

На правах рукописи

ПОДШИВАЛИНА Ирина Сергеевна

**АЛГОРИТМЫ ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТА
И РАСЧЕТА УСТАВОК В ЗАДАЧАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары 2010

Работа выполнена на кафедре ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова и в Исследовательском центре «Бреслер».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лямец Юрий Яковлевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Куликов Александр Леонидович

кандидат технических наук, доцент
Арсентьев Андрей Пантелеймонович

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский
институт релестроения»

Защита состоится «10» декабря 2010 г. в 15⁰⁰ в аудитории 301 корпуса «В» на заседании диссертационного совета Д212.301.02 Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова (428015, Чебоксары, Московский пр., 15).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим высылать по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Чувашского государственного университета им. И.Н.Ульянова, с авторефератом – на сайте <http://www.chuvsu.ru>.

Автореферат разослан «01» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.301.02
доктор технических наук, профессор

Г.П. Охоткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Активное развитие и внедрение микропроцессорной релейной защиты и автоматики потребовало соответствующего развития такого важного сопутствующего направления как расчет уставок новых исполнений релейной защиты. Полное использование преимуществ микропроцессорной техники во многом сдерживается отсутствием таких методик расчета уставок, которые учитывали бы изменение элементной базы и усовершенствование алгоритмов работы релейной защиты. Требуется анализ и переработка существующих традиционных методик, заложенных еще в трудах Г.И.Атабекова, А.Д.Дроздова, Я.С.Гельфанда, А.М.Федосеева, В.Л.Фабриканта, A.G.Phadke, J.S.Thorp, а также создание методик для вновь разрабатываемых защитных функций.

В работе решение этой задачи основывается на методе информационного анализа, получившего в последние годы активное развитие в работах Г.С.Нудельмана, А.О.Павлова, Е.Б.Ефимова, С.В.Иванова и успешно применяемого для распознавания аварийных ситуаций и характера наблюдаемых процессов. Разрабатываемая в диссертации методология расчета уставок позволяет учитывать все особенности микропроцессорных устройств и вести расчеты для сложных многомерных защитных функций, учитывать разнообразные логические связи, и все это независимо от типа защищаемого объекта. Появление в этой области регулярного подхода способствует решению информационных задач, связанных с унификацией и автоматизацией отдельных этапов расчета уставок, способствует ускоренному переходу релейной защиты и автоматики на микропроцессорную элементную базу.

Не утрачивает своей актуальности задача определения места повреждений (ОМП) линий электропередачи, получившая свое развитие в работах Е.А.Аржанникова, А.С.Саухатаса, Ю.Я.Лямеца, А.Л.Куликова, Я.Л.Арцишевского, М.Ш.Мисриханова, Д.Р.Любарского, M.Saha и других. В диссертации предметом разработки стали алгоритмы и методы для реализации автономного микропроцессорного устройства определения места повреждения, к точности и функциональности которого современная энергетика предъявляет всё большие требования, обусловленные развитием и широким распространением микропроцессорной техники. В работе развиваются методы эквивалентирования алгоритмических моделей электропередачи, обеспечивающие восполнение недостающей текущей информации за счет исключения тех структурных частей, которые относятся к ненаблюдаемым сторонам объекта. Дается описание электропередачи в обобщенном базисе без разграничения токов и напряжений, обрывов и коротких замыканий, фазных величин и их линейных преобразований, с любой степенью определенности, т.е. с допущением как переопределенности, так и недоопределенности.

На всех этапах выполнения работы автору были полезны консультации к.т.н. В.А.Ефремова и к.т.н. А.Н.Подшивалина.

Цель работы

Разработка алгоритмов эквивалентирования моделей электрических систем и методик расчета уставок многомерных алгоритмов их защит и приложение результатов теоретических исследований к реализации автономных устройств определения места повреждения и инженерных методик расчета уставок.

Задачи исследования

1. Развитие методов эквивалентирования алгоритмических моделей применительно к разработке автономного устройства определения места повреждения.

2. Исследование особенностей и способов реализации многомерных алгоритмов релейной защиты, учета логических связей в структуре защиты и разработка метода условного отображения альтернативных режимов.

3. Разработка общей методики и инструментария расчета уставок, применимых к защитах всех типов. Построение инженерных методик расчета уставок.

4. Применение разработанных методов в разработке и при внедрении автономного устройства определения места повреждения.

Методы исследования

Методы теоретических основ электротехники и теоретических основ релейной защиты, методы интервальной математики, математического моделирования и вычислительной геометрии, а также методы информационного анализа.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Модификации метода эквивалентирования алгоритмических моделей, адаптированного для реализации в автономных устройствах определения места повреждения.

2. Исследование и описание эффектов при обучении многомерной релейной защиты.

3. Общая методика расчета уставок, основанная на информационной теории релейной защиты.

Научная новизна

1. Разработанные модификации метода эквивалентирования алгоритмических моделей отличаются от известных тем, что они инвариантны к виду и объему доступной информации о защищаемом объекте, позволяют проводить его анализ и судить об информационном ресурсе локатора замыканий в линии электропередачи. Получено аналитическое описание процессов нормализации многополюсников и эквивалентирования многополюсных структур.

2. Новизна исследованных и описанных эффектов многомерности алгоритмов релейной защиты заключается в применении процедур условного отображения альтернативных режимов в уставочных пространствах и дробления объектных областей.

3. Общая методика расчета уставок отличается универсальностью по отношению к различным типам защит и дает средства оценки, развития и разработки инженерных методик.

Практическая ценность работы

1. Модификации метода эквивалентирования в сочетании с разработанными методиками расчета уставок позволили разработать и ввести в эксплуатацию автономное микропроцессорное устройство определения места повреждения.

2. Исследованные и описанные эффекты многомерности алгоритмов релейной защиты позволяют синтезировать новые более чувствительные и селективные алгоритмы многомерной релейной защиты.

3. С применением общей методики расчета уставок разработан ряд инженерных методик расчета уставок для серийно выпускаемых устройств релейной защиты серий «Бреслер», «ТОР 100», «ТОР 200».

Реализация и внедрение результатов работы

Полученные в диссертации теоретические и прикладные результаты использованы при разработке и внедрении автономного устройства определения места повреждения ТОР-Локатор, методик расчета уставок для устройств релейной защиты серий «Бреслер», «ТОР 100», «ТОР 200», для развития программного комплекса расчета уставок «ПАРУС РЗА».

Апробация работы

Основные положения работы и ее результаты докладывались на международных конференциях «Релейная защита и автоматика современных энергосистем сверхвысокого напряжения» СИГРЭ (Чебоксары, 2007), IEEE Bucharest PowerTech Conference (Румыния, Бухарест, 2009) и «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» СИГРЭ (Москва, 2009), а также на VI Всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (ДНДС-2005, Чебоксары, ЧГУ, 2005), на открытой конференции-фестивале научного творчества учащейся молодежи «Юность Большой Волги» (Чебоксары, 2005), на Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (ИТЭЭ-2006, ИТЭЭ-2010, Чебоксары, ЧГУ), на IV Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика» (Чебоксары, 2006), на Всероссийской научно-практической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем» (Москва, 2008 и 2010), на I Международной научно-практической конференции молодых специалистов АБС-Холдингс – 2009 (Чебоксары, 2009).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 23 работы.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований, 1 приложения, 42 иллюстраций. Общий объем работы 130 стр.: текст диссертации – 114 стр., список литературы – 13 стр, приложение – 3 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены цель работы и актуальность поставленных задач, обоснована научная новизна темы и дано краткое описание содержания диссертации.

Первая глава посвящена алгоритмическим моделям электропередачи, представляемым в виде соединения многополюсников. Под алгоритмической моделью понимается структура, призванная преобразовать всю имеющуюся информацию в оценки электрических величин мест предполагаемых повреждений. Целью развиваемого метода эквивалентирования является компенсация нехватки текущей информации за счет исключения тех структурных частей модели, которые относятся к ненаблюдаемым частям объекта.

Предметом рассмотрения являются пассивные многополюсники, образующие модель чисто аварийного режима. Многопроводная система описывается в базисе обобщенных величин $\underline{\mathbf{V}}$ – напряжений и токов; n -проводная система описывается дифференциальными уравнениями относительно $2n$ -мерного упорядоченного вектора $\underline{\mathbf{V}}(x)$, где x – координата:

$$-\frac{d\underline{\mathbf{V}}(x)}{dx} = \underline{\mathbf{H}}\underline{\mathbf{V}}(x), \quad (1)$$

$$\underline{\mathbf{V}}(x) = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}(x) \\ \underline{\mathbf{I}}(x) \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{U}}(x) = \begin{bmatrix} U_1(x) \\ U_2(x) \\ \dots \\ U_n(x) \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{I}}(x) = \begin{bmatrix} I_1(x) \\ I_2(x) \\ \dots \\ I_n(x) \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 0 & \underline{\mathbf{Z}}^0 \\ j\omega\boldsymbol{\beta}^0 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\underline{\mathbf{U}}(x)$ – вектор напряжений, $\underline{\mathbf{I}}(x)$ – вектор токов, $\underline{\mathbf{H}}$ – квадратная матрица первичных параметров, $\underline{\mathbf{Z}}^0$ и $\boldsymbol{\beta}^0$ – $(n \times n)$ -мерные симметрические матрицы собственных и взаимных первичных комплексных сопротивлений и, соответственно, емкостных коэффициентов. Заметим, что земля в число n не входит.

Однородное уравнение (1) имеет решение

$$\underline{\mathbf{V}}(x) = [\exp(-\underline{\mathbf{H}}(x - x_0))]\underline{\mathbf{V}}(x_0),$$

где x_0 – произвольная координата участка наблюдения. Здесь $\underline{\mathbf{V}}(x)$ и $\underline{\mathbf{V}}(x_0)$ – векторы входа и выхода однородного участка длиной $l = x_0 - x$ (рис. 1).

При этом уравнения прямой и обратной передачи принимают вид:

$$\underline{\mathbf{V}}(x) = \underline{\mathbf{A}} \cdot \underline{\mathbf{V}}(x_0), \quad \underline{\mathbf{V}}(x_0) = \underline{\mathbf{B}} \cdot \underline{\mathbf{V}}(x), \quad (2)$$

$$\underline{\mathbf{A}} = \exp(\underline{\mathbf{H}}), \quad \underline{\mathbf{B}} = \exp(-\underline{\mathbf{H}}).$$

При построении алгоритмической модели участка n -проводной системы выполняется процедура нормализации наблюдаемого многополюсника с использованием базиса фазно-линейных координат. При этом множество электрических величин разделяется на три группы: 1) наблюдаемые, 2) внутренние, которые подлежат исключению из описания структуры, 3) внешние, которые надлежит сохранить, по меньшей мере, до очередного эквивалентирования.

На этапе нормализации наблюдаемый многополюсник рассматривается как автономная структура, моделирующая участок n -проводной сети, вследствие чего количество проводов того или иного типа поначалу неизбежно оказываются в центре внимания, а затем шаг за шагом уступает место числу характерных электрических величин. Наряду с числом n фигурирует число m зажимов с фазными граничными условиями, дающими m устранимых величин и столько же исключаемых внутренних величин, а также число $2q$ зажимов, затрагиваемых линейными граничными условиями. При этом количество проводов, наблюдаемых полностью (и ток, и напряжение) или наполовину (одно из двух), менее значимо, чем число d наблюдаемых величин – элементов вектора $\underline{\mathbf{W}}$. Это связано с тем, что некоторые провода с наблюдаемыми напряжениями, возможно, уже вошли в число $2q$. Подсчет наблюдаемых напряжений, а не находящихся под их воздействием проводов, не создает риска двойного учета одной и той же информации.

Участок многопроводной сети изначально описывается системой $2n$ уравнений с $4n$ граничными величинами (рис. 2).

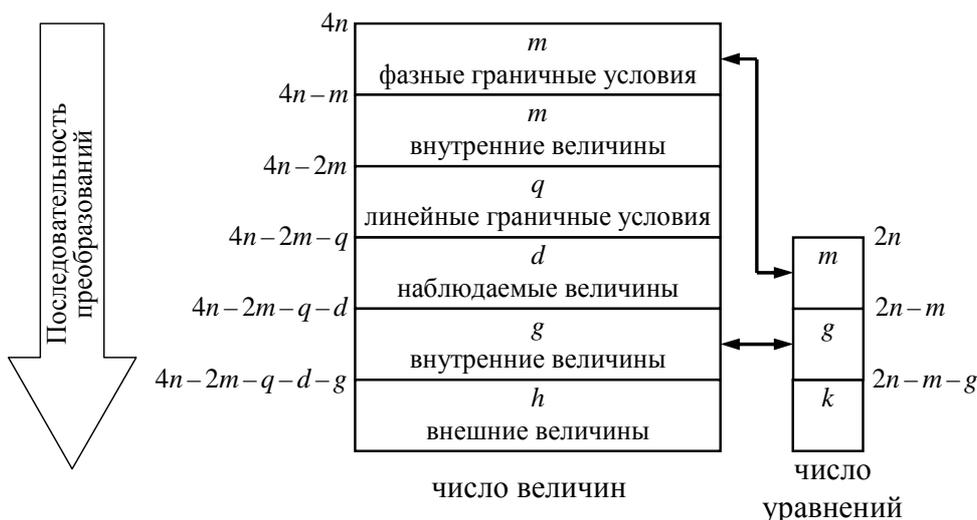


Рис. 2. Иллюстрация процедуры нормализации описания наблюдаемого многополюсника

Процедура нормализации многополюсника строится таким образом, чтобы сокращение числа неизвестных величин шло вдвое быстрее, чем уменьшение числа уравнений, и осуществляется в последовательности, указанной на рис. 2,

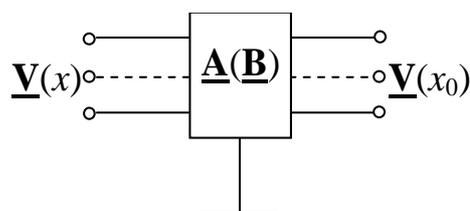


Рис. 1. Модель участка электропередачи

по направлению сверху вниз. Линии со стрелками отмечают то обстоятельство, что исключение переменных произошло за счет числа уравнений, а не благодаря граничным условиям.

Следующим этапом построения алгоритмической модели электропередачи является эквивалентирование соединения составляющих ее многополюсников, прошедших нормализацию. Эта процедура выполняется по более простому пути, чем нормализация каждого из них в отдельности, поскольку большинство разнотипных граничных условий относится к индивидуальным чертам многополюсников и учитывается только на стадии нормализации.

Граничные условия соединения двух многополюсников можно подразделить всего лишь на две группы: полные, когда зажимы разных многополюсников соединены общим проводом, и неполные, когда общий провод имеет внешнее ответвление. Собственные внешние выводы каждого из двух соединенных многополюсников и их общие ответвления образуют в совокупности внешние выводы эквивалентного многополюсника.

Описанный алгоритм позволяет выполнять и нормализацию, и эквивалентирование в обобщенном базисе без разграничения токов и напряжений, разрывов и коротков, фазных и линейных величин, степени определенности. Результатом преобразований является система из k уравнений, связывающая h искомым величин – элементов вектора \underline{V} – и d наблюдаемых величин – элементов вектора \underline{W} (рис. 3):

$$\underline{A}(k \times h)\underline{V}(h) = \underline{B}(k \times d)\underline{W}(d).$$

В этом уравнении величины \underline{A} и \underline{B} не являются матрицами прямой и обратной передачи, используемыми при каскадном эквивалентировании и описанными в уравнениях (2). Здесь и далее в скобках указываются размерности матриц.

Таким образом, эквивалентирование смещает акценты исследования в сторону итоговых параметров – порядка k матричного уравнения модели и порядка h вектора внешних величин \underline{V} .

Математический аспект нормализации и эквивалентирования многополюсников заключается в понижении значений h и k , причем h уменьшается вдвое быстрее, чем k . Процедуры нормализации и эквивалентирования по сути дела сводятся к организации учета разнообразных граничных условий; очередность учета: фазные граничные условия, линейные граничные условия, наблюдаемые величины, схема соединения с другими многополюсниками.

На каждом из описанных этапов обособляются и затем исключаются внутренние величины многополюсников, при этом сохраняются внешние, принадлежащие только эквивалентируемой структуре. В полностью сформированной алгоритмической модели внутренних величин не остается, благодаря чему появляется возможность подразделить зажимы и провода на

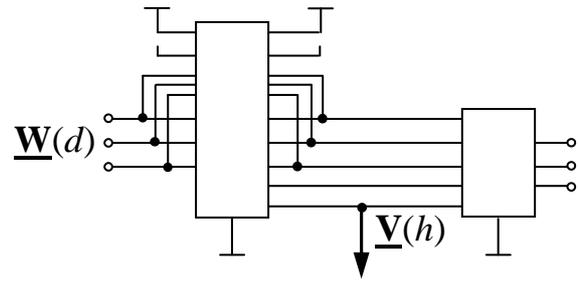


Рис. 3. Модель электропередачи

входные и выходные. Входными будем считать наблюдаемые. Они в свою очередь подразделяются, как уже отмечено, на две группы: полностью наблюдаемые (по току и напряжению) и наблюдаемые наполовину (рис. 3). Выходные зажимы – ненаблюдаемые.

Для алгоритмической модели важно присутствие отмеченных буквой f зажимов с неизвестными величинами $\underline{\mathbf{V}}_f(h_f)$ места короткого замыкания (рис. 4). В имитационной модели к этим зажимам была бы подключена резистивная модель повреждения. Цель алгоритмической модели иная – оценить вектор $\underline{\mathbf{V}}_f(h_f)$ безотносительно к взаимосвязи между его элементами. Присутствие дополнительных выходных зажимов, помеченных буквой x , не обязательно; они могут понадобиться для учета влияния неповрежденных проводов на поврежденные. Таким образом, в общем случае $h = h_f + h_x$, в частном – $h = h_f$.

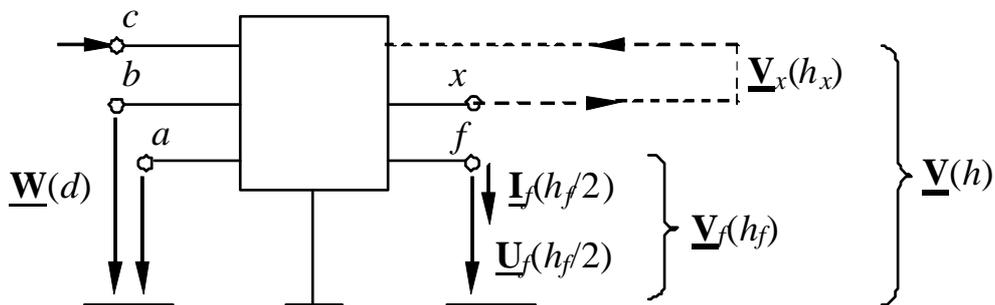


Рис. 4. Алгоритмическая модель электропередачи в чисто аварийном режиме

a, b, c – входные зажимы: a – полностью наблюдаемых проводов,
 b – наблюдаемых по напряжению, c – наблюдаемых по току;

f, x – выходные зажимы: f – произвольного места повреждения, x – влияющих проводов

Вторая глава посвящена вопросам построения и обучения многомерной релейной защиты. Под обучением понимается процедура задания областей срабатывания модулей релейной защиты (измерительных органов). Под многомерной защитой в работе понимается система, состоящая из измерительных органов и разнообразных логических связей между ними. Основным предметом рассмотрения становится такая реализация многомерной защиты, когда обучение и последующая ее работа совершаются на нескольких уставочных плоскостях A_i , $i = 1, n$. Учителями релейной защиты служат имитационные модели энергообъектов. Режим модели задается m -мерным вектором ее параметров \mathbf{x} . Различаются множества отслеживаемых и альтернативных режимов (α - и β -режимы). Имитационная модель воспроизводит наблюдаемые процессы, а входные цепи релейной защиты преобразуют их в замеры \mathbf{z}_i – точки плоскостей A_i , в частном случае – комплексных. Общий вектор замера $\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1, \dots, \mathbf{z}_i, \dots, \mathbf{z}_n]^T$ получается $2n$ -мерным. В процессе обучения осуществляются преобразования $\mathbf{z}_{\alpha i} = F_{\alpha i}(\mathbf{x}_\alpha)$, $\mathbf{z}_{\beta i} = F_{\beta i}(\mathbf{x}_\beta)$, $\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha$, $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta$, где F – задаваемые операторы имитационных моделей, G_α и G_β – заданные объектные области определения параметров \mathbf{x}_α и \mathbf{x}_β . На плоскости A_i области G_α и G_β отображаются фигурами $S_{\alpha i} = F_{\alpha i}(G_\alpha)$, $S_{\beta i} = F_{\beta i}(G_\beta)$, ограниченными линиями $L_{\alpha i}$, $L_{\beta i}$.

Обучение модуля, не имеющего логических связей с другими модулями, осуществляется на единственной плоскости A_1 (рис. 5). Обучение отдельно взятого модуля имеет целью построение отображений $S_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}(G_{\alpha})$ и $S_{\beta 1} = F_{\beta 1}(G_{\beta})$ (рис. 5а). Далее алгоритм обучения разветвляется.

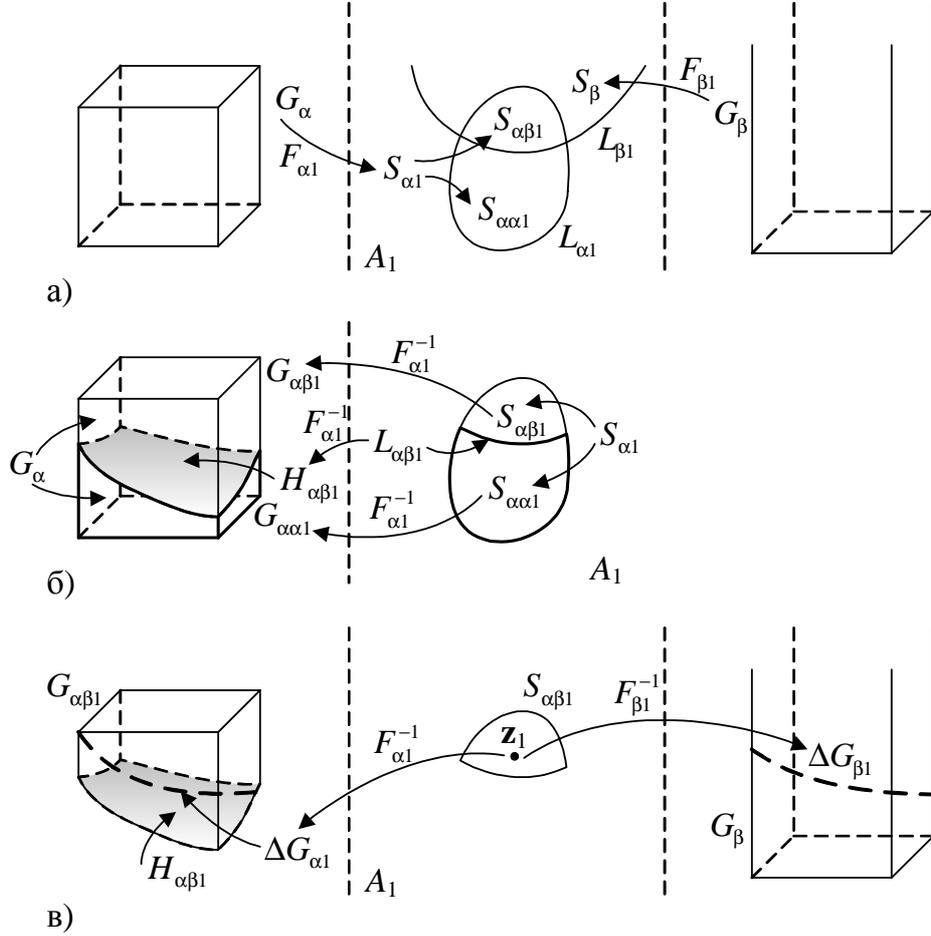


Рис. 5. Иллюстрация алгоритма обучения одиночного реле

а – прямые отображения объектных областей; б – обратные отображения уставочных областей (обведены собственные α -области); в – интерпретация явления нераспознаваемости

В первом варианте из уставочной области $S_{\alpha 1}$ выделяется собственная область α -режимов $S_{\alpha\alpha 1} = S_{\alpha 1} \setminus S_{\beta 1}$, после чего задается область срабатывания реле $S_{\text{ср}}$. Остается взаимная область α - и β -режимов $S_{\alpha\beta 1} = S_{\alpha 1} \setminus S_{\alpha\alpha 1} = S_{\alpha 1} \cap S_{\beta 1}$, в которой сосредоточены отображения нераспознаваемых на плоскости A_1 режимов $\mathbf{x}_{\alpha} \in G_{\alpha\beta} = F_{\alpha 1}^{-1}(S_{\alpha\beta 1})$. Условие нераспознаваемости конкретного режима \mathbf{x}_{α} выражается равенством двумерных векторов

$$\mathbf{z}_{\alpha 1}(\mathbf{x}_{\alpha}) = \mathbf{z}_{\beta 1}(\mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta}) \quad (3)$$

или адекватным ему неравенством с процедурой минимизации и малой константой ε

$$\min_{\mathbf{x}_{\beta}} \text{dist}(\mathbf{z}_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}(\mathbf{x}_{\alpha}), \mathbf{z}_{\beta 1} = F_{\beta 1}(\mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta})) < \varepsilon. \quad (4)$$

Существование в области G_{β} режимов \mathbf{x}_{β} , обеспечивающих выполнение условий (3) или (4), является причиной нераспознаваемости режима \mathbf{x}_{α} . Распознаваемые режимы располагаются в объектной области $G_{\alpha\alpha 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(S_{\alpha\alpha 1})$, а

нераспознаваемые – в объектной области $G_{\alpha\beta 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(S_{\alpha\beta 1})$, где оператор F^{-1} обозначает процедуру, обратную по отношению к прямому отображению F . Область G_{α} разделяется на две части в общем случае гиперповерхностью $H_{\alpha\beta 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(L_{\alpha\beta 1})$, где $L_{\alpha\beta 1}$ – линия раздела уставочной области $S_{\alpha 1}$ на собственную $S_{\alpha\alpha 1}$ и взаимную $S_{\alpha\beta 1}$ части (рис. 5б).

Явление нераспознаваемости объясняется отображением некоторых подмножеств α - и β -режимов в одну и ту же точку взаимной уставочной области $S_{\alpha\beta 1}$. На рис. 5в показан замер $\mathbf{z}_1 \in S_{\alpha\beta 1}$. Его прообразы $\Delta G_{\alpha 1} = F_{\alpha 1}^{-1}(\mathbf{z}_1)$ и $\Delta G_{\beta 1} = F_{\beta 1}^{-1}(\mathbf{z}_1)$ изображены линиями в трехмерных областях $G_{\alpha\beta 1}$ и G_{β} . Множества режимов $\Delta G_{\alpha 1}$ и $\Delta G_{\beta 1}$ в данном случае неразличимы.

Во втором варианте не предполагается выделять из области $S_{\alpha 1}$ распознаваемую часть $S_{\alpha\alpha 1}$. Вместо этого используются два независимых модуля с областями срабатывания соответственно $S_{\alpha 1}$ и $S_{\alpha\beta 1}$ (как вариант – $S_{\beta 1}$). Первый разрешает срабатывание реле, а второй – запрещает, выполняя блокирующую функцию (рис. 6).

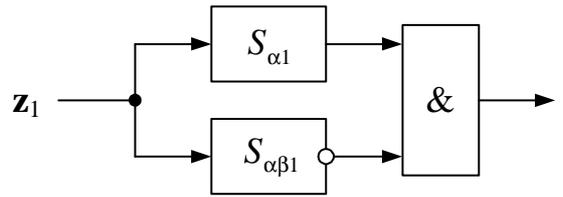


Рис. 6. Двухмодульная структура реле с блокировкой

Из множества G_{β} выделяются те режимы \mathbf{x}'_{β} , которые образуют своими отображениями взаимную область $S_{\alpha\beta 1}$ (рис. 5). Они определяются выражением

$$\mathbf{z}'_{\beta 1} = F_{\beta 1}(\mathbf{x}'_{\beta} \in G_{\beta}) \in S_{\alpha 1}, \quad (5)$$

которое можно назвать условным отображением β -режимов на плоскость A_1 . Формирование области $S_{\alpha\beta 1}$ представляется в виде процедуры объединения результатов условного отображения (5)

$$S_{\alpha\beta 1} = [\cup \mathbf{z}'_{\beta 1} (\mathbf{x}'_{\beta} \in G_{\beta})] \subset S_{\alpha 1}. \quad (6)$$

Представление об условном отображении β -режимов, введенное выражениями (5), (6), обобщается на произвольное число n плоскостей A_i с нанесенными на них областями α -режимов $S_{\alpha i}$ (рис. 7). В этом случае особыми β -режимами \mathbf{x}'_{β} будут те, отображения которых попадают во все области $S_{\alpha i}$:

$$\mathbf{z}'_{\beta i} = F_{\beta i}(\mathbf{x}'_{\beta} \in G_{\beta}) \in S_{\alpha i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

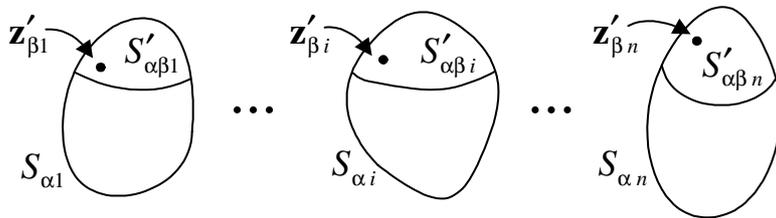


Рис. 7. Области условного отображения альтернативного режима

Множество точек $\mathbf{z}'_{\beta i}$ на каждой из плоскостей A_i определит взаимную область условного отображения

$$S'_{\alpha\beta i} = [\cup \mathbf{z}'_{\beta i} (\mathbf{x}'_{\beta} \in G_{\beta})] \subset S_{\alpha i}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Существует принципиальное отличие взаимных областей $S'_{\alpha\beta i}$ от простых пересечений областей $S_{\alpha i} = F_{\alpha i}(G_{\alpha})$ и $S_{\beta i} = F_{\beta i}(G_{\beta})$. Области $S'_{\alpha\beta i}$ не больше пересечений:

$$S'_{\alpha\beta i} \subseteq S_{\alpha\beta i} = (S_{\alpha i} \cap S_{\beta i}). \quad (9)$$

Эффект от применения условного отображения достигается в структуре, включающей в себя n модулей с характеристиками срабатывания $S'_{\alpha\beta i}$ и выходами, соединенными по схеме И (рис. 8).

Тривиальная структура защиты, в которой задействованы n уставочных плоскостей, представляет собой формальное объединение n реле,

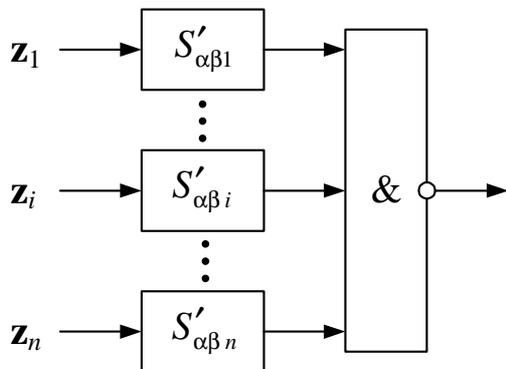


Рис. 8. Структура, прошедшая обучение на основе условного отображения и предназначенная блокировать действие защиты

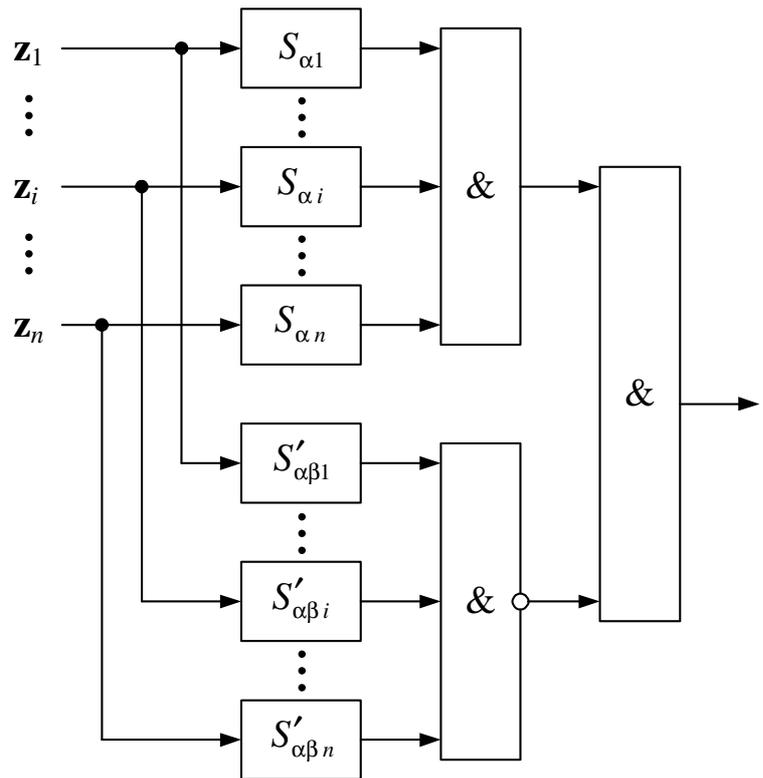


Рис. 9. Структура многомерной защиты с блокировкой по методу условного отображения

прошедших автономное обучение. Нетривиальное

решение заключается в применении условного отображения, обобщающего структуру одиночного реле по рис. 6 на систему из n реле (рис. 9). В силу условия (9) структура по рис. 9 заведомо превосходит по своей распознающей способности структуру с объединением автономно обученных реле. Тому же способствует и соединение блокирующих модулей $S'_{\alpha\beta i}$ по схеме И.

Распознаваемость конкретного режима \mathbf{x}_{α} не зависит от размера и расположения объектной области G_{α} . В многомерной защите условие нераспознаваемости (3) обобщается на все n уставочных плоскостей, принимая вид n равенств двумерных векторов

$$\mathbf{z}_{\alpha i}(\mathbf{x}_{\alpha}) = \mathbf{z}_{\beta i}(\mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta}), \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

аналогично обобщается неравенство (4), например, по минимаксному критерию

$$\min_{\mathbf{x}_{\beta}} \max_i \text{dist}(\mathbf{z}_{\alpha i}(\mathbf{x}_{\alpha}), \mathbf{z}_{\beta i}(\mathbf{x}_{\beta} \in G_{\beta})) < \varepsilon. \quad (11)$$

Условия (10), (11), инвариантные к области G_α , говорят об абсолютной нераспознаваемости режима \mathbf{x}_α . Смысл этого понятия заключается в том, что такой режим остается нераспознаваемым при неограниченном стягивании области G_α к точке \mathbf{x}_α .

Явление относительной нераспознаваемости (или потенциальной распознаваемости) режима \mathbf{x}_α обусловлено размерами областей $S'_{\alpha\beta}$, вследствие чего выполнение n условий

$$\mathbf{z}_{\alpha i} = F_{\alpha i}(\mathbf{x}_\alpha) \in S'_{\alpha\beta i}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

приводит к блокированию защиты (рис. 7, 8, 9). Если для констатации абсолютной нераспознаваемости режима \mathbf{x}_α необходимо убедиться в совпадении всех n его отображений $\mathbf{z}_{\alpha i}$ с отображениями $\mathbf{z}_{\beta i}$ любого, но одного и того же, β -режима $\mathbf{x}'_\beta \in G_\beta$, то к относительной нераспознаваемости приводит более мягкое условие совпадения $\mathbf{z}_{\alpha i}$ с условными отображениями $\mathbf{z}'_{\beta i} \in G_{\alpha i}$ разных β -режимов из области G_β .

В работе эффективность применения условного отображения продемонстрирована на примере дистанционной защиты линии электропередачи, представленной чисто реактивным сопротивлением и соединяющей источники бесконечной мощности. Если традиционное реле сопротивления дополнить виртуальным реле по описанной выше схеме (рис. 9), то уставочная область увеличится от размеров $S_{уст1}$ до размеров $S_{уст2}$ (рис. 10).

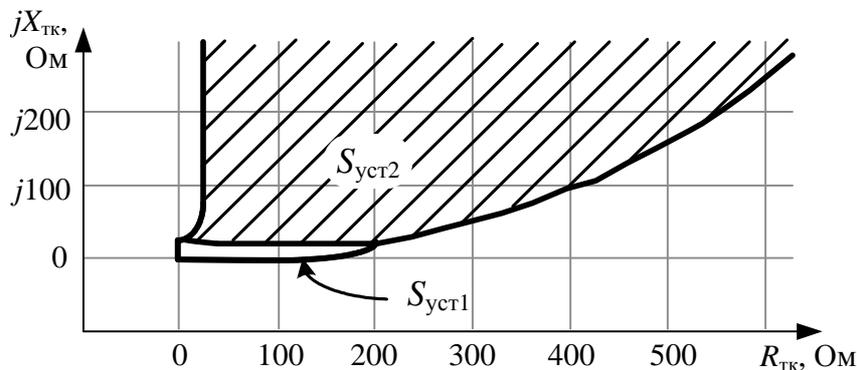


Рис. 10. Расширение уставочной области традиционного реле сопротивления с использованием виртуального реле

Третья глава посвящена исследованию существующих и разработке новых инженерных методик расчета уставок релейной защиты. В работе алгоритм расчета уставок представляется с позиций информационной теории релейной защиты.

На первом этапе производится разграничение α - и β -режимов. Разграничение ведется с учетом требований к рассматриваемому алгоритму защиты, особенностей его реализации, возможностей согласования с защитами смежных элементов сети.

В примерах табл. 1 разграничение основано на принципах действия рассмотренных защит и существующих методиках расчета уставок.

Таблица 1

Тип защиты	Отслеживаемые режимы	Альтернативные режимы
Первая ступень дистанционной защиты линии электропередачи	КЗ (короткое замыкание) на защищаемой линии	– КЗ на смежных участках («за спиной» и «впереди», в параллельной цепи, в обходной связи) – КЗ за трансформаторами ответвлений – Качания – Асинхронный ход – Нормальный режим
Вторая ступень дистанционной защиты линии электропередачи	КЗ на защищаемой линии	– КЗ вне зоны действия первой ступени ДЗ смежной линии – КЗ на смежных участках «за спиной» – КЗ за трансформатором противоположной подстанции – Качания – Асинхронный ход – Нормальный режим
Дифференциально-фазная защита линии электропередачи	КЗ на защищаемой линии	– КЗ на смежных участках («за спиной» и «впереди») – КЗ за трансформаторами ответвлений – Нормальный режим

На втором этапе строятся имитационные модели объекта с целью расчета наблюдаемых величин во всех обозначенных режимах. В общем случае для каждого режима может потребоваться создание собственной модели. Расчет выполняется методами теории электрических цепей, в частности, с использованием преобразований многополюсников (глава 1).

На третьем этапе определяются границы отображений α - и β -режимов в уставочном пространстве и выявляются собственные области α -режимов. Для этого осуществляется переход от объектного пространства к уставочному: $S_\alpha = F_\alpha(G_\alpha)$, $S_\beta = F_\beta(G_\beta)$, т.е. каждому рассматриваемому режиму ставится в соответствие замер реле в уставочном пространстве. Расчет наблюдаемых величин как результат моделирования является составной частью этого этапа.

Затем определяются границы уставочных областей S_α и S_β . Граница отвечает условиям, подчиняющим себе производные координат замера по объектным параметрам (теорема о коллинеарности производных граничного замера). Каждому из этих замеров могут быть поставлены в соответствие режимы в объектном пространстве. Они привлекаются в дополнительном анализе расчетных режимов для формирования инженерной методики выбора уставок, например, для выявления тех режимов, которые станут основными ограничителями при формировании характеристики срабатывания или же режимов, которые обязательны к рассмотрению при проверке чувствительности.

Далее выделяется собственная область α -режимов как результат вычитания области β -режимов из области α -режимов: $S_{\alpha\alpha} = S_\alpha \setminus S_\beta$.

На четвертом этапе задается вектор уставок \mathbf{M} , который содержит все параметры искомой характеристики срабатывания защиты. Характеристика строится в уставочном пространстве таким образом, чтобы она требуемым образом охватывала собственную область α -режимов $S_{\alpha\alpha}$, но ни в коем случае не пересекалась с областью β -режимов. Результат зависит от выбранного критерия поиска характеристики срабатывания.

Процесс нахождения вектора уставок представлен в форме процедуры оптимизации $\mathbf{M}_{\text{опт}} = \arg \max_{\mathbf{M}} V(\mathbf{M})$, где $V(\mathbf{M}) = V_S(S(\mathbf{M}) \cap S_{\alpha\alpha})$ – размер (объем) пересечения уставочной области $S(\mathbf{M})$, соответствующей вектору \mathbf{M} , с собственной областью $S_{\alpha\alpha}$ или, как вариант, $V(\mathbf{M}) = V_G(\mathbf{M})$ – размер (объем) объектной области, все режимы которой охвачены уставочной характеристикой $S(\mathbf{M})$.

Оптимизация ведется по заранее выбранному критерию, исходя из назначения рассматриваемой защиты и предъявляемых к ней требованиям.

На пятом этапе выполняется проверка чувствительности средствами информационного анализа, которая заключается в переходе от выбранной и заданной в устройстве уставочной области к объектной характеристике защиты в координатах аварийных параметров, например, места повреждения x_f и переходного сопротивления R_f . Применение объектных характеристик позволяет оценить зону действия защиты при выбранных уставках и ее чувствительность к повреждениям через переходные сопротивления. Сравнение полученных объектных характеристик с объектной характеристикой распознаваемости дает оценку полноты использования информации рассматриваемым алгоритмом защиты.

На заключительном этапе на основе проведенного анализа формируется инженерная методика расчета уставок и проверки чувствительности, отвечающая следующим требованиям:

- при расчете уставок и проверке чувствительности должен выполняться расчет минимально возможного количества режимов;
- должен быть предусмотрен учет погрешностей работы трансформаторов тока и напряжения, погрешностей работы устройства защиты и других параметров, влияющих на работу релейной защиты.

Погрешности работы устройства защиты и измерительных трансформаторов тока и напряжения учитываются введением отстройки в уставочном пространстве. Величина отстройки может быть абсолютной или зависеть от расположения рабочей точки в уставочном пространстве. Возможен учет погрешностей и на других этапах расчета. Например, сокращением защищаемой зоны на этапе формулировки задачи для защит с относительной селективностью или в процессе построения соответствующей имитационной модели, максимально приближенной к реальным условиям эксплуатации устройства защиты.

Разработанная методика расчета уставок применена в рекомендациях по расчету уставок защит серий «Бреслер», «ТОР 200» и «ТОР 100», а также при

разработке проектов методических указаний для защит «Бреслер» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС». Эти инженерные методики легли в основу программы расчета уставок PSC2, разработанной в ООО «ИЦ «Бреслер» при участии автора, а также реализованы в программном комплексе расчета уставок «ПАРУС РЗА», эксплуатирующемся на объектах ОАО «ФСК ЕЭС».

В четвертой главе методы эквивалентирования моделей объекта и расчета уставок рассматриваются в приложении к разработке автономного устройства определения места повреждения.

При участии автора было разработано автономное устройство определения места повреждения TOP-Локатор («TOP 100-ЛОК») (рис. 11), в котором предусмотрены:

- непрерывный контроль линии электропередачи;
- автоматическая регистрация коротких замыканий;
- анализ коротких замыканий;
- индикация результатов расчета (на локальном интерфейсе или на удаленном рабочем месте).

Информация, доступная алгоритму определения места повреждения, включает составляющие аварийного и доаварийного процессов. По результатам работы избирателя поврежденных фаз устройства выбирается наиболее подходящий критерий повреждения и используется оптимизационный алгоритм поиска места замыкания. В числе прочих параметров оценивается и переходное сопротивление замыкания.

Одним из средств достижения высокой точности работы устройства является выбор алгоритмической модели, максимально приближенной к реальным условиям работы контролируемого объекта, учитывающей все неоднородности линии электропередачи.

Погрешность, возникающая в результате расчета, определяется мощностью, отбираемой на промежуточной подстанции, и может составлять несколько процентов от длины линии. Как показывает практика, учет ответвлений допустимо производить по стандартной методике, когда нагрузка промежуточной подстанции вводится пассивной моделью. Применение метода эквивалентирования многополюсников позволяет достаточно просто учитывать ответвления в модели ЛЭП.

Для этого в соответствии с положениями первой главы работы все элементы системы представляются в виде многополюсников, параметры которых задаются матрицами прямой передачи формы А, а затем вся электропередача в целом рассматривается как каскадное их соединение.



Рис. 11. Внешний вид устройства TOP-Локатор

На рис. 12 показана электропередача, состоящая из трех участков: до и после ответвления, которые представляются матрицами прямой передачи \underline{A}' и \underline{A}'' , и самого ответвления, представленного матрицей $\underline{A}^{\text{отв}}$.

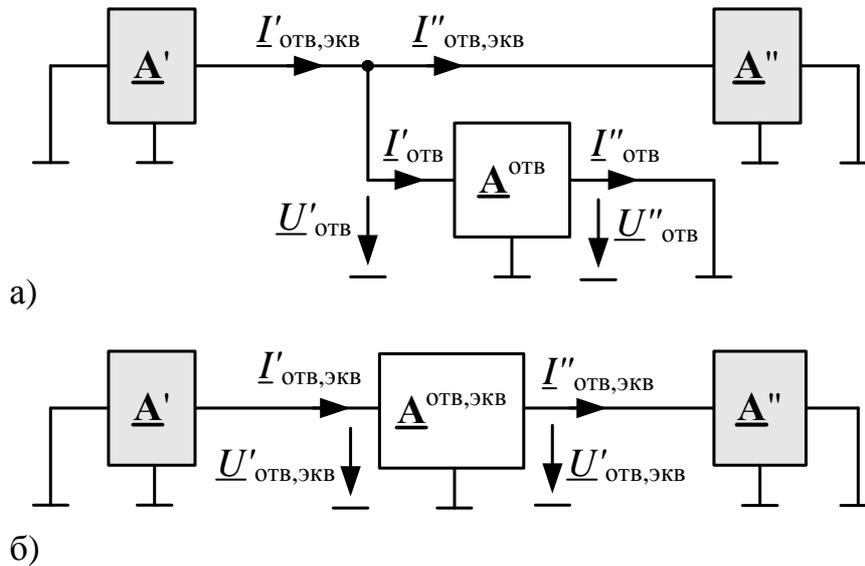


Рис. 12. Включение ответвления в общий каскад при использовании метода эквивалентирования многополюсников

В результате применения процедур нормализации может быть получено выражение, позволяющее рассчитывать матрицу прямой передачи при включении ответвления в общий каскад:

$$\underline{A}^{\text{отв,эКВ}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \underline{A}_{22}^{\text{отв}} (\underline{A}_{12}^{\text{отв}})^{-1} & 1 \end{bmatrix}.$$

Неоднородности линии электропередачи создаются также и параллельными линиями. Известно, что наибольшее влияние связано с совместным подвесом двух и более линий на одних опорах. При однофазных замыканиях ток модели изменяется до 10% по сравнению с отсутствием индуктивной связи.

В современных устройствах учет индуктивной связи выполняется одним из двух способов: с использованием тока нулевой последовательности влияющей линии или эквивалентированием собственного сопротивления основной линии. Этот ток может вводиться в алгоритмическую модель в качестве источника наряду с вектором наблюдаемых величин.

Если ток нулевой последовательности неизвестен, то необходимо полагаться на соотношения для воздушного трансформатора, образованного двумя линиями электропередачи (рис. 13). Тогда в результате

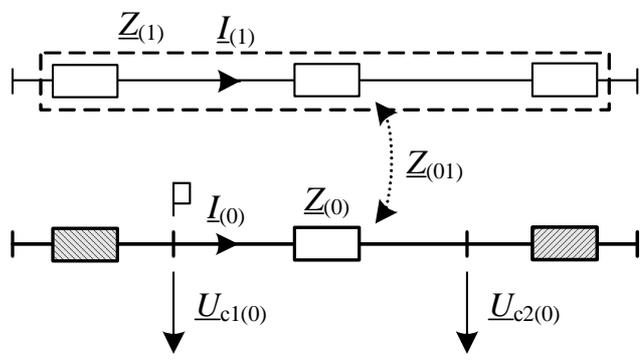


Рис. 13. Учет тока параллельной линии (схема)

процедура нормализации приводит к известному выражению для сопротивления основной линии с учетом влияния параллельной:

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = \underline{Z}_{(0)} - \frac{\underline{Z}_{(01)}^2}{\underline{Z}_{(1)}}.$$

Если влияющих линий несколько (рис. 14а), то необходимо рассмотреть взаимосвязанную систему, где каждая линия влияет не только на основную, но и на все другие линии с общей магнитной системой.

Представим систему рис. 14а в виде многополюсника, уравнение которого запишем в виде

$$\underline{\mathbf{U}} = \underline{\mathbf{Z}} \underline{\mathbf{I}}, \quad (13)$$

$$\underline{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{(0)н} - \underline{U}_{(0)к} \\ \underline{U}_{(1)н} - \underline{U}_{(1)к} \\ \dots \\ \underline{U}_{(n)н} - \underline{U}_{(n)к} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{(0)} \\ \underline{I}_{(1)} \\ \dots \\ \underline{I}_{(n)} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{(0)} & \underline{Z}_{(01)} & \dots & \underline{Z}_{(0n)} \\ \underline{Z}_{(01)} & \underline{Z}_{(1)} & \dots & \underline{Z}_{(1n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Z}_{(0n)} & \underline{Z}_{(1n)} & \dots & \underline{Z}_{(n)} \end{bmatrix},$$

где $\underline{\mathbf{U}}$ и $\underline{\mathbf{I}}$ – вектор падений напряжений на индуктивно связанных между собой линиях и вектор токов этих линий;

$\underline{\mathbf{Z}}$ – матрица сопротивлений нулевой последовательности n индуктивно связанных между собой линий;

$\underline{Z}_{(0)}$ – сопротивление нулевой последовательности участка основной линии, на который оказывают влияние рассматриваемые параллельные линии;

$\underline{Z}_{(1)}, \dots, \underline{Z}_{(n)}$ – сопротивления контуров нулевой последовательности параллельных линий; контур включает в себя всю линию и соединяемые ею системы;

$\underline{Z}_{(01)}, \underline{Z}_{(02)}, \dots, \underline{Z}_{(0n)}$ – взаимные сопротивления нулевой последовательности контролируемой линии с другими линиями;

$\underline{Z}_{(12)}, \underline{Z}_{(13)}, \dots, \underline{Z}_{(1n)}, \underline{Z}_{(23)}, \dots, \underline{Z}_{((n-1)n)}$ – взаимные сопротивления нулевой последовательности между другими линиями.

В результате применения процедуры нормализации относительно тока наблюдаемой линии и выделения коэффициента пропорциональности между током и напряжением в месте наблюдения (в начале наблюдаемого участка) получим следующее выражение для вносимого сопротивления:

$$\underline{Z}_{\text{экв}} = \frac{1}{[\underline{\mathbf{Z}}^{-1}]_{(1,1)}}, \quad (14)$$

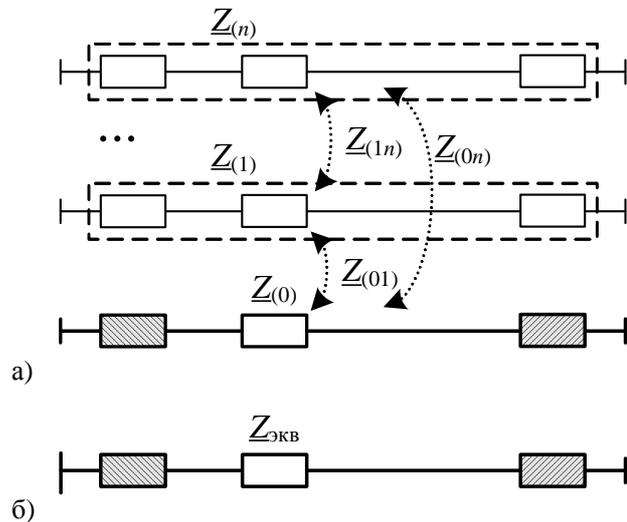


Рис. 14. Основная и параллельные ЛЭП, внесение сопротивлений

где $[Z^{-1}]_{(1,1)}$ – первый элемент первой строки матрицы, обратной матрице Z .

Таким образом, заменив сопротивление нулевой последовательности наблюдаемой линии на расчетное (14), можно учесть влияние всех индуктивно связанных линий, упрощая тем самым модель до вида, представленного на рис. 14б.

Формула (14) учитывает магнитную, но не электрическую связь между ЛЭП. При наличии последней более точным оказывается алгоритм с использованием тока нулевой последовательности параллельной линии. Он позволяет ввести в расчет непосредственное падение напряжения, вносимое параллельной линией.

Полученные выражения не связаны с конкретным алгоритмом ОМП и могут быть использованы для автоматизации расчетов. В общем случае необходимо учитывать режим работы каждой параллельной линии и предусматривать несколько наборов уставок.

На объектах ЕЭС России установлено более 400 устройств типа ТОР-Локатор. Их эксплуатация показывает высокую эффективность заложенной алгоритмической модели и разработанной методики расчета параметров линий электропередачи.

При участии автора были также разработаны программы, которые производят расчет параметров для алгоритмического моделирования по раскрытым в работе методикам, что позволяет снизить трудоемкость расчетов, исключить возможные ошибки и упростить ввод устройства в эксплуатацию.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод эквивалентирования алгоритмических моделей электропередачи, не требующий разграничения входных и выходных величин многополюсников, токов и напряжений. Метод дает возможность использования одновременно фазных и линейных величин, позволяет учитывать разнообразные граничные условия и объединять несинхронизированную информацию, работать с моделями любой степени определенности, как с переопределенными, так и недоопределенными. Разобраны примеры анализа информационного ресурса и баланса модели, а также создания информационного портрета короткого замыкания в электрической системе. Рассмотрены преимущества предварительного распознавания фаз при построении алгоритмической модели.

2. Исследованы пути построения и особенности обучения многомерной релейной защиты, в том числе с применением условного отображения альтернативных режимов. Поставлены задачи распознавания повреждений, распознавания процессов и локации с применением условного отображения. Сформулированы понятия и получены аналитические выражения для абсолютной и относительной нераспознаваемости аварийных режимов.

3. Разработана общая методика расчета уставок с применением методов информационного анализа. Обоснована ограниченность применения

традиционных методик расчета уставок к современным микропроцессорным устройствам релейной защиты. Рассмотрены примеры применения алгоритма к исследованию существующих методик и к разработке новых методик расчета уставок защит с абсолютной и относительной селективностью.

4. Теоретические результаты применены к разработке и внедрению автономного устройства определения места повреждения ТОР-Локатор. Разработана методика расчета уставок и проведен анализ работы устройства по результатам опытной эксплуатации. Предложены меры повышения точности и надежности работы устройства на рассмотренных объектах.

5. Разработана серия рекомендаций по расчету уставок для защит производства ООО «ИЦ «Бреслер». Полученные методики легли в основу программы расчета уставок PSC2, разработанной при участии автора.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ

1. Климатова*, И.С. Алгоритмическое моделирование в задаче определения места повреждения в линиях электропередачи / Ю.Я.Лямец, И.С.Климатова // Вестник Чувашского университета. – Чебоксары, 2007. – №2. – С.147-152

2. Подшивалина, И.С. Основы методологии расчета уставок микропроцессорной релейной защиты / А.Н.Подшивалин, И.С.Подшивалина // Известия ВУЗов. Электромеханика. – Новочеркасск, 2010. – №3 – С.10-13

В других научных изданиях

3. Климатова*, И.С. Методика расчета уставок измерительных органов аварийных составляющих / В.А.Ефремов, И.С.Климатова // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. Ун-та, 2005. – С.194.

4. Климатова*, И.С. Расчет уставок измерительных органов, реагирующих на приращение / И.С.Климатова, В.А.Ефремов // Открытая конференция-фестиваль научного творчества учащейся молодежи «Юность большой Волги»: материалы конференции. – Чебоксары, 2005. – С.198

5. Климатова*, И.С. Информационный анализ дифференциально-фазного принципа защиты линий в неполнофазном режиме / И.С.Климатова, А.Н.Подшивалин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2006. – С.265-266

6. Климатова*, И.С. Наблюдаемый многополюсник / Ю.Я.Лямец, И.С.Климатова // Труды АЭН ЧР. – Чебоксары, 2006. – №2

7. Климатова*, И.С. Эквивалентирование многополюсников / Ю.Я.Лямец, И.С.Климатова // Труды АЭН ЧР. – Чебоксары, 2006. – №2

8. Климатова*, И.С. Многополюсные структуры алгоритмических моделей линии электропередачи / Ю.Я.Лямец, И.С.Климатова // Труды АЭН ЧР. – Чебоксары, 2006. – №2
9. Климатова*, И.С. Информационный баланс алгоритмической модели электропередачи / Ю.Я.Лямец, И.С.Климатова // Труды АЭН ЧР. – Чебоксары, 2006. – №2
10. Климатова*, И.С. Информационный портрет короткого замыкания в электрической системе / Ю.Я.Лямец, И.С.Климатова // Труды АЭН ЧР. – Чебоксары, 2006. – №2
11. Климатова*, И.С. ТОР-Локатор – первый опыт применения / А.Н.Подшивалин, И.С.Климатова, Э.А.Терентьев // Вести МОЭСК, издание ОАО «Московская объединенная электросетевая компания». – Москва, 2008. – №1-2 (42-43) – С.4
12. Климатова*, И.С. Методики и программы расчета уставок микропроцессорных защит / В.А.Ефремов, И.С.Климатова, В.М.Козлов // Релейная защита и автоматика энергосистем-2008: Сб. докладов XVIII научно-технической конференции. – Москва, 2008. – С.70-72
13. Климатова*, И.С. ТОР-Локатор: высокая точность, удобство эксплуатации / А.Н.Подшивалин, И.С.Климатова, Э.А.Терентьев, А.В.Миняев // Релейная защита и автоматика энергосистем-2008: Сб. докладов XVIII научно-технической конференции. – Москва, 2008. – С.73-75
14. Климатова*, И.С. ТОР-Локатор – автономное устройство для определения места повреждения ВЛ 35 750 кВ / А.Н.Подшивалин, И.С.Климатова // Первая международная конференция молодых специалистов-2009. Сборник кратких докладов – Чебоксары, 2009. – С.23-25
15. Klimatova*, I. Modern Fault Location Technique for the Utility / A.Podshivalin, I.Klimatova, E.Terentyev // Proc. Int. Conf. IEEE Bucharest PowerTech. – Bucharest, Romania, 2009. – Report 293
16. Климатова*, И.С. Применение многомерной защиты: методики расчета уставок и проведения испытаний / А.Н.Подшивалин, И.С.Климатова // Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматика энергосистем»: Сборник докладов. – Москва, 2009. – С.112-121
- Klimatova*, I.S. Application of Multi-dimensional Protection: Settings Calculation and Testing Methods / A.N.Podshivalin, I.S.Klimatova // International Scientific & Technical Conference «Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation»: Conference Proceedings. – Russia, Moscow, 2009. – P.103-110
17. Климатова*, И.С. Разработка методик и автоматизация расчета уставок РЗА / В.А.Ефремов, И.С.Климатова, В.М.Козлов // Международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматика энергосистем»: Сборник докладов. – Москва, 2009. – С.333-339

Klimatova*, I.S. Methods development and settings calculation automation of RPA / V.A.Efremov, I.S.Klimatova, V.M.Kozlov // International Scientific & Technical Conference «Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation»: Conference Proceedings. – Russia, Moscow, 2009. – P.452-457

18. Подшивалина, И.С. Автоматизация расчета уставок микропроцессорных защит / В.А.Ефремов, И.С.Подшивалина, О.В.Петрова // XVI научно-техническая конференция «Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств РЗА и ПА в энергосистемах Урала»: Сборник докладов. – Екатеринбург, 2010. – С.106-108

19. Подшивалина, И.С. Информационные аспекты обучения многомерной релейной защиты / Ю.Я.Лямец, Ю.В. Романов, И.С.Подшивалина, О.В.Петрова // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С.214-217

20. Подшивалина, И.С. 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: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С.217-220

21. Подшивалина, И.С. Способ релейной защиты энергообъекта / Ю.Я.Лямец, С.В.Иванов, А.Н.,Подшивалин, Ю.В.Романов, И.С.Подшивалина // Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2009140854 от 20.05.2010

22. Подшивалина, И.С. Программные продукты ИЦ «Бреслер» для служб релейной защиты / Н.В.Подшивалин, В.А.Ефремов, А.В.Макаров, И.С.Подшивалина // Релейная защита и автоматика энергосистем-2010: Сб. докладов XX научно-практической конференции. – Москва, 2010. – С.143-147

23. Подшивалина, И.С. Методики и программы расчета уставок / В.А.Ефремов, О.В.Петрова, И.С.Подшивалина // Релейная защита и автоматика энергосистем-2010: Сб. докладов XX научно-практической конференции. – Москва, 2010. – С.147-149

* И.С.Климатова – с 25.09.2009 года И.С.Подшивалина

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит [1, 6-10, 21] – в участии в разработке основных теоретических положений; [2, 16] – в разработке методологии и иллюстрация ее на примере; [3, 4] – в разработке инженерной методики расчета уставок с применением методов информационного анализа; [5] – в приложении методов информационного анализа дифференциально-фазного принципа защиты с целью создания методики расчета; [11, 13-15] – в анализе результатов эксплуатации автономного устройства ОМП ТОР-Локатор; [12, 17, 18, 19-20, 22, 23] – в постановке задачи.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная
Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии Чувашского госуниверситета
428015, Чебоксары, Московский проспект, 15