текущем режиме короткого замыкания. Проводилось обучение трёх разнотипных реле сопротивления: P1 реагирует на замер $Z_{\text{тк}}(0) = \underline{U}_{\text{тк}}(0)/\underline{I}_{\text{тк}}(0)$ без какой-либо адаптации; P2 действует по методу косвенной адаптации, реагируя на замер $Z_{\text{тк}} = \underline{U}_{\text{тк}}(l_3)/\underline{I}_{\text{тк}}(l_3)$, где $\underline{U}_{\text{тк}}(l_3) = \underline{U}_{\text{тк}}(0) - Z^0 l_3 \underline{I}_{\text{тк}}(0)$, $\underline{I}_{\text{тк}}(l_3) = \underline{I}_{\text{тк}}(0) - \underline{I}_{\text{пл}}(0)$; реле P3 реагирует на замер $Z_{\text{тк}}$, но с использованием прямой адаптации. Характеристика срабатывания реле P3 модифицировалась в зависимости от значения комплексной мощности, передававшейся по линии в предшествующем режиме.

На рис. 4а...з представлены результаты обучения реле и оценка распознающей способности: на рис. 4а – реле P1, на рис. 4б – P2, на рис. 4в, з – реле P3 при $\delta = -90^\circ$ (на рис. 4г приведена в увеличенном масштабе подобласть $S_{\text{эф}}$). На рис. 4д приведены объ-

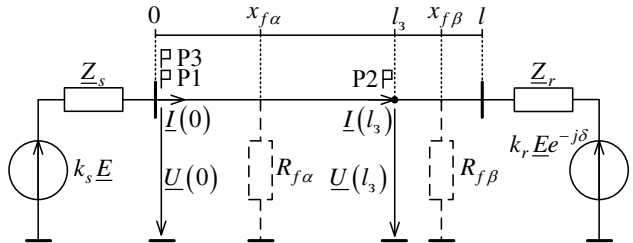


Рис. 3. Обучающая имитационная модель линии электропередачи

ектные характеристики всех трёх реле при $\delta = -90^\circ$. Результаты показывают, что реле с прямой адаптацией превосходит все остальные реле по распознающей способности.

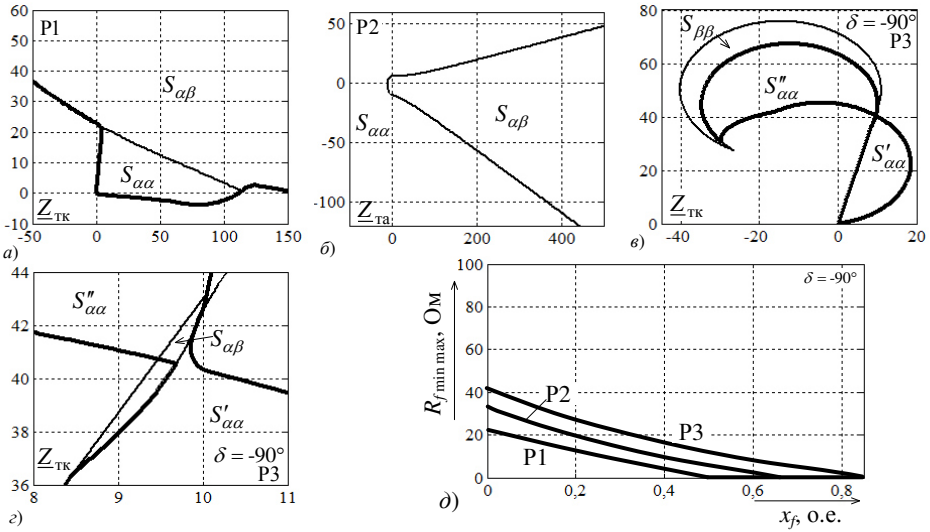


Рис. 4. Области срабатывания и объектные характеристики реле сопротивления трёх типов

Таблица 1

Диапазоны дополнительной вариации объектных параметров

Параметр	Диапазон
k_s , о.е.	0,95...1,05
k_r , о.е.	0,95...1,05
Z_{s_1} , Ом	1...10
Z_{r_2} , Ом	1...10

Увеличение числа варьируемых параметров имитационной модели приводит к тому, что связь между предшествующим режимом и углом передачи становится неявной. В имитационной модели рис. 3 добавлена дополнительная вариация объектных параметров, представленных в табл. 1. Углы φ_s и φ_r сопротивлений обеих систем приняты равными 88° . Дана реализация дистанционной защиты с прямой адаптацией в много-

мерном дискретном пространстве, где отображается информация о предшествующем режиме. Ячейки дискретной области связаны с описанием характеристик срабатывания реле сопротивления на комплексной плоскости $Z_{TK}(0)$.

В качестве координат трёхмерного дискретного пространства взяты активная $P_{пд}$ и реактивная $Q_{пд}$ мощности

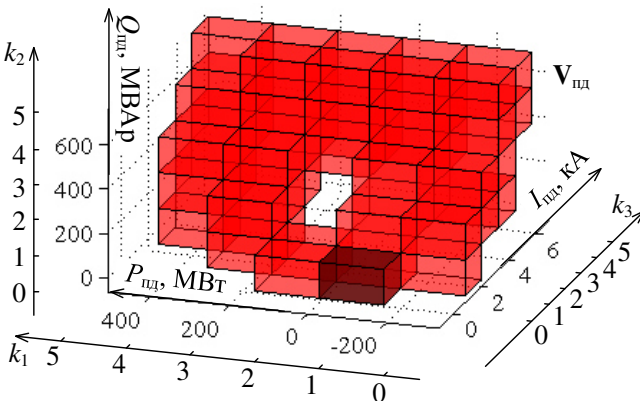


Рис. 5. Дискретная область отображения предшествующих режимов

предшествующего режима, а также модуль тока $I_{\text{пд}}$. На рис. 5 представлена дискретная область отображения предшествующих режимов $\mathbf{V}_{\text{пд}}$, насчитывающая 50 ячеек с соответствующими кодами $\mathbf{K}_{\text{пд}}$. Обучение адаптивной защиты проведено отдельно для каждой ячейки.

На рис. 6а приведена область срабатывания, полученная для ячейки $\mathbf{K}_{\text{пд}} = [1; 2; 1]^T$ со сторонами $P_{\text{пд}} \in (-156; 8)$ МВт, $Q_{\text{пд}} \in (-50; 110)$ МВАр, $I_{\text{пд}} \in (0; 1,2)$ кА (вариация угла δ в пределах $-35^\circ \dots -30^\circ$), на рис. 6б – соответствующая объектная характеристика. Рассмотрены и более вариативные модели с изменением угла φ в пределах $70^\circ \dots 90^\circ$ и расширением диапазона изменения сопротивлений Z_s, Z_r до 100 Ом.

Общий вывод таков, что способ прямой адаптации в сочетании с дискретной многомерной структурой позволяют реализовать дистанционную защиту, сохраняющую селективность при замыканиях на фоне асинхронного режима.

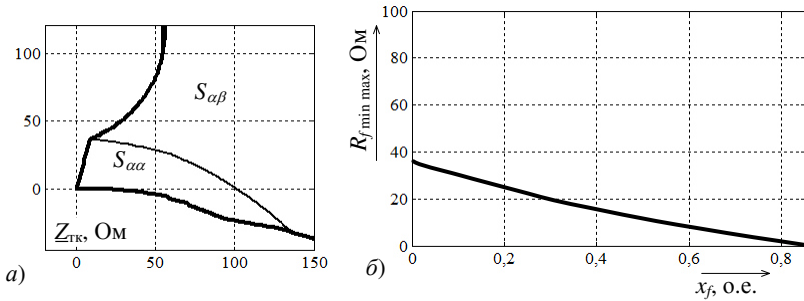


Рис. 6. Область срабатывания адаптивного реле сопротивления (а) и её объектная характеристика (б)

В третьей главе рассмотрены информационные аспекты локации и селекции повреждений в линиях электропередачи при двухстороннем наблюдении. Под локацией понимается определение места повреждения (ОМП), под селекцией – выявление повреждённых проводов. Сосредоточение на одной стороне протяжённого объекта результатов наблюдения разных его сторон создаёт новые перспективы для локации и селекции многопроводных систем, например, двухцепной электропередачи. В задаче локации важную роль играет алгоритмическая модель наблюдаемого объекта, преобразующая величины, наблюдаемые на подстанциях, в токи и напряжения произвольного места предполагаемого повреждения. Место повреждения определяется с помощью набора критериев (табл. 2). Под критерием повреждения понимается условие, связывающее токи и напряжения в месте предполагаемого повреждения с его координатой.

На рис. 7 представлена алгоритмическая модель объекта (АМО), составленная для предполагаемого места повреждения x_f . Фиксируемые на подстанциях величины $\underline{U}_{ss}, \underline{I}_{ss}, \underline{U}_{rr}, \underline{I}_{rr}$ с помощью алгоритмической модели преобразуются в токи

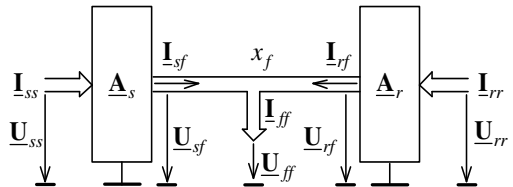


Рис. 7. Алгоритмическая модель с предполагаемым повреждением

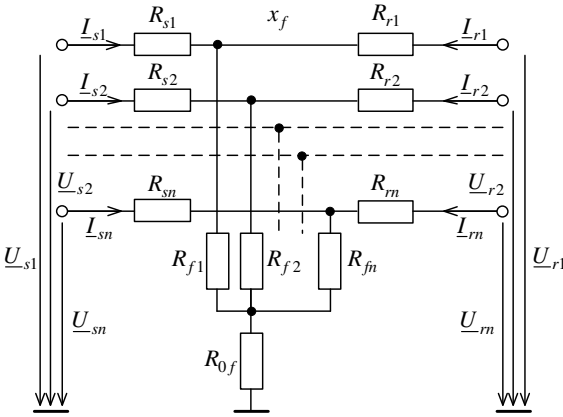


Рис. 8. Общая модель повреждения

повреждения, пригодная для всех видов коротких замыканий с обрывами проводов (рис. 8). Продольные сопротивления модели определяются из уравнений контура каждого провода:

$$R_{si} = \eta_i \left[(U_{si, re} - U_{ri, re}) I_{si, im} - (U_{si, im} - U_{ri, im}) I_{si, re} \right],$$

$$R_{ri} = \eta_i \left[(U_{si, re} - U_{ri, re}) I_{ri, im} - (U_{si, im} - U_{ri, im}) I_{ri, re} \right],$$
(2)

где $i = \overline{1, n}$ – номер провода; n – число проводов; $\underline{U}_{vf} = [U_{v1}, U_{v2}, \dots, U_{vn}]^T$; $\underline{I}_{vf} = [I_{v1}, I_{v2}, \dots, I_{vn}]^T$; $\eta_i = 1 / (I_{si, re} I_{ri, im} - I_{si, im} I_{ri, re})$; $\underline{U}_{vi} = U_{vi, re} + j U_{vi, im}$; $I_{vi} = I_{vi, re} + j I_{vi, im}$.

В диссертации приведены режимы, в которых те или иные критерии могут дать неоднозначный результат. Предложено использовать совокупность критериев, что позволяет избавиться от неоднозначности.

Таблица 2

Критерии ОМП при двухстороннем наблюдении многопроводной системы

Название критерия	Описание и основные выражения	Оценка \hat{x}_f , критерии
Энергетический	<p>Место повреждения определяется исходя из критерия резистивности, заключающегося в том, что место повреждения не потребляет реактивную мощность. Для каждого места предполагаемого повреждения определяется комплексная мощность повреждения:</p> $\underline{S}_f = \underline{U}_{ff}^T \underline{I}_{ff}^* = P_f + j Q_f,$ <p>где $\underline{I}_{ff} = \underline{I}_{sf} + \underline{I}_{rf}$, $\underline{U}_{ff} = 0,5(\underline{U}_{sf} + \underline{U}_{rf})$. В месте повреждения реактивная мощность равна нулю. Учитывается обрыв проводов.</p>	$Q_f \rightarrow 0,$ $P_f > (-\varepsilon)$

\underline{I}_{sf} , \underline{I}_{rf} и напряжения \underline{U}_{sf} , \underline{U}_{rf} , наблюдаемые соответственно слева и справа от места предполагаемого повреждения:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{sf} \\ \underline{I}_{sf} \end{bmatrix} = \underline{A}_s^{-1} \begin{bmatrix} \underline{U}_{ss} \\ \underline{I}_{ss} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{rf} \\ \underline{I}_{rf} \end{bmatrix} = \underline{A}_r \begin{bmatrix} \underline{U}_{rr} \\ \underline{I}_{rr} \end{bmatrix},$$

где \underline{A}_s , \underline{A}_r – матрицы прямой передачи. Из полученных величин составляется замер, оцениваемый по принятому критерию.

Принята общая модель

Равенства напряжений	<p>Равенство напряжений слева и справа от места КЗ:</p> $\Delta U_f = \sum_{i=1}^n U_{sf,i} - U_{rf,i} \text{ или } \Delta U_f^2 = \sum_{i=1}^n (U_{sf,i}^2 - U_{rf,i}^2),$ <p>где $i = \overline{1, n}$ – номер провода; n – число проводов.</p>	$\Delta U_f \rightarrow 0;$ $\Delta U_f^2 \rightarrow 0$
Итерационный	<p>Место повреждения определяется итерационной процедурой. Выбирается участок длиной l_k, по концам которого оцениваются напряжения с помощью АМО. Производится оценка расстояния до места повреждения. Для i-го провода и k-го участка:</p> $\underline{x}_{fk}^{(i)} = \frac{U_{ski} - U_{rki} + U_{rki}^0 l_k}{U_{ski}^0 + U_{rki}^0};$ <p>где $U_{ski}^0 = \sum_{j=1}^n Z_{kij}^0 I_{skj}$, $U_{rki}^0 = \sum_{j=1}^n Z_{kij}^0 I_{rkj}$, Z_{kii}^0 – собственное удельное сопротивление i-го провода, Z_{kij}^0 – взаимные удельные сопротивления i-го и j-го проводов. Процедура продолжается до установления оценки.</p>	$\arg \underline{x}_{fk}^{(i)} \rightarrow 0,$ $\hat{x}_{fk}^{(i)} = \text{mod } \underline{x}_{fk}^{(i)}$
Невязки	<p>Резистивная модель рис. 8 описывается переопределённым вещественным матричным уравнением</p> $\mathbf{IR} = \mathbf{U},$ <p>где $\mathbf{R} = [R_{s1} \ R_{r1} \ R_{f1} \ \dots \ R_{sn} \ R_{rn} \ R_{fn} \ R_{f0}]^T$;</p> $\mathbf{U} = [U_{s1, \text{re}} \ U_{s1, \text{im}} \ U_{r1, \text{re}} \ U_{r1, \text{im}} \ \dots \ U_{sn, \text{re}} \ U_{sn, \text{im}} \ U_{rn, \text{re}} \ U_{rn, \text{im}}]^T;$ $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{s1, \text{re}} & 0 & I_{1, \text{re}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{re}} \\ I_{s1, \text{im}} & 0 & I_{1, \text{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{im}} \\ 0 & I_{r1, \text{re}} & I_{1, \text{re}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{re}} \\ 0 & I_{r1, \text{im}} & I_{1, \text{im}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{im}} \\ 0 & 0 & 0 & I_{s2, \text{re}} & 0 & I_{2, \text{re}} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{re}} \\ 0 & 0 & 0 & I_{s2, \text{im}} & 0 & I_{2, \text{im}} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{im}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{r2, \text{re}} & I_{2, \text{re}} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{re}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{r2, \text{im}} & I_{2, \text{im}} & 0 & \dots & 0 & I_{\Sigma, \text{im}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \end{bmatrix};$ <p>$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i = I_{\Sigma, \text{re}} + j I_{\Sigma, \text{im}}$. Оценка параметров модели:</p> $\hat{\mathbf{R}} = \mathbf{I}^\dagger \mathbf{U},$ <p>где \mathbf{I}^\dagger – псевдообратная матрица. Величина невязки</p> $\sigma^2 = (\mathbf{U} - \mathbf{I}\hat{\mathbf{R}})^T (\mathbf{U} - \mathbf{I}\hat{\mathbf{R}}).$ <p>В месте повреждения невязка минимальна. Учитывается обрыв проводов.</p>	$\sigma^2 \rightarrow \min$

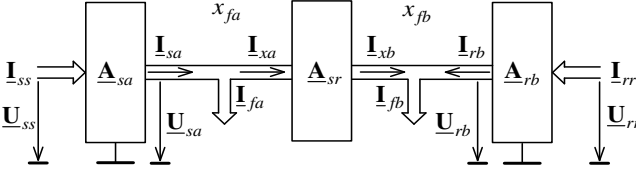


Рис. 9. Алгоритмическая модель сети с двойным замыканием

Информационный ресурс двухстороннего наблюдения позволяет определить два разных места коротких замыканий в линии электропередачи. Алгоритмическая модель состоит в этом

случае из трёх многополюсников, двух крайних и одного центрального (рис. 9). Определяются подводимые к двум местам предполагаемых повреждений x_{fa} и x_{fb} напряжения и токи:

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{sa} \\ \underline{\mathbf{I}}_{sa} \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{sa}^{-1} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{ss} \\ \underline{\mathbf{I}}_{ss} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{sb} \\ \underline{\mathbf{I}}_{sb} \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{sb} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{rr} \\ \underline{\mathbf{I}}_{rr} \end{bmatrix},$$

где $\underline{\mathbf{A}}_{sa}$, $\underline{\mathbf{A}}_{sb}$ – матрицы прямой передачи участков электропередачи. Для центрального участка необходима матрица его многополюсника формы $\underline{\mathbf{Y}}$, с помощью которой рассчитываются токи:

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

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 $\underline{S}_{fa} = P_{fa} + jQ_{fa} = \underline{\mathbf{U}}_{sa}^T \underline{\mathbf{I}}_{fa}^*$, $\underline{S}_{fb} = P_{fb} + jQ_{fb} = \underline{\mathbf{U}}_{rb}^T \underline{\mathbf{I}}_{fb}^*$. Используется энергетический критерий. Значения координат повреждений определяются из решения двух уравнений с двумя неизвестными

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

при условии, что

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

где ε – малая величина.

Наблюдению и токов, и напряжений каждого провода (полное наблюдение) присущи особые информационные аспекты. Совместно с Беляниным А.А. обнаружены новые информационные составляющие, названные нормальными и локальными токами. Реакция пассивной модели на воздействие напряжений, наблюдаемых как в предшествующем, так и в текущем режимах, названа вектором нормальных токов $\mathbf{i}_{\text{нм}}(t)$. Локальные токи представляют собой разность между наблюдаемыми и нормальными токами: $\mathbf{i}_{\text{лк}}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{\text{нм}}(t)$. Применение локальных токов $\underline{\mathbf{I}}_{s,\text{лк}} = \underline{\mathbf{I}}_{ss} - \underline{\mathbf{I}}_{s,\text{нм}}$, $\underline{\mathbf{I}}_{r,\text{лк}} = \underline{\mathbf{I}}_{rr} - \underline{\mathbf{I}}_{r,\text{нм}}$ упрощает локацию повреждений. Расстояние до места повреждения i -го провода в однородной линии электропередачи определяется из соотношения

$$\frac{\text{sh } \gamma_1 x_f}{\text{sh } \gamma_1 (l - x_f)} = \frac{I'_{ri,\text{лк}}}{I'_{si,\text{лк}}},$$

где указаны параметры прямой последовательности: $\underline{\gamma}_1 = \sqrt{\underline{Z}_1^0 \underline{Y}_1^0}$ – коэффициент распространения; $\underline{Z}_1^0 = R_1^0 + j\omega L_1^0$; $\underline{Y}_1^0 = j\omega C_1^0$ – первичные параметры; $\underline{I}'_{ri,лк}$, $\underline{I}'_{si,лк}$ – безнулевые составляющие соответствующих локальных токов; i – обозначение фазы.

В четвёртой главе рассмотрены информационные аспекты цифровой обработки наблюдаемых процессов, а именно задача дешумизации входных величин релейной защиты и локаторов повреждений. Быстродействие дистанционной защиты определяется эффективностью оценивания синусоидальных составляющих процесса короткого замыкания. Разработанные ранее алгоритмы адаптивной фильтрации позволяют реализовать быстродействующие фильтры ортогональных составляющих, отстроенные от апериодической составляющей переходного процесса. Основным недостатком таких алгоритмов является высокая чувствительность к шумам. Адаптивную фильтрацию желательно предварять дешумизацией наблюдаемых процессов.

В диссертации исследованы два способа дешумизации электрических сигналов: сингулярный спектральный анализ (ССА) и кратномасштабный анализ (КМА), представленными в виде, приспособленном для решения задач релейной защиты. Общность этих способов, несмотря на всё их математическое различие, заключается в том, что дешумизация достигается в три этапа: анализ (разложение, декомпозиция), обработка результатов анализа с целью подавления шумов и синтез (восстановление, реконструкция). В табл. 3 приведены основные этапы ССА и КМА.

Таблица 3
Основные этапы дешумизации электрических сигналов

	Сингулярный спектральный анализ	Кратномасштабный анализ
Анализ	<p>Разложение: составляется траекторная матрица размером $m \times n$ из N отсчётов наблюдаемой величины ($m + n = N + 1$): $\mathbf{i} = i(1) \dots i(N)$, $k = \text{ent}(f_{\Delta} t)$, f_{Δ} – частота дискретизации</p> $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} i(1) & i(2) & \dots & i(n) \\ i(2) & i(3) & \dots & i(n+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i(m) & i(m+1) & \dots & i(N) \end{bmatrix}.$ <p>Сингулярное разложение матрицы \mathbf{A}</p> $\mathbf{A} = \sum_{p=1}^n \mathbf{A}_p,$ <p>где $\mathbf{A}_p = \sigma_p \mathbf{u}_p \mathbf{v}_p^T$, \mathbf{u}_p и \mathbf{v}_p^T – ортонормированные векторы; σ_p – сингулярные числа.</p>	<p>Декомпозиция: многоуровневое разложение с помощью пары квадратурно-зеркальных цифровых фильтров с вейвлет-коэффициентами:</p> $\begin{bmatrix} \mathbf{a}_i \\ \mathbf{d}_i \end{bmatrix} = \mathbf{A}_i \mathbf{a}_{i-1},$ <p>где \mathbf{A}_i – матрица вейвлет-коэффициентов; \mathbf{a}_i – вектор аппроксимирующих коэффициентов; \mathbf{d}_i – вектор детализирующих коэффициентов; $i = \overline{1, n}$, \mathbf{a}_0 – наблюдаемая величина; n – количество уровней декомпозиции.</p>

Обработка	<p>Сингулярные числа располагаются в порядке убывания: $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_p > \dots > \sigma_n$.</p> <p>Выделяется подмножество q наибольших по величине значимых для данной задачи сингулярных чисел. Остальные $n - q$ чисел отбрасываются.</p>	<p>Трешолдинг: процедура нелинейной обработки детализирующих коэффициентов на последнем n-ом этапе декомпозиции. Выделяют жёсткий и мягкий трешолдинг, для жёсткого:</p> $\hat{\mathbf{d}}_n = \begin{cases} \mathbf{d}_n, & \text{если } \mathbf{d}_n \geq \eta \mathbf{d}_n _{\max} \\ 0, & \text{если } \mathbf{d}_n < \eta \mathbf{d}_n _{\max} \end{cases},$ <p>для мягкого:</p> $\hat{\mathbf{d}}_n = (\mathbf{d}_n - \tau) \cdot \text{sign } \mathbf{d}_n,$ <p>где $0 < \eta < 1$, $\tau > 0$ – некоторые пороговые значения, $\mathbf{d}_n _{\max} = \max \mathbf{d}_n$.</p>
Синтез	<p>Производится оценка исходной матрицы:</p> $\hat{\mathbf{A}} = \sum_{p=1}^q \mathbf{A}_p.$ <p>По методу диагонального усреднения восстанавливается наблюдаемый сигнал. Если</p> $\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \hat{i}_{11} & \hat{i}_{12} & \dots & \hat{i}_{1n} \\ \hat{i}_{21} & \hat{i}_{22} & \dots & \hat{i}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{i}_{m1} & \hat{i}_{m2} & \dots & \hat{i}_{mn} \end{bmatrix},$ <p>то $\hat{i}(1) = \hat{i}_{11}$; $i(2) = (\hat{i}_{12} + \hat{i}_{21})/2$; ...</p>	<p>Реконструкция: обратная декомпозиции многоуровневая процедура:</p> $\hat{\mathbf{a}}_{i-1} = \mathbf{A}_i^{-1} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}}_i \\ \hat{\mathbf{d}}_i \end{bmatrix},$ <p>где детализирующие коэффициенты обработки с помощью процедуры трешолдинга; $\mathbf{A}_i^{-1} = \mathbf{A}_i^T$.</p>

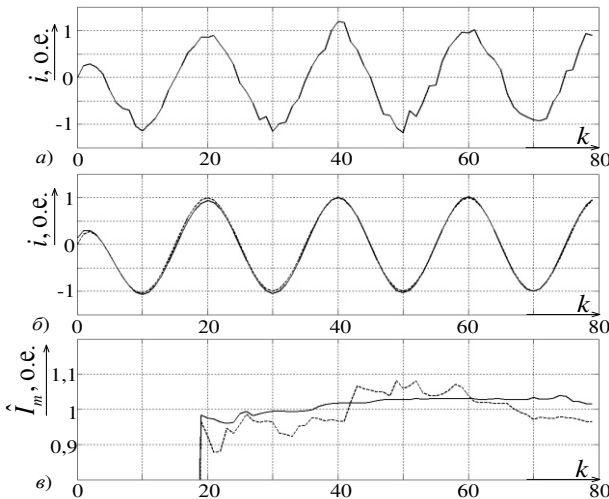


Рис. 10. Тестовый сигнал $i(k) = \cos(0,1\pi k) - \exp(-0,1\pi k) + \mathcal{G}(k)$ с шумом до и после восстановления и его обработка

Обнаружено, что ССА наиболее применим к стационарным сигналам, а КМА – к нестационарным. На рис. 10а представлен тестовый сигнал, содержащий периодическую, аperiодическую и случайную составляющую $\mathcal{G}(k)$ в виде белого шума, изменяющегося в диапазоне $\pm 0,1$. На рис. 10б сплошной линией приведён результат обработки тестового сигнала, а пунктирной – тестовый сигнал без шумовой составляющей. На рис. 10в представлены результаты обработки этого сигнала

адаптивным фильтром ортогональных составляющих первого порядка. Рассмотрено два варианта: непосредственное применение адаптивного фильтра к тестовому сигналу (пунктирная линия) и применение его после предварительного отделения шумовой составляющей с помощью сингулярного анализа (сплошная линия). Текущее окно наблюдения в обоих случаях охватывало 20 отсчётов. Соединение адаптивной фильтрации с сингулярным анализом приводит к осязатому улучшению результата адаптивной фильтрации полезного сигнала.

На рис. 11а представлена осциллограмма тока короткого замыкания, записанная микропроцессорным терминалом релейной защиты на линии 500 кВ «Приморская ГРЭС – подстанция Хехцир-2». На рис. 11б, в пунктирной линией представлены результаты непосредственной обработки сигнала адаптивным фильтром ортогональных составляющих, сплошной – результаты обработки адаптивным фильтром с применением процедуры кратномасштабного анализа. Коэффициенты жёсткого трешолдинга для фильтрации амплитуды: $\eta_i = 1; 1; 1; 1; 0,4$, фазы – $\eta_i = 1; 1; 1; 0,9; 0,8$, $i = 1 \dots 5$. Из приведённых здесь результатов видно, что применение кратномасштабного анализа в дополнение к адаптивной фильтрации даёт осязатый эффект.

В пятой главе представлены разработки, в которых нашли применение результаты исследований. Прямая адаптация с использованием многомерной дискретной структуры применена в разработке дистанционной защиты линий электропередачи 110-220 кВ на базе микропроцессорного терминала «ТОР 300 АДЗ 110» производства ИЦ «Бреслер» (рис. 12а).

Информационные аспекты локации повреждений при двухстороннем наблюдении и информационные аспекты цифровой обработки процессов (сингулярный спектральный анализ) учтены в разработке локаторов повреждений линий электропередачи при двухстороннем наблюдении на базе терминала «ТОР 300 ЛОК 220» производства ИЦ «Бреслер» (рис. 12б). Предложено использование совокупности критериев для повышения точности и предотвращения неоднозначности определения места повреждения.

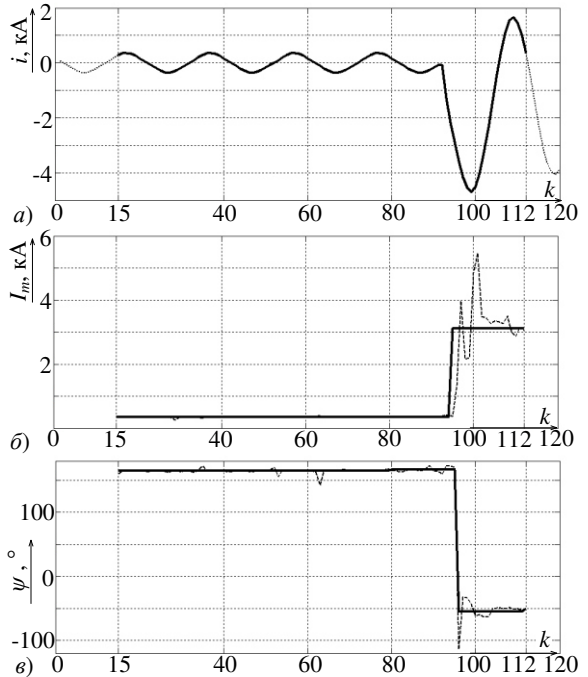


Рис. 11. Обработка реальной осциллограммы тока короткого замыкания на линии 500 кВ

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

опережающего деления сети (АОДС). АОДС устанавливается в наиболее мощных частях электрической сети, где в режимах коротких замыканий возможно глубокое насыщение измерительных трансформаторов тока.



Рис. 12. Терминалы защит

a – TOP 300 АДЗ 110; *б* – TOP 300 ЛОК 220; *в* – TOP 300 АОДС 503

Задачей АОДС является быстрое отключение одного или нескольких заранее выбранных выключателей, результатом чего является снижение уровня тока короткого замыкания. Типичное время срабатывания разработанной автоматики составляет 5 мс, максимальное – не превышает 11 мс. Автоматика реализована на базе микропроцессорного терминала «TOP 300 АОДС 503» (рис. 12*в*), выпускаемого ИЦ «Бреслер». Алгоритм работы АОДС представлен на рис. 13*а*.

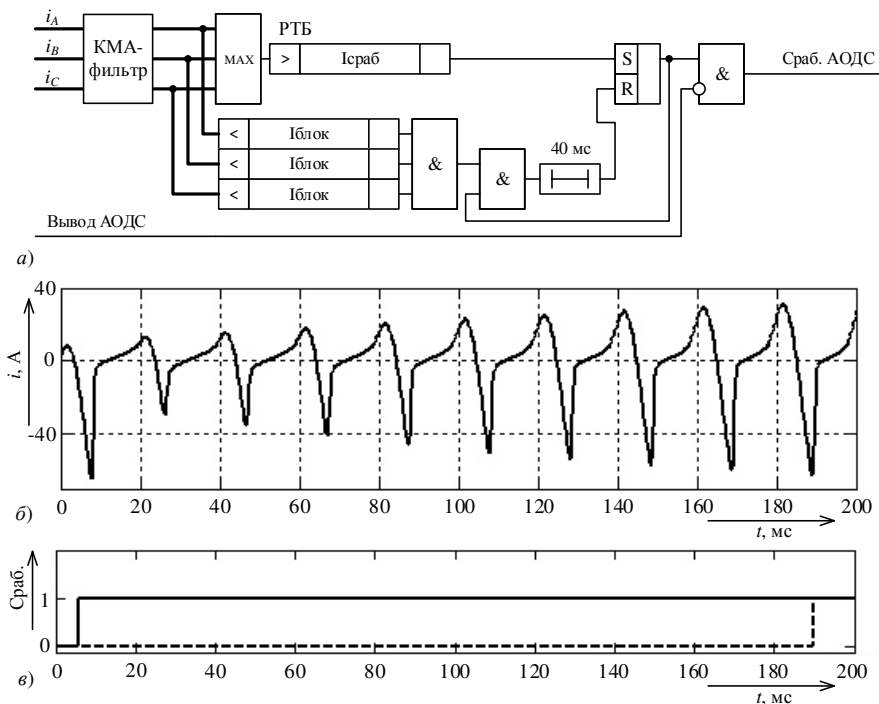


Рис. 13. Алгоритм работы АОДС (*a*) и пример её функционирования (*б*, *в*)

На рис. 13б приведён пример осциллограммы тока короткого замыкания с нелинейными искажениями, вызванными насыщением измерительного трансформатора тока. На рис. 13в пунктиром показана временная диаграмма срабатывания ИО на основе однопериодного фильтра Фурье, сплошной линией – временная диаграмма срабатывания быстродействующего ИО АОДС. Применение разработанного быстродействующего реле позволяет существенно сократить время отключения выключателя. Автоматика введена в эксплуатацию на Южноуральской ГРЭС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана многомерная дискретная структура для решения информационных задач релейной защиты. Выявлены основные закономерности, присущие таким структурам.

2. Исследовано явление нераспознаваемости 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. Разработан алгоритм дистанционной защиты по способу прямой адаптации с применением многомерной дискретной структуры. Обеспечена предельно возможная распознающая 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. 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 надёжности локации повреждений.

5. Разработан алгоритм локации повреждений в полностью наблюдаемой системе с применением новых информационных составляющих процесса короткого замыкания – локальных токов.

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.

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». Автоматика установлена в эксплуатацию на Южноуральской ГРЭС.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК

1. Воронов, П. И. Локация повреждений многопроводной сети при двухстороннем наблюдении / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 96-107. (0,69 п.л. / 0,28 п.л.).
2. Воронов, П. И. Сингулярный анализ процессов в электрических системах / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2012. – № 5. – С. 22-29. (0,40 п.л. / 0,10 п.л.).
3. Воронов, П. И. Кратномасштабный анализ процесса короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, Ю. В. Романов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – № 5. – С. 135-143. (0,52 п.л. / 0,17 п.л.).
4. Воронов, П. И. Распознающая способность адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Электричество. – 2015. – № 10. – С. 13-20. (0,92 п.л. / 0,32 п.л.).
5. Воронов, П. И. Эквивалентирование имитационных моделей электрических систем / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Электричество. – 2015. – № 5. – С. 22-29. (0,92 п.л. / 0,31 п.л.).
6. Воронов, П. И. Обучаемая релейная защита. Ч.1. Методы условных отображений / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 15-19. (0,58 п.л. / 0,10 п.л.).
7. Воронов, П. И. Обучаемая релейная защита. Ч.2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 12-18. (0,69 п.л. / 0,20 п.л.).
8. Воронов, П. И. Модификации аварийных составляющих наблюдаемых токов и напряжений / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 22-28. (0,81 п.л. / 0,25 п.л.).
9. Воронов, П. И. Граничные задачи в информационной теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Электротехника. – 2011. – № 1. – С. 13-18. (0,69 п.л. / 0,12 п.л.).
10. Воронов, П. И. Анализ переходных процессов в длинной линии в базисе дискретного и непрерывного времени / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 11-16. (0,69 п.л. / 0,18 п.л.).
11. Воронов, П. И. Алгоритмическое моделирование фидера в переходном режиме / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 5. – С. 49-56. (0,92 п.л. / 0,30 п.л.).
12. Воронов, П. И. Распознавание противостоящих режимов электрической системы / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Нелинейный мир. – 2011. – № 9. – Т. 9. – С. 600-606. (0,69 п.л. / 0,12 п.л.).

В изданиях, индексируемых в SCOPUS

13. Voronov, P. I. Multiresolution Analysis of the Short-Circuit Process / Yu. Ya. Lyamets, P. I. Voronov, Yu. V. Romanov // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61. – № 14. – PP. 1015-1020. (0,52 п.л. / 0,17 п.л.).
14. Voronov, P. I. Boundary-Value Problems in Information Theory of Relay Protection / Yu. Ya. Lyamets, G. S. Nudel'man, Yu. V. Romanov, M. V. Martynov, P. I. Voronov // Russian Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 82. – № 1. – PP. 11-15. (0,69 п.л. / 0,12 п.л.).
15. Voronov, P. I. Modifications of Fault Components of Currents and Voltages / Yu. Ya. Lyamets, A. A. Belyanin, P. I. Voronov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86. – № 2. – PP. 66-71. (0,81 п.л. / 0,25 п.л.).

Публикации в других изданиях

16. Воронов, П. И. Автоматика опережающего деления сети / В. А. Ефремов, Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Релейщик. – 2012. – № 2. – С. 62-63. (0,23 п.л. / 0,08 п.л.).

17. Воронов, П. И. Токовая защита неповреждённых фаз в цикле ОАПВ / В. А. Ефремов, Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Электроэнергия: передача и распределение. – 2013. – № 3(18). – С. 96-98. (0,35 п.л. / 0,15 п.л.).
18. Воронов, П. И. Реализация защиты от двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / В. А. Ефремов, П. И. Воронов, С. А. Алексенко, В. Д. Ластовкин // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2014. – № 6. – С. 29-31. (0,35 п.л. / 0,12 п.л.).
19. Voronov, P. I. Relay protection as a trained observer for power system opposite conditions / Yu. Ya. Lyametz, G. S. Nudelman, Yu. V. Romanov, M. V. Martynov, P. I. Voronov // Current Trends of Power System Relay Protection and Automation Development. – St. Petersburg, 2011. – С. 1-9. (1,04 п.л. / 0,21 п.л.).
20. Воронов, П. И. Алгоритмы релейной защиты с информационной базой произвольного размера / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, М. В. Мартынов, А. А. Белянин // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: Материалы IV междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 1-7. (0,81 п.л. / 0,17 п.л.).
21. Воронов, П. И. Реализация защиты от двойных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / В. А. Ефремов, П. И. Воронов, С. А. Алексенко, В. Д. Ластовкин // Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XXII конф. – Москва, 2014. – С. 116-118. (0,35 п.л. / 0,12 п.л.).
22. Воронов, П. И. Локация повреждений в линиях электропередачи при двухстороннем наблюдении / П. И. Воронов // Электроэнергетика глазами молодежи: Сборник докладов V междунар. науч.-техн. конф. – Т. 1. – Томск, 2014. – С. 472-475. (0,46 п.л. / 0,46 п.л.).
23. Воронов, П. И. Адаптивная защита от земляных замыканий в сетях с изолированной нейтралью / В. А. Ефремов, С. А. Алексенко, В. Д. Ластовкин, А. А. Белянин, П. И. Воронов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 20-21. (0,23 п.л. / 0,08 п.л.).
24. Воронов, П. И. Нелинейная фильтрация электрических величин для целей релейной защиты / П. И. Воронов, Ю. В. Романов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 108. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).
25. Воронов, П. И. Канонические структуры многомерной релейной защиты / М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 101-102. (0,23 п.л. / 0,12 п.л.).
26. Воронов, П. И. Теоретические основы релейной защиты: формирующиеся разделы / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, Ю. В. Романов, П. И. Воронов, М. В. Мартынов, А. А. Белянин // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России (РЕЛАВЭКСПО-2013): Материалы II междунар. науч.-практ. конф. и выст. – Чебоксары, 2013. – С. 92-95. (0,46 п.л. / 0,09 п.л.).
27. Воронов, П. И. Обучение дистанционной защиты на паре уставочных плоскостей / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, И. С. Подшивалина, П. И. Воронов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2010): Материалы VII Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2010. – С. 217-220. (0,23 п.л. / 0,05 п.л.).
28. Воронов, П. И. Сингулярный анализ модели короткого замыкания в линии электропередачи / А. А. Белянин, П. И. Воронов, С. В. Иванов, Ю. Я. Лямец // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Материалы VIII Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 241-245. (0,23 п.л. / 0,05 п.л.).
29. Воронов, П. И. Анализ точности моделирующих комплексов / А. А. Белянин, П. И. Воронов, Ю. Я. Лямец // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2012): Материалы VIII Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2012. – С. 249-252. (0,23 п.л. / 0,07 п.л.).

30. Воронов, П. И. Эквивалентирование электрической системы / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2014): Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2014. – С. 261-272. (0,69 п.л. / 0,20 п.л.).
31. Воронов, П. И. Канонические структуры многомерной релейной защиты / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2011): Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2011. – С. 244-246. (0,17 п.л. / 0,04 п.л.).
32. Воронов, П. И. Оптимальное время фильтрации тока короткого замыкания / Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2011): Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2011. – С. 256-259. (0,23 п.л. / 0,12 п.л.).
33. Воронов, П. И. Инвариантность форм интегро-дифференциальных уравнений для расчёта режимов в электроэнергетической системе / П. И. Воронов, А. А. Белянин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2013): Материалы X Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 292-295. (0,23 п.л. / 0,11 п.л.).
34. Воронов, П. И. Исследование погрешности алгоритмического моделирования в зависимости от первичных параметров сети / А. А. Белянин, П. И. Воронов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2013): Материалы X Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2013. – С. 296-299. (0,23 п.л. / 0,11 п.л.).
35. Воронов, П. И. Адаптация реле сопротивления к режиму асинхронного хода / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 352-357. (0,35 п.л. / 0,12 п.л.).
36. Воронов, П. И. Дискретное модифицирование характеристик защиты энергообъекта / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 347-348. (0,12 п.л. / 0,04 п.л.).
37. Воронов, П. И. Дискретное пространство для отображения информации об энергообъекте / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 345-346. (0,12 п.л. / 0,04 п.л.).
38. Воронов, П. И. Проявления нераспознаваемости места и зоны короткого замыкания в линии электропередачи / П. И. Воронов, Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2015): Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 349-351. (0,17 п.л. / 0,06 п.л.).
39. Воронов, П. И. Граничные задачи в теории релейной защиты / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики (АЭН ЧР). – 2010. – № 1. – С. 16-18. (0,35 п.л. / 0,08 п.л.).
40. Воронов, П. И. Локализация наблюдаемых режимов электрической системы / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2010. – № 1. – С. 18-21. (0,35 п.л. / 0,08 п.л.).
41. Воронов, П. И. Распознавание двухфазного замыкания на землю с металлическим замыканием в отстающей фазе / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2010. – № 1. – С. 21-24. (0,35 п.л. / 0,08 п.л.).
42. Воронов, П. И. Дедуктивный метод обучения релейной защиты / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, Ю. В. Романов, П. И. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2010. – № 1. – С. 24-27. (0,35 п.л. / 0,08 п.л.).
43. Воронов, П. И. Распознающие структуры универсального фазового селектора / Ю. В. Романов, М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2011. – № 1. – С. 18-23. (0,70 п.л. / 0,23 п.л.).

44. Воронов, П. И. Приложение сингулярного анализа к обработке зашумлённых сигналов / М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2012. – № 1. – С. 71-72. (0,23 п.л. / 0,11 п.л.).

45. Воронов, П. И. Engineering aspects of relay protection information theory / М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Человек. Гражданин. Учёный (ЧГУ-2010): Сборник трудов Рег. фест. студентов и молодёжи Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. – 2011. – С. 74. (0,06 п.л. / 0,03 п.л.).

46. Воронов, П. И. Прикладные аспекты информационной теории релейной защиты и автоматики / М. В. Мартынов, П. И. Воронов // Человек. Гражданин. Учёный (ЧГУ-2011): Сборник трудов Рег. фест. студентов и молодёжи Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. – 2011. – С. 193-194. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).

Патенты на изобретения

47. Пат. на изобретение 2461110 РФ, МПК H02H 3/40. Способ релейной защиты энергообъекта / Романов Ю. В., Мартынов М. В., Воронов П. И.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2010136643/07; заявл. 31.08.2010; опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25. – 13 с.

48. Пат. на изобретение 2492493 РФ, МПК G01R 31/08. Способ определения места повреждения многопроводной электрической сети при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Романов Ю. В., Воронов П. И., Исмуков Г. Н.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2011147688/28; заявл. 23.11.2011; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25. – 10 с.

49. Пат. на изобретение 2492565 РФ, МПК H02H 3/28. Способ определения места повреждения линии электропередачи при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Воронов П. И.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2012130712/07; заявл. 17.07.2012; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25. – 11 с.

50. Пат. на изобретение 2505825 РФ, МПК G01R 31/08. Способ определения мест двойного замыкания многопроводной электрической сети / Лямец Ю. Я., Романов Ю. В., Воронов П. И., Исмуков Г. Н.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2012105847/28; заявл. 17.02.2012; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3. – 6 с.

51. Пат. на изобретение 2505826 РФ, МПК G01R 31/08. Способ определения места и характера повреждения многопроводной электрической сети / Лямец Ю. Я., Романов Ю. В., Воронов П. И., Исмуков Г. Н.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2012101106/28; заявл. 11.01.2012; опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3. – 12 с.

52. Пат. на изобретение 2508586 РФ, МПК H02H 3/28. Способ дифференциально-фазной защиты линий электропередачи / Ефремов В. А., Романов Ю. В., Воронов П. И.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2012132758/07; заявл. 31.07.2012; опубл. 27.02.2014. Бюл. № 6. – 5 с.

53. Пат. на изобретение 2537652 РФ, МПК H02H 3/40. Способ задания условий срабатывания релейной защиты / Лямец Ю. Я., Воронов П. И.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013133197/07; заявл. 16.07.2013; опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1. – 9 с.

54. Пат. на изобретение 2542337 РФ, МПК H02H 3/28, G01R 31/08. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Воронов П. И.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013142150/07; заявл. 13.09.2013; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5. – 13 с.

55. Пат. на изобретение 2542331 РФ, МПК H02H 3/28, G01R 31/08. Способ определения места замыкания линии электропередачи при двухстороннем наблюдении / Лямец Ю. Я., Воронов П. И., Белянин А. А.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2013144358/07; заявл. 02.10.2013; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5. – 11 с.

56. Пат. на изобретение 2553448 РФ, МПК H02H 3/40. Способ дистанционной защиты линий электропередачи / Лямец Ю. Я., Воронов П. И., Мартынов М. В., Романов Ю. В.; патентообладатель ООО «ИЦ «Бреслер». – № 2014108305/07; заявл. 04.03.2014; опубл. 20.06.2015. Бюл. № 17. – 14 с.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1-20, 22-45] – участие в разработке теоретических положений, проверка и иллюстрация их на примерах и моделях; [46-55] – участие в создании изобретений.

ВОРОНОВ Павел Ильич
ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ЗАЩИТЫ И ЛОКАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 02.10.2015 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,25.

Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 1017

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, Чувашия, Чебоксары, пр. Московский, д. 15