

*На правах рукописи*

**ШЕВЕЛЕВ Алексей Владимирович**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И  
РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ И ШИН**

Специальность 05.14.02 –  
Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Чебоксары – 2012

Работа выполнена на кафедре «Теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики» ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и в ООО «Исследовательский центр «Бреслер».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Лямец Юрий Яковлевич.

Официальные оппоненты:

Кужеков Станислав Лукьянович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)», профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и городов;

Наволочный Александр Альбертович, кандидат технических наук, доцент, ОАО «ВНИИР», ведущий научный сотрудник департамента силовой электроники.

Ведущая организация – ОАО «АББ Силовые и Автоматизированные Системы», г. Чебоксары.

Защита состоится 30 марта 2012 г. в 14<sup>00</sup> в зале Ученого совета на заседании диссертационного совета Д212.301.02 при ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, третий этаж).

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

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус).

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2012 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д212.301.02

д.т.н., профессор

Г.П. Охоткин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Совершенствование защит трансформаторов и шин, одних из важнейших объектов электроэнергетических систем, является актуальной задачей в течение всего времени. Этим вопросам посвящены исследования российских ученых Дроздова А.Д., Засыпкина А.С., Кужекова С.Л., Дмитренко А.М. и др. На современном этапе развития микропроцессорной базы релейной защиты интересные исследования проведены З. Гажичем (Z.Gajić, ABB) и другими зарубежными авторами.

Развитие релейной защиты и автоматики связано с широким внедрением микропроцессорной техники, что обусловило интерес к исследованию информационных свойств релейной защиты. Инструментом исследования стал метод информационного анализа. На его основе уже реализованы и продолжают разрабатываться новые модули релейной защиты, распознающие способности которых приближаются к физическому пределу распознаваемости аварийных режимов защищаемого объекта. Исследование распознаваемости, так же как и повышение распознающих свойств модулей защиты, является одной из основных задач информационного анализа. Решение этих задач требует разработки эффективных имитационных и алгоритмических моделей энергообъектов. Особого внимания требуют методы моделирования и эквивалентирования систем с трансформаторами, необходимые для разработки и верификации защит трансформаторов, которые наименее развиты. В частности, востребована обобщенная модель нелинейного трансформатора в режиме витковых замыканий, обеспечивающая задание своих параметров на основе номинальных данных.

Усовершенствование методов моделирования режимов трансформатора закладывает основу для развития его защиты от всех видов замыканий в направлении повышения распознающих свойств, актуальность чего обусловлена недостаточной чувствительностью существующих защит к витковым замыканиям в обмотках трансформатора. Это, в свою очередь, делает актуальной задачу обеспечения надежной работы защиты в аномальных режимах, в том числе при неисправностях в цепях тока.

Внедрение микропроцессорной техники предоставляет широкие возможности для усовершенствования характеристик защиты шин, связанных с быстродействием и надежностью отстройки от внешних КЗ, что актуально в связи с увеличивающимися уровнями передаваемых мощностей и токов КЗ. Применение новых типовых схем распределительных устройств 110-220 кВ требует внимательного подхода к реализации защиты шин.

**Целью работы** является развитие методов моделирования и эквивалентирования систем с трансформаторами, исследование на этой основе распознаваемости витковых замыканий в обмотках трансформаторов и автотрансформаторов и разработка усовершенствованных микропроцессорных защит трансформаторов и шин.

**Методы исследования.** Исследования проводились с использованием теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, методов

теории распознавания, линейной алгебры, нелинейного программирования, математического моделирования, а также программных вычислительных комплексов.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием обоснованных методов исследования, обсуждением основных результатов работы с ведущими специалистами и учеными на конференциях, экспериментальной проверкой разработанных защит в лабораторных условиях и в эксплуатации.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Обобщенный метод каскадного эквивалентирования при наличии произвольных ограничений на каскадное соединение и трансформаторных связей в многопроводной системе.

2. Имитационная модель нагрузочных, аномальных и аварийных режимов нелинейного многообмоточного трансформатора и ее применение при исследовании распознаваемости замыканий в обмотках трансформаторов и автотрансформаторов и распознающих свойств их защиты.

3. Реализация токового входа с учетом переходных режимов и его применение в микропроцессорной защите шин.

4. Реализация органа контроля исправности вторичных цепей переменного тока и его применение для дифференциальной защиты трансформатора.

**Научная новизна работы.**

1. Разработанный в работе метод каскадного эквивалентирования многопроводных систем отличается от известных примененным способом восстановления каскадного соединения многополюсников при наличии произвольных ограничений и использованием каскадной модели силового трансформатора, что позволило применить метод для эквивалентирования электрических систем с трансформаторными связями.

2. Разработанная модель нелинейного трансформатора отличается от известных способом моделирования виткового КЗ в обмотке при наличии произвольной магнитной системы с упрощенным заданием параметров.

3. Приведенная в работе реализация токового входа отличается от известных схемой размагничивания магнитопровода для предотвращения насыщения промежуточного трансформатора тока в переходных режимах.

4. Предложенный в работе орган контроля исправности токовых цепей отличается от известных тем, что он адаптирован для применения в составе дифференциальных защит трансформаторов при наличии токов небаланса, возникающих в связи с неучетом положения устройства РПН.

**Практическая ценность работы.**

1. Разработанный в работе метод каскадного эквивалентирования многопроводных систем позволил реализовать программный модуль для расчета нагрузочных режимов и режимов коротких замыканий в трансформаторах, примененный для моделирования режимов и для анализа работы устройств защиты трансформаторов.

2. Проведенное исследование распознаваемости замыканий и распознающих свойств дифференциальной защиты на базе модели трансформатора с витковым КЗ позволило предложить и реализовать меры для повышения чувствительности защиты к повреждениям в обмотках автотрансформатора.

3. Реализация токового входа была применена при разработке микропроцессорной защиты шин с использованием характеристик, предназначенных для упрощенного выбора параметров промежуточных трансформаторов тока с учетом требований к их поведению в переходных режимах. Реализован пусковой орган дифференциальной токовой защиты шин, обеспечивающий требуемый коэффициент чувствительности ко всем внутренним КЗ в схемах с «развилкой» из двух выключателей автотрансформатора.

4. Предложенный в работе орган контроля исправности токовых цепей применен для реализации дифференциальной защиты трансформаторов, устойчивой к обрывам и замыканиями вторичных токовых цепей.

5. Разработанные микропроцессорные терминалы защиты трансформаторов и шин серии «Бреслер» освоены в производстве и введены в эксплуатацию более чем на 100 объектах электроэнергетики.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и республиканских конференциях: «Релейная защита и автоматика энергосистем» (Москва, ВВЦ, 2008), коллоквиуме СИГРЭ (Австралия, Сидней, 2003), DPSP-2004 (Нидерланды, Амстердам, 2004), «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, ЧГУ, 2000, 2006), «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, ЧГУ, 2001, 2003, 2005), «Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод» (Чебоксары, ВНИИР, 2001), а также на семинарах компании ABB Automation Technology Products AB по итогам стажировок (Швеция, Вестерос, 2000, 2001, 2003).

**Реализация результатов работы.** Основные результаты работы были использованы при разработке терминала защиты трансформаторов серии «Бреслер ТТ 2108» и терминала защиты шин серии «Бреслер ТШ 2310».

**Публикации.** Содержание диссертационной работы нашло отражение в 22 научных работах, включая две статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК. Получено решение о выдаче патента на изобретение.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 97 наименований, одного приложения. Общий объем работы 168 страниц включает: текст диссертации – 153 стр., список литературы – 10 стр., приложения – 1 стр., 63 рисунка, 11 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложено состояние проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, очерчен круг вопросов, рассматриваемых в диссертации.

Первая глава посвящена имитационному и алгоритмическому моделированию силового трансформатора как элемента электроэнергетической системы. Задача имитационного моделирования заключается в воспроизведении испытательных сигналов для тестирования релейной защиты, в то время как алгоритмические модели решают задачу преобразования наблюдаемых сигналов в замеры, осуществляемые измерительными органами защиты.

При участии автора разработан метод каскадного эквивалентирования линейных многопроводных систем, нашедший применение для моделирования как нормальных режимов, так и режимов замыканий в электрической системе. Метод исходит из идеи восстановления каскадного соединения соседних участков многопроводной системы при наличии ограничений, нарушающих непосредственную передачу напряжений и токов от одного участка к другому. Рассмотрение видов ограничений каскадного соединения при моделировании линий электропередачи позволяет выделить такие варианты, как замыкание проводов на землю и между собой или их обрыв. Однако применение метода каскадного эквивалентирования к электрическим системам, содержащим трансформаторы, сталкивается с ограничениями общего вида.

Автором доказано, что метод каскадного эквивалентирования применим и при наличии произвольных ограничений, выраженных в виде линейной зависимости входных и выходных величин многополюсника и возникающих, например, при соединении обмоток трансформатора в треугольник (сумма линейных напряжений равна нулю). Разработан обобщенный подход к восстановлению каскадного соединения при наличии произвольных ограничений, что позволяет применять метод каскадного эквивалентирования к произвольным линейным многопроводным системам, содержащим трансформаторные связи.

Уравнение прямой передачи участка  $n$ -проводной системы (табл. 1), на который действуют обобщенные векторы изображений входных  $\underline{W}_1[2n]$  и выходных  $\underline{W}_2[2n]$  электрических или магнитных величин, имеет вид

$$\underline{W}_1[2n] = \underline{A} \underline{W}_2[2n], \quad (1)$$

где  $\underline{A}$  – матрица прямой передачи размерности  $2n \times 2n$ . Для выявления ограничений на каскадное соединение вводятся квадратные матрицы переключения по входу  $S_1$  и выходу  $S_2$ , преобразующие описание участка (1) к виду с выявленными ограничениями, число которых составляет по входу  $m_1$  и выходу  $m_2$ , выраженными подвектором нулевых величин  $\underline{0}[m]$  и подвектором избыточных величин  $\underline{Y}_{изб}[m]$ . Остающиеся подвекторы входных  $\underline{W}'_1[2p_1]$  и выходных  $\underline{W}'_2[2p_2]$  величин, участвующие в

каскадном соединении данного участка с соседними, также преобразуются с помощью матриц переключения:

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_1[2p_1] \\ \underline{\mathbf{V}}_{\text{изб1}}[m_1] \\ \mathbf{0}[m_1] \end{bmatrix} = \mathbf{S}_1 \underline{\mathbf{A}} \mathbf{S}_2^{-1} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_2[2p_2] \\ \underline{\mathbf{V}}_{\text{изб2}}[m_2] \\ \mathbf{0}[m_2] \end{bmatrix},$$

где  $m + p = n$ . Матрицы  $\mathbf{S}_1$  и  $\mathbf{S}_2$  подбираются с учетом линейных зависимостей между элементами векторов входных или выходных величин и необходимой перестановки строк этих векторов.

В дальнейшем нулевые величины исключаются из описания участка. При  $m_1 \neq m_2$  используется нормализация описаний участков, т.е. приведение к каноническому виду для дальнейшего исключения равного количества избыточных и нулевых величин на

Процедуры каскадного эквивалентирования

Табл. 1.

1. Описание участка многопроводной системы		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> </div> <div style="width: 50%;"> <p>Исходное описание: <math>\underline{\mathbf{W}}_1[2n] = \underline{\mathbf{A}} \underline{\mathbf{W}}_2[2n]</math></p> <p>Выявление ограничений: <math>\underline{\mathbf{A}}' = \mathbf{S}_1 \underline{\mathbf{A}} \mathbf{S}_2^{-1}</math></p> <math display="block">\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_1[2p_1] \\ \underline{\mathbf{V}}_{\text{изб1}}[m_1] \\ \mathbf{0}[m_1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}}'_{11} &amp; \underline{\mathbf{A}}'_{12} &amp; \underline{\mathbf{A}}'_{13} \\ \underline{\mathbf{A}}'_{21} &amp; \underline{\mathbf{A}}'_{22} &amp; \underline{\mathbf{A}}'_{23} \\ \underline{\mathbf{A}}'_{31} &amp; \underline{\mathbf{A}}'_{32} &amp; \underline{\mathbf{A}}'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_2[2p_2] \\ \underline{\mathbf{V}}_{\text{изб2}}[m_2] \\ \mathbf{0}[m_2] \end{bmatrix}</math> </div> </div>		
1.1. Канонический участок ( $m = m_1 = m_2$ )	1.2. Преобладание ограничений по входу ( $m_1 > m_2$ )	1.3. Преобладание ограничений по выходу ( $m_1 < m_2$ )
<p><math>\underline{\mathbf{W}}'_1[2p] = \underline{\mathbf{A}}_{\text{эKB}} \underline{\mathbf{W}}'_2[2p]</math></p> <p><math>\underline{\mathbf{A}}_{\text{эKB}} = \underline{\mathbf{A}}'_{11} - \underline{\mathbf{A}}'_{12} (\underline{\mathbf{A}}'_{32})^{-1} \underline{\mathbf{A}}'_{31}</math></p>	<p><math>\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_1[2p_1] \\ \underline{\mathbf{V}}'_{\text{изб1}}[m_1 - m_2] \\ \mathbf{0}'[m_1 - m_2] \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{\text{эKB}} \underline{\mathbf{W}}'_2[2p_2]</math></p>	<p><math>\underline{\mathbf{W}}'_1[2p_1] = \underline{\mathbf{A}}_{\text{эKB}} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_2[2p_2] \\ \underline{\mathbf{V}}'_{\text{изб2}}[m_2 - m_1] \\ \mathbf{0}'[m_2 - m_1] \end{bmatrix}</math></p>
2. Каскадное соединение соседних участков		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>Эквивалентирование</p> <p><math>\underline{\mathbf{A}}_{12} = \underline{\mathbf{A}}_{\text{эKB1}} \underline{\mathbf{A}}_{\text{эKB2}}</math></p> <math display="block">\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_1[2p_{11}] \\ \underline{\mathbf{V}}'_{\text{изб1}}[m_{11}] \\ \mathbf{0}'[m_{11}] \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_{12} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{W}}'_2[2p_{22}] \\ \underline{\mathbf{V}}'_{\text{изб2}}[m_{22}] \\ \mathbf{0}'[m_{22}] \end{bmatrix}</math> <p>Исключение ограничений (возврат к пункту 1)</p> </div> <div style="width: 50%;"></div> </div>		

входе и выходе. Оставшиеся избыточные и нулевые величины исключаются на последующих шагах при свертывании схемы путем поэтапного эквивалентирования соседних элементов, образующих каскадное соединение (табл. 1, п. 2).

Модель трансформатора представлена в виде каскадного соединения трех многополюсников – первичной обмотки, магнитопровода и вторичной обмотки – с матрицами прямой передачи  $\underline{\mathbf{A}}_{обм1}$ ,  $\underline{\mathbf{A}}_M$  и  $\underline{\mathbf{A}}_{обм2}$  соответственно (табл. 2). Отдельно рассмотрено моделирование трансформатора с трехстержневым магнитопроводом. Соединение зажимов обмоток в соответствии с заданной схемой и группой соединения обеспечивается с помощью матриц переключения.

Каскадное эквивалентирование трансформатора

Табл. 2.

1. Каскадная модель трансформатора	
	<p>Матрицы прямой передачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– обмоток           <math display="block">\underline{\mathbf{A}}_{обм1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} &amp; p w_1 \mathbf{1} \\ w_1^{-1} \mathbf{1} &amp; \mathbf{0} \end{bmatrix},</math> <math display="block">\underline{\mathbf{A}}_{обм2} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} &amp; w_2 \mathbf{1} \\ (p w_2)^{-1} \mathbf{1} &amp; \mathbf{0} \end{bmatrix};</math> </li> <li>– магнитопровода           <math display="block">\underline{\mathbf{A}}_M = \begin{bmatrix} \mathbf{1} &amp; \mathbf{R}_M \\ \mathbf{0} &amp; \mathbf{1} \end{bmatrix}.</math> </li> </ul> <p>Уравнение прямой передачи трансформатора</p> $\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_1[3] \\ \underline{\mathbf{I}}_1[3] \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{A}}_T \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_2[3] \\ \underline{\mathbf{I}}_2[3] \end{bmatrix},$ $\underline{\mathbf{A}}_T = \underline{\mathbf{A}}_{обм1} \underline{\mathbf{A}}_M \underline{\mathbf{A}}_{обм2}.$
2. Каскадное эквивалентирование дополнительных обмоток трансформатора	
	<p>Представление для «ответвления»</p> $\underline{\mathbf{A}}_3 = \underline{\mathbf{A}}_{обм3} \underline{\mathbf{A}}_{отп}$ $\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{F}}_3[3] \\ \underline{\Phi}_3[3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}}_{3,11} & \underline{\mathbf{A}}_{3,12} \\ \underline{\mathbf{A}}_{3,21} & \underline{\mathbf{A}}_{3,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{V}}_3[3] \\ \mathbf{0}[3] \end{bmatrix}$ <p>Преобразование, аналогичное форме «Z»</p> $\underline{\mathbf{F}}_3[3] = \underline{\mathbf{R}}_{эКВ3} \underline{\Phi}_3[3], \quad \underline{\mathbf{R}}_{эКВ3} = \underline{\mathbf{A}}_{3,11} \underline{\mathbf{A}}_{3,21}^{-1}.$ <p>Матрицы прямой передачи:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– магнитопровода           <math display="block">\underline{\mathbf{A}}_{M+3} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} &amp; \mathbf{R}_M + \underline{\mathbf{R}}_{эКВ3} \\ \mathbf{0} &amp; \mathbf{1} \end{bmatrix};</math> </li> <li>– трансформатора           <math display="block">\underline{\mathbf{A}}_T = \underline{\mathbf{A}}_{обм1} \underline{\mathbf{A}}_{M+3} \underline{\mathbf{A}}_{обм2}.</math> </li> </ul>



При эквивалентировании трехобмоточного трансформатора используется включение описания обмотки и ее нагрузки в модель магнитопровода (табл. 2, п. 2). При этом обмотка с нагрузкой представляется в виде «ответвления» от магнитопровода. Дальнейшее эквивалентирование системы с трансформатором производится в соответствии с общими правилами (табл. 1).

Автором разработана программа, использующая данные приемы для моделирования многопроводных систем, содержащих как линии электропередачи, так и трансформаторы. Данная программа применялась для анализа режимов коротких замыканий за трансформаторами ответвлений от линии электропередачи, а также в самих трансформаторах.

**Во второй главе** рассматривается имитационное моделирование силового трансформатора в нелинейных режимах, таких как бросок намагничивающего тока и перевозбуждение, включение трансформатора с витковым КЗ. Разработана программа, которая позволяет моделировать трехфазный  $N$ -обмоточный силовой трансформатор с произвольной магнитной системой и произвольной группой соединения обмоток. Внешние цепи, подключенные к трансформатору, рассматриваются, как правило, в виде эквивалентного источника ЭДС с внутренним сопротивлением либо в виде эквивалентной нагрузки.

Система уравнений, описывающая процессы в трансформаторе, представляется в виде матричного уравнения

$$\mathbf{u}_T(t) = \mathbf{R}_T \mathbf{i}_T(t) + \mathbf{L}_T \frac{d\mathbf{i}_T(t)}{dt}, \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_T(i, j) = \mathbf{L}_\mu(i, j) \cdot \sqrt{1 - \delta_{\text{рас},ij}}, \quad i, j = \overline{1, N},$$

$$\mathbf{L}_\mu = \mathbf{w}_T \mathbf{G}_{\text{м,диф},\Sigma} \mathbf{w}_T^T,$$

где  $N$  – число обмоток;  $\mathbf{u}_T$ ,  $\mathbf{i}_T$  – векторы напряжений и токов обмоток;  $\mathbf{R}_T$  – матрица активных сопротивлений,  $\delta_{\text{рас}}$  – матрица коэффициентов рассеяния, где  $\delta_{\text{рас},ij}$  – коэффициент рассеяния между  $i$ -й и  $j$ -й обмоткой ( $\delta_{\text{рас}}(j, j) = 0$ );  $\mathbf{w}_T$  – матрица чисел витков обмоток,  $\mathbf{G}_{\text{м,диф},\Sigma}$  – эквивалентная матрица, в общем случае нелинейная и рассчитываемая из элементов вектора дифференциальных магнитных сопротивлений участков магнитной цепи  $\mathbf{R}_{\text{м,диф}}$  с использованием законов Кирхгофа для магнитных цепей.

С учетом внешних цепей уравнение (2) приобретает вид

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{R}_\Sigma \mathbf{i}_\Sigma(t) + \mathbf{L}_\Sigma \frac{d\mathbf{i}_\Sigma(t)}{dt}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_\Sigma = \mathbf{R}_{\text{внеш}} + \mathbf{S}_1 \mathbf{R}_T, \quad \mathbf{L}_\Sigma = \mathbf{L}_{\text{внеш}} + \mathbf{S}_1 \mathbf{L}_T, \quad \mathbf{i}_\Sigma(t) = \mathbf{S}_2 \mathbf{i}_T(t),$$

где  $\mathbf{S}_1$ ,  $\mathbf{S}_2$  – матрицы переключений, преобразующие вектор токов и матрицы сопротивлений и индуктивностей;  $\mathbf{i}_\Sigma(t)$  – искомый преобразованный вектор токов;  $\mathbf{e}(t)$

– вектор ЭДС;  $\mathbf{R}_{\text{внеш}}$ ,  $\mathbf{L}_{\text{внеш}}$  – матрицы, описывающие внешние цепи;  $\mathbf{R}_{\Sigma}$ ,  $\mathbf{L}_{\Sigma}$  – эквивалентные матрицы активных сопротивлений и индуктивностей суммарной модели.

Модель позволяет рассчитывать витковое замыкание в произвольной  $j$ -й обмотке, от которой делается отвод, условно разделяющий обмотку на поврежденную  $f$ - и оставшуюся  $r$ -части, содержащие доли витков  $x_f$  и  $1-x_f$  соответственно. При этом число обмоток увеличивается на одну, и матрицы  $\mathbf{R}_T$  и  $\mathbf{L}_T$ , описывающие неповрежденный трансформатор, преобразуются к виду:

$$\mathbf{R}_T^f = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & & \\ \cdots & R_{r,jj}(1-x_f) & 0 & \cdots & \\ \cdots & 0 & R_{r,jj}x_f & \cdots & \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \end{bmatrix}, \mathbf{L}_T^f = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \cdots & L_{r,jj}^{rr} & L_{r,jj}^{rf} & \cdots & L_{r,ij}^r & \cdots \\ \cdots & L_{r,jj}^{rf} & L_{r,jj}^{ff} & \cdots & L_{r,ij}^f & \cdots \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ \cdots & L_{r,ij}^r & L_{r,ij}^f & \cdots & L_{r,ii} & \cdots \\ & \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots \end{bmatrix},$$

где

$$L_{r,ij}^{rr} = L_{r,jj} \frac{(1-x_f)^2}{1-2x_f(1-x_f)(1-\sqrt{1-\delta_{\text{рас}}^{rf}})},$$

$$L_{r,ij}^{ff} = L_{r,jj} \frac{x_f^2}{1-2x_f(1-x_f)(1-\sqrt{1-\delta_{\text{рас}}^{rf}})},$$

$$L_{r,ij}^{rf} = L_{r,jj} \frac{x_f(1-x_f)\sqrt{1-\delta_{\text{рас}}^{rf}}}{1-2x_f(1-x_f)(1-\sqrt{1-\delta_{\text{рас}}^{rf}})},$$

$$L_{r,ij}^r = L_{r,ij}(1-x_f), L_{r,ij}^f = L_{r,ij}x_f.$$

При неизвестном значении коэффициента рассеяния  $\delta_{\text{рас}}^{rf}$  между  $r$ - и  $f$ -частями он принимается равным минимальному коэффициенту рассеяния между парой обмоток на одном стержне.

Решение системы (3) на каждом шаге производится при условии линеаризации нелинейных цепей трансформатора и отдельном определении компонентов принужденного  $\mathbf{i}_{\Sigma, \text{уст}}(t)$  и свободного  $\mathbf{i}_{\Sigma, \text{св}}(t)$  режима, что значительно упрощает решение задачи. Для расчета нелинейной модели на интервале времени от нуля до  $t_{\text{расч}}$  программа использует алгоритм по рис. 1, который позволяет получить устойчивое решение.

**Третья глава** посвящена информационному анализу распознаваемости витковых замыканий в обмотках однофазного трансформатора и автотрансформатора (АТ). Отслеживаемыми режимами ( $\alpha$ -режимы) являются витковые замыкания в рассматриваемой обмотке трансформатора, а альтернативными режимами ( $\beta$ -режимы), ограничивающими распознаваемость  $\alpha$ -режимов, являются внешние замыкания, т.е. замыкания за пределами обмоток трансформатора, и нагрузочный режим. Трансформатор имеет РПН в обмотке ВН, а АТ – на стороне СН.



Рис. 1 Алгоритм расчета модели с нелинейным трансформатором

Отслеживаемый режим признается абсолютно нераспознаваемым, если вектор его замера  $\mathbf{V}_\alpha$  (далее – просто замер), в общем случае включающий в себя значения токов и напряжений предшествующего и текущего режимов, полностью совпадает хотя бы с одним из векторов замера альтернативных режимов  $\mathbf{V}_\beta$ , т.е.

$$\mathbf{V}_\alpha(\mathbf{x}_\alpha) = \mathbf{V}_\beta(\mathbf{x}_\beta). \quad (4)$$

Вектор  $\mathbf{V}_\alpha$  дает имитационная модель отслеживаемых режимов, для которой задается вектор параметров  $\mathbf{x}_\alpha = [\mathbf{x}_{\alpha, \text{норм}}^\top, x_{f\alpha}, R_{f\alpha}]^\top$ , состоящий из нормальных параметров  $\mathbf{x}_{\alpha, \text{норм}}$ , таких как модули и разность фаз источников ЭДС систем, эквивалентные сопротивления систем, мощность нагрузки, которые оказывают влияние и на предшествующий, и на аварийный режим, а также из аварийных параметров  $\mathbf{x}_{\alpha, \text{ав}}$ , таких как место замыкания  $x_{f\alpha}$  и переходное сопротивление  $R_{f\alpha}$ . Аналогично замер  $\mathbf{V}_\beta$  получается с помощью имитационной модели альтернативных режимов при задании вектора параметров  $\mathbf{x}_\beta = [\mathbf{x}_{\beta, \text{норм}}^\top, x_{f\beta}, R_{f\beta}]^\top$ .

Количественной оценкой распознаваемости конкретного вида замыкания служит объектная характеристика  $R_{f, \min}(x_f)$ , выражающая минимальное значение переходного сопротивления, при котором наступает нераспознаваемость, от координаты места повреждения. В общем случае объектная характеристика определяется путем минимизации расстояния между замерами  $\alpha$ - и  $\beta$ -режимов, проводимой на заданном диапазоне параметров  $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta$ ,  $\mathbf{x}_{\alpha, \text{норм}}$  и  $R_f$  для каждой заданной точки замыкания  $x_f$ .

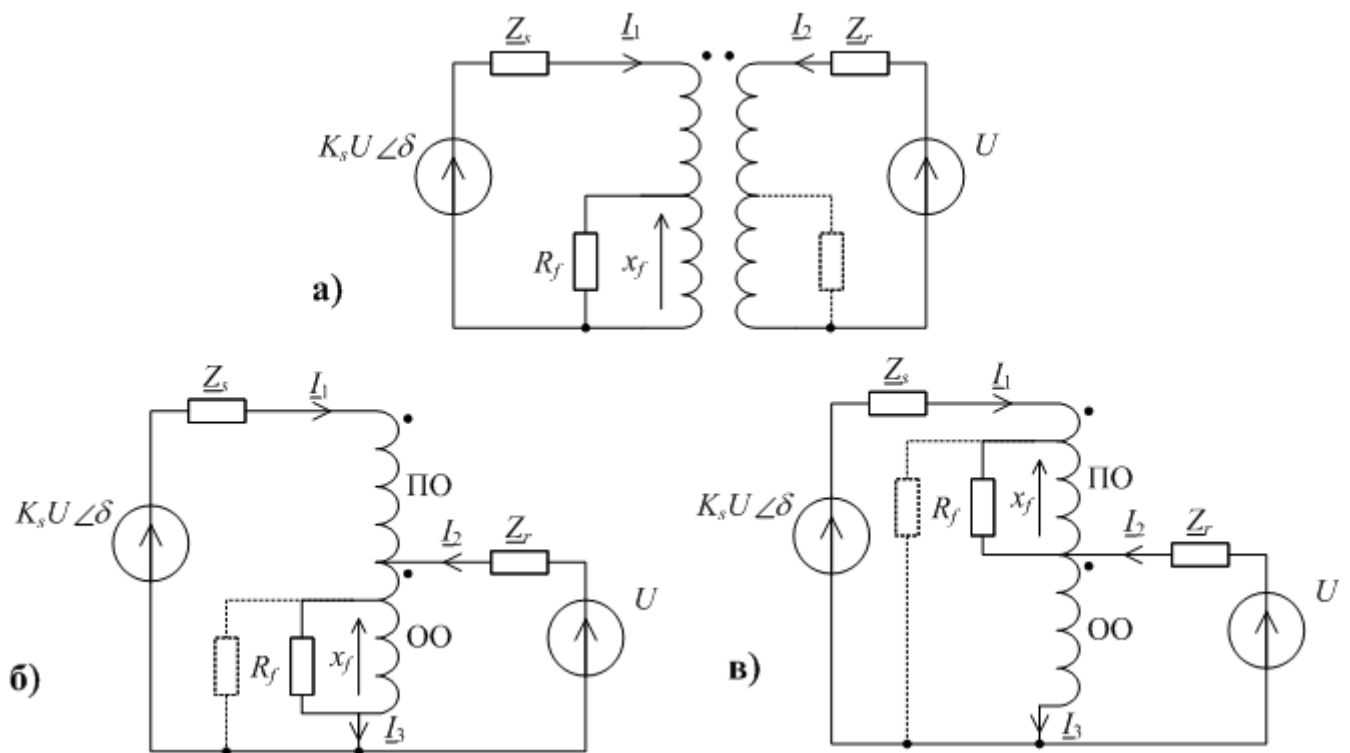


Рис. 2 Имитационные модели режимов замыкания в обмотке  
 а – витковые замыкания в обмотках двухобмоточного трансформатора;  
 б – витковые замыкания и замыкания на землю в общей обмотке (ОО) АТ;  
 в – витковые замыкания и замыкания на землю в последовательной обмотке (ПО) АТ.

$$R_{f,\min}(x_f) = \min_{R_f} \arg \left\{ \min_{\substack{\mathbf{x}_\beta \in G_\beta, \\ \mathbf{x}_{\alpha,\text{норм}}, R_f}} \left( \text{dist} \left[ \mathbf{V}_\alpha(\mathbf{x}_{\alpha,\text{норм}}, x_f, R_f), \mathbf{V}_\beta(\mathbf{x}_\beta) \right] \right) < \varepsilon \right\}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – малая величина. Процедура минимизации (5) строится таким образом, чтобы определялось минимальное значение переходного сопротивления  $R_f(x_f)$ , для которого выполняется равенство (4).

При моделировании  $\alpha$ -режима (рис. 2) использовалась модель однородного трансформатора, для которого коэффициент рассеяния между парой обмоток, на которые разбивается поврежденная обмотка, одинаков независимо от места замыкания. Ввиду недостаточности априорной информации коэффициент рассеяния между данной парой обмоток принимался равным коэффициенту рассеяния между обмотками неповрежденного трансформатора. Такое допущение позволяет моделировать  $\alpha$ -режимы с точностью, достаточной для целей релейной защиты.

В качестве информационной базы использовался замер токов, приведенных к единому базису  $\mathbf{V}=[I_{1*}, I_{2*}]^T$ . Содержащиеся в данном векторе три независимые скалярные величины удобно преобразовать без потери информации в следующие координаты пространства замеров (уставочное пространство): дифференциальный ток  $I_{д*} = |I_{1*} + I_{2*}|$ , максимальный ток  $I_{\text{макс}*} = \max(I_{1*}, I_{2*})$  и разность фаз токов плеч  $\varphi$ . При исследовании АТ использовался также замер токов  $\mathbf{V}=[I_{1*}, I_{3*}]^T$ .

Построены области отслеживаемых и альтернативных режимов. Рассмотрена

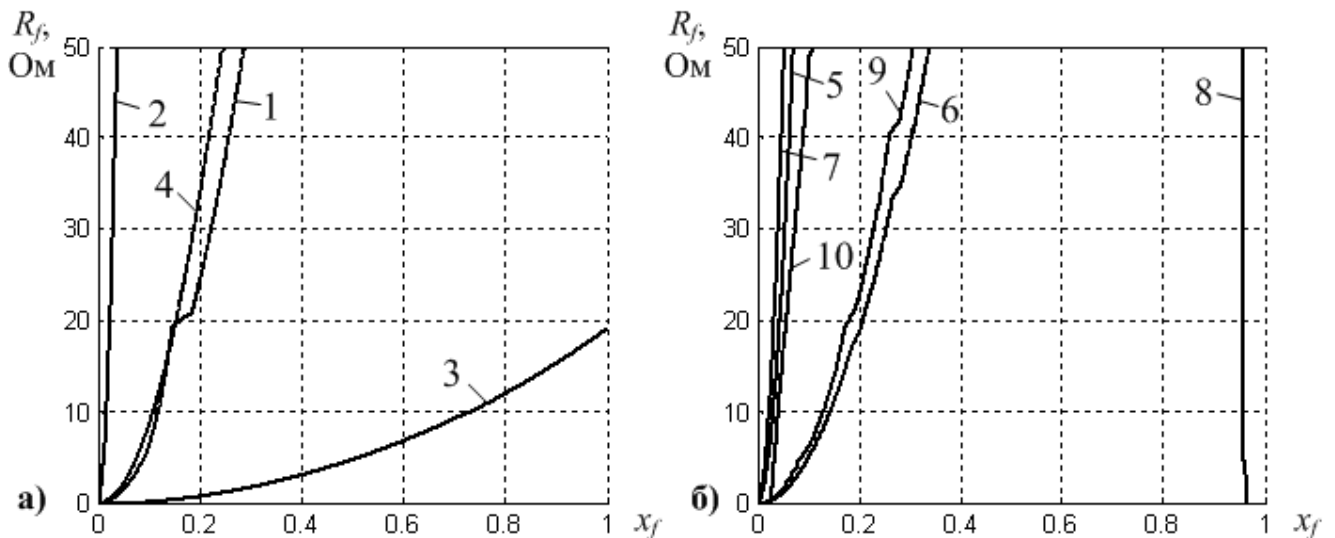


Рис. 3 Объектные характеристики распознаваемости замыканий  
а – в двухобмоточном трансформаторе: 1,2 – в обмотке ВН; 3,4 – в обмотке НН;  
2,4 – при наличии нагрузки на стороне НН;  
б – в АТ: 5,7 – витковое замыкание ОО; 8 – замыкание ОО на землю;  
6,9 – витковое замыкание ПО; 10 – замыкание ПО на землю;  
1,2,3,4,5,6 – при использовании токов  $I_{1*}$  и  $I_{2*}$ ; 7,8,9,10 – при использовании токов  $I_{1*}$  и  $I_{3*}$ .

распознаваемость витковых замыканий при использовании областей  $\beta$ -режимов в пространстве  $(I_{\text{макс}*}, I_{\text{д}*}, \varphi)$ , а также на плоскостях  $(I_{\text{макс}*}, I_{\text{д}*})$  и  $(I_{\text{д}*}, \varphi)$ . Полученные объектные характеристики распознаваемости разных видов витковых замыканий в пространстве приведены на рис. 3а – для однофазного двухобмоточного трансформатора, на рис. 3б – для однофазного автотрансформатора. Для двухобмоточного трансформатора отдельно рассмотрен случай с нагрузкой на стороне НН. Характеристика распознаваемости замыканий ПО на землю при использовании замера  $\mathbf{V}=[I_{1*}, I_{2*}]^T$  выше 50 Ом, поэтому на рис. 3 не показаны. Диапазон варьируемых нормальных параметров:  $K_s = 0,8 \dots 1,2$ ,  $\delta = -30^\circ \dots 30^\circ$ ,  $Z_{s*} = Z_{r*} = 0,025 \dots 0,1$ . Для примера взяты следующие параметры двухобмоточного трансформатора:  $S_{\text{н}} = 32/3$  МВА,  $U_{\text{н1}} = 115/\sqrt{3}$  кВ,  $U_{\text{н2}} = 10,5$  кВ,  $i_0 = 0,7\%$ ,  $u_{\text{к}} = 10,5\%$ ,  $P_{\text{к}} = 145$  кВт, диапазон РПН  $\pm 16\%$ . Параметры автотрансформатора те же, за исключением номинальных напряжений:  $U_{\text{н1}} = 230/\sqrt{3}$  кВ,  $U_{\text{н2}} = 121/\sqrt{3}$  кВ.

**В четвертой главе** представлена разработка микропроцессорной защиты шин серии «Бреслер ТШ 2310», выполненная под руководством и при непосредственном участии автора. Микропроцессорный терминал (рис. 4а) выполняет функцию дифференциальной токовой защиты шин (ДЗШ) с количеством присоединений до 16. Используется торможение максимальной суммой полуволн. ДЗШ имеет быстродействие 3-5 мс при внезапных КЗ и 10-20 мс при переходе внешнего КЗ во внутреннее, устойчива к токам небаланса при внешних КЗ, искаженных насыщением ТТ с участками правильной трансформации от 2,5 мс.

Проведен анализ чувствительности пускового органа ДЗШ с различными принципами торможения. Наихудшим случаем является схема с подключением АТ через два выключателя (рис. 4в) при отсутствии питающих присоединений на поврежденной системе шин. Для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности ДЗШ в таком режиме пусковой орган реализован с расширением области срабатывания пускового органа в режиме «соответствия фиксации» до линии с коэффициентом торможения  $K_{\text{т}} = 0,25$  (рис. 4б).

На рис. 5 приведены диаграммы работы дифференциальной защиты во время опытной эксплуатации в 2008 году. Устройство было подключено к ТТ, встроенным в выключатели: секционному (СВ), линии электропередачи (ЛЭП) и трансформатора Т-2. В связи с утечкой масла произошло повреждение фазы В масляного выключателя Т-2 типа МКП-110, которое приняло развивающийся характер. Возникшее на фоне нагрузочного режима (участок А) замыкание, первоначально внутреннее для ДЗШ (участок В), через два периода переходит во внешнее с сильным насыщением ТТ (участок С), а еще через четыре периода – вновь переходит во внутреннее (участок D). Время срабатывания измерительного органа ДЗШ при возникновении внутреннего КЗ составило 3 мс, а при переходе из внешнего КЗ во внутреннее – 12 мс. Измерительный орган ДЗШ возвращается и не срабатывает на интервале внешнего КЗ (участок С) с

насыщением ТТ через 3-5 мс на каждом полупериоде благодаря реализованному в защите критерию отстройки от насыщения ТТ.

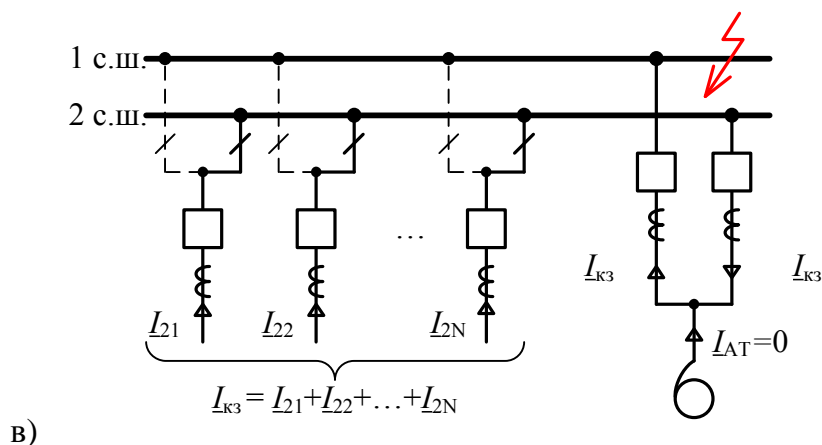
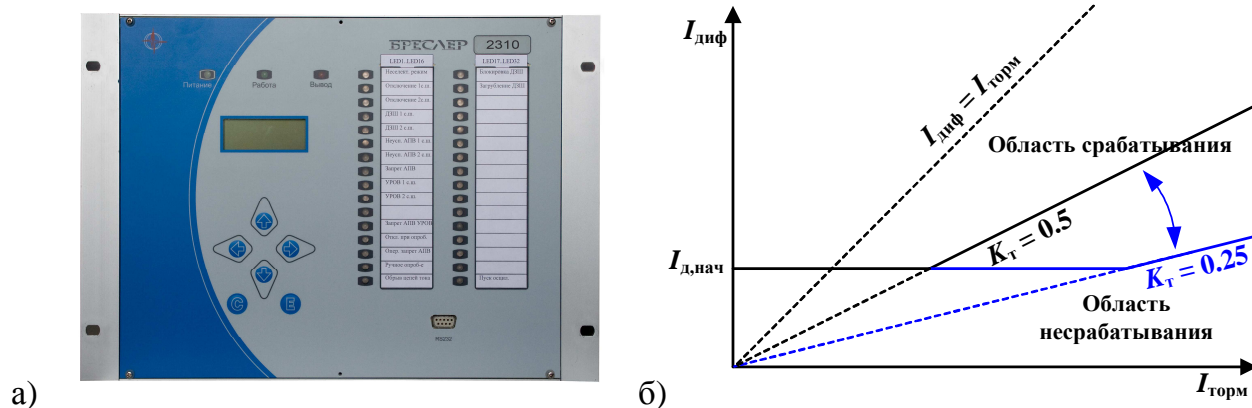


Рис. 4 Защита шин «Бреслер ТШ 2310»:

- а – микропроцессорный терминал; б – характеристика срабатывания пускового органа ДЗШ;
- в – расчетная схема для анализа чувствительности ДЗШ

Особое внимание уделено разработке блока токовых входов с учетом переходных режимов. Достаточно просто получить промежуточный трансформатор тока (ПТТ) с требуемыми полной и угловой погрешностями и предельной кратностью  $K_{10}$  при учете только синусоидального режима. Однако в переходных режимах условия передачи полезного сигнала утяжеляются. Для оценки способности ПТТ передавать основную составляющую тока переходного режима  $i_1$ , содержащего кроме нее еще и экспоненциальную составляющую с заданной постоянной времени  $\tau_1$ , вводится понятие предельной кратности в переходном режиме  $K_{10пер}$ , которое характеризует способность ПТТ передавать основную составляющую тока в модели сигнала с максимальной апериодической составляющей

$$i_1(t) = I_m (e^{-t/\tau_1} - \cos \omega t). \quad (6)$$

Исследование показало, что для увеличения  $K_{10пер}$  целесообразно использовать ПТТ с уменьшенным значением постоянной времени вторичного контура  $\tau_2$ , определяемой с учетом принятых допущений как  $\tau_2 = L_\mu / R_2$ . Варьируя его величину, можно получить характеристики ПТТ, удовлетворяющие предъявляемым требованиям

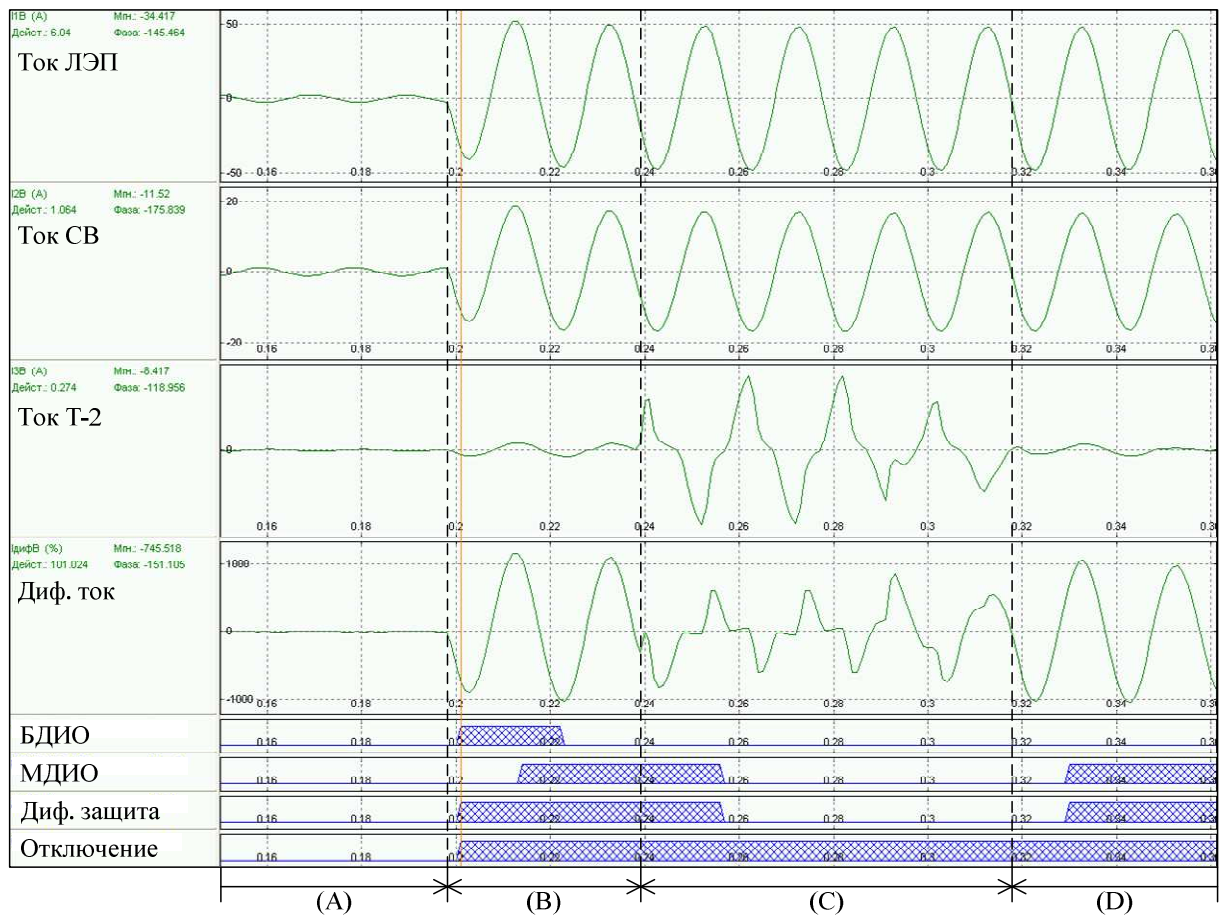


Рис. 5 Диаграммы работы ДЗШ при развивающемся внутреннем КЗ:  
БДИО, МДИО – быстродействующий и медленнодействующий измерительные органы.

как по точности измерения синусоидальных токов, так и по условию отсутствия насыщения при наихудшем переходном режиме. Рекомендуется использовать следующее расчетное выражение для  $K_{10\text{пер}}$ :

$$K_{10,\text{пер}} = K_{10} / (\omega\tau_1\chi_{\text{пер}} + 1),$$

$$\chi_{\text{пер}} = \begin{cases} K_{\tau}^{K_{\tau}/(1-K_{\tau})}, & K_{\tau} \neq 1 \\ 1/(eK_{\tau}), & K_{\tau} \rightarrow 1 \end{cases}, \quad K_{\tau} = \frac{\tau_1}{\tau_2}.$$

Приведена зависимость  $\chi_{\text{пер}}$  от  $K_{\tau}$  (рис. 6). Сравнение с экспериментальными данными показало, что формулы обеспечивают достаточную точность расчета.

К защите шин, как и к другим устройствам релейной защиты, могут предъявляться требования по обеспечению минимальной полной погрешности в переходных режимах. К тому же могут быть поставлены

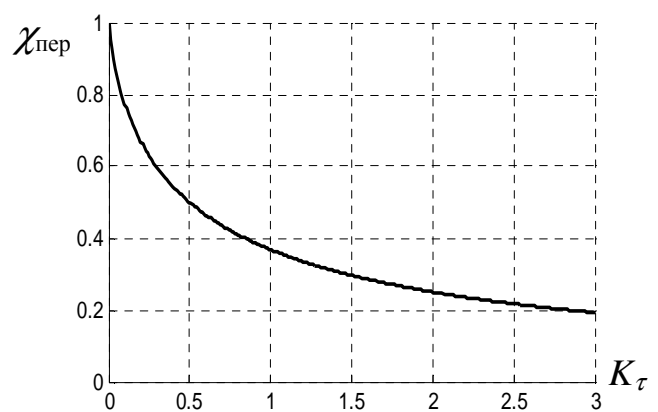


Рис. 6 Обобщенная кривая  $\chi_{\text{пер}}(K_{\tau})$ .



требования по уменьшению габаритов ПТТ. Решением проблемы в первом случае является применение магнитопровода с высокой магнитной проницаемостью. Однако в этом случае значение  $\chi_{\text{пер}}$  стремится к единице, что обуславливает значительное снижение  $K_{10\text{пер}}$ . Во втором случае уменьшается значение  $K_{10}$ , что также влияет на снижение предельной кратности в переходном режиме  $K_{10\text{пер}}$ . Таким образом, обеспечить отсутствие искажения тока вследствие насыщения ПТТ в широком диапазоне переходных режимов для таких случаев достаточно трудно.

Для решения проблемы насыщения ПТТ, используемых в составе терминалов релейной защиты и автоматики, при передаче токов переходного процесса КЗ с экспоненциальной составляющей автором разработана реализация токового входа с цепью размагничивания магнитопровода в широком динамическом диапазоне (рис. 7). Для трансформатора с тороидальным магнитопроводом индуктивным сопротивлением рассеяния вторичной обмотки ПТТ можно пренебречь, приняв схему замещения токового входа по рис. 7б. Для выполнения размагничивания магнитопровода ПТТ используется стабилизатор напряжения, шунтированный управляемым ключом. В качестве ключа используется быстродействующее твердотельное реле со временем включения/отключения менее одной миллисекунды.

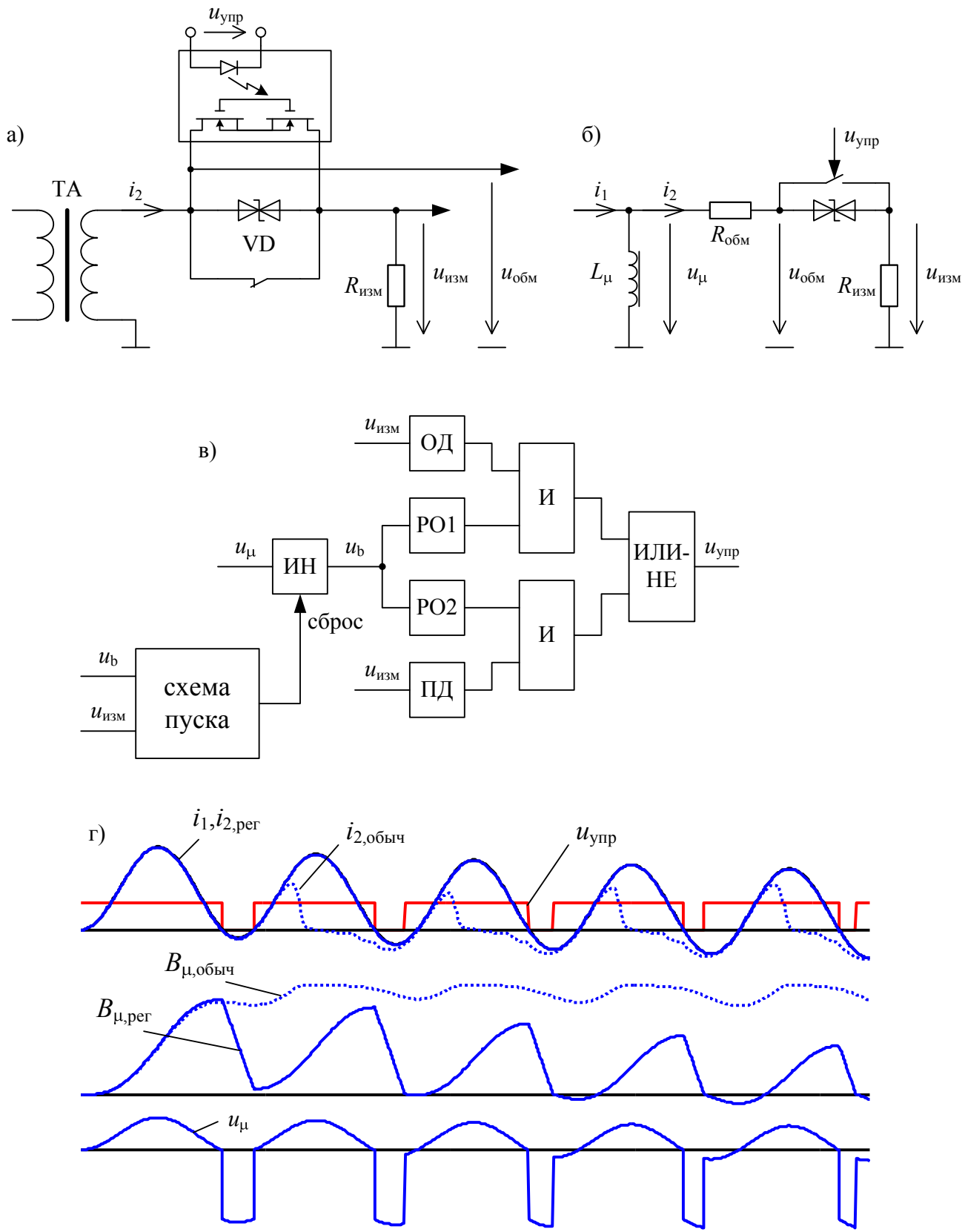
Схема управления ключом реализована в составе цифрового сигнального процессора, использующего результаты измерения сигналов  $u_{\text{обм}}$  и  $u_{\text{изм}}$  и производящего вычисления с циклом обработки до 10 кГц. Производится моделирование ПТТ и рассчитывается сигнал  $u_b$ , пропорциональный индукции:

$$u_b(k) = u_{\mu}(k) + u_{\mu}(k-1) - a_e u_b(k-1), \quad (7)$$

$$u_{\mu}(k) = u_{\text{обм}}(k) + u_{\text{изм}}(k) a_r,$$

где  $k$  – дискретное время,  $a_r = R_{\text{обм}}/R_{\text{изм}}$ ,  $a_e = 2e^{-\Delta t/\tau}$ ,  $\Delta t$  – интервал дискретизации,  $\tau$  – постоянная времени вторичной цепи ТТ при замкнутом ключе. Схема (рис. 7в) состоит из интегратора ИН, реализующего процедуру (7), релейных органов РО1 и РО2, реагирующих соответственно на положительные и отрицательные значения  $u_b$ , детекторов отрицательного ОД и положительного ПД сигналов, логических элементов И, логического элемента ИЛИ-НЕ и схемы пуска.

В нормальном режиме управляемый ключ шунтирует стабилизатор напряжения, что обеспечивает минимальное сопротивление вторичной цепи. При протекании токов нагрузки максимальное значение тока не превышает заданного уровня, так же как и интеграл каждой полуволны одного знака, что обуславливает сброс интеграла (7) при каждом изменении знака тока. Схема управления вводится в действие при возникновении скачка тока. В этом случае моделирование ПТТ в соответствии с (7) продолжается до тех пор, пока интеграл  $u_b$  не опустится ниже уставки возврата и максимальное значение выпрямленного тока на периоде не опустится ниже расчетной величины. После пуска схема управления подает команду на размыкание ключа при изменении знака измеряемого тока, когда сигналы интеграла  $u_b$  и тока разнополярные.



$i_{2,обыч}$ ,  $i_{2,пер}$  – вторичные токи обычного ПТТ и ПТТ с размагничиванием;  
 $B_{\mu,обыч}$ ,  $B_{\mu,пер}$  – индукция обычного ПТТ и ПТТ с размагничиванием;

Рис. 7 Реализация токового входа

а – устройство, б – схема замещения, в – схема управления ключом, г – диаграммы работы

При этом во вторичную цепь вводится стабилизатор напряжения, что обеспечивает интенсивное размагничивание магнитопровода ПТТ и, как следствие, предотвращает насыщение ПТТ при передаче следующей полуволны тока противоположного знака. Схема управления шунтирует стабилизатор напряжения до изменения знака тока или при снижении сигнала  $u_b$  ниже уставки возврата, чем исключается перерегулирование. Диаграммы работы токового входа с цепью обратного размагничивания и сравнение с обычным ТТ приведено на рис. 7г.

Для моделирования процесса размагничивания магнитопровода ПТТ при сбросе тока в составе (7) реализовано экспоненциальное затухание сигнала  $u_b$ . Это позволяет обеспечить правильную дозировку воздействия на размагничивание магнитопровода ПТТ при последующем появлении тока короткого замыкания до того, как ток намагничивания ПТТ снизится до нуля. Такой режим возможен, например, при неуспешном АПВ присоединения.

Для исключения воздействия на ПТТ при выключенном питании устройства стабилизатор напряжения шунтируется реле с нормально замкнутым контактом.

Приведенная реализация токового входа позволяет решить проблему насыщения ПТТ при передаче тока КЗ с экспоненциальной составляющей и одновременно уменьшить размеры используемого ТТ. Нерешенной в данном случае остается проблема насыщения ПТТ на первом периоде тока КЗ. Однако данная проблема решается выбором таких параметров ПТТ, которые обеспечивают передачу без насыщения только первого периода, а не всего тока КЗ с максимальной расчетной экспоненциальной составляющей. Следует отметить, что при невозможности выполнения данного условия новая токовая цепь все же обеспечивает значительное уменьшение числа периодов вторичного тока, искаженных вследствие насыщения ПТТ.

Использование данных положений при разработке токовых входов устройств релейной защиты, разрабатываемых «ИЦ Бреслер», позволило получить входы широкого применения (для защиты мощных трансформаторов, шин, реакторов, генераторов), способные передавать токи переходного режима с основной составляющей до  $40I_{ном}$  и постоянной времени до 0,3 сек.

**Пятая глава** посвящена разработке микропроцессорной защиты трансформаторов и исследованию ее распознающей способности. Построены характеристики распознавания замыканий по рис. 2 при использовании дифференциальной защиты трансформаторов (ДЗТ) с торможением максимальным током плеча (рис. 8). Использовались уставки по начальному току срабатывания 0,3 о.е. и коэффициенту торможения 0,4 о.е. Минимальное количество распознаваемых витков для разных видов замыканий и их сравнение с пределами распознаваемости приведено в табл. 3. Показано, что сквозной характер токов  $I_{1*}$ ,  $I_{2*}$  при витковом КЗ в ПО автотрансформатора, обнаруженный проф. А.С. Засыпкиным, не имеет места при включении ДЗТ на токи  $I_{1*}$ ,  $I_{3*}$ , что ведет к повышению чувствительности защиты к таким повреждениям.

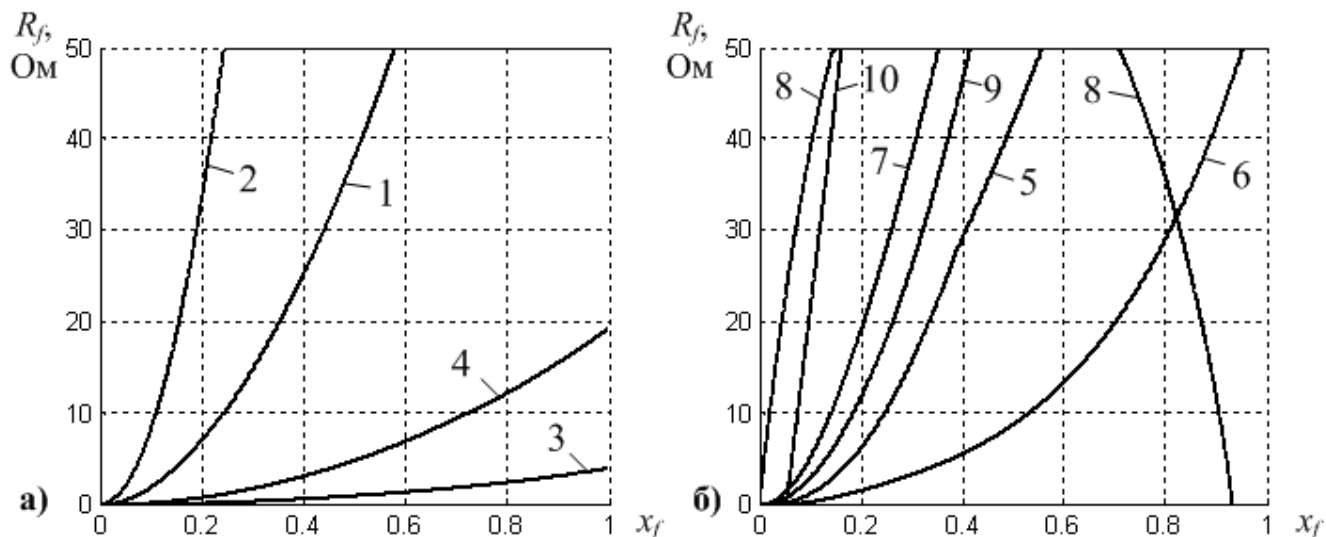


Рис. 8 – Объектные характеристики распознавания ДЗТ замыканий  
 а – в двухобмоточном трансформаторе: 1,2 – в обмотке ВН; 3,4 – в обмотке НН;  
 2,4 – при наличии нагрузки на стороне НН;  
 б – в АТ: 5,7 – витковое замыкание ОО; 8 – замыкание ОО на землю;  
 6,9 – витковое замыкание ПО; 10 – замыкание ПО на землю;  
 1,2,3,4,5,6 – при использовании токов  $I_{1*}$  и  $I_{2*}$ ; 7,8,9,10 – при использовании токов  $I_{1*}$  и  $I_{3*}$ .

Для повышения чувствительности к витковым замыканиям в общей и последовательной обмотках АТ, а также к замыканиям общей обмотки на землю, предлагается использовать дифференциальную зону, включенную на токи сторон ВН, НН и в нейтрали ОО, в дополнение к основной ДЗТ, включенной на токи сторон ВН, СН и НН. Отсутствие чувствительности дополнительной ДЗТ к замыканиям ПО и ОО на вводе стороны СН, междуфазным или на землю, компенсируется высокой чувствительностью основной ДЗТ к таким повреждениям.

Под руководством и при непосредственном участии автора разработан терминал микропроцессорной защиты трансформаторов серии «Бреслер ТТ 2108» (рис. 9), производство которого освоено предприятием «ИЦ Бреслер». Данное многофункциональное устройство реализует в своем составе полный набор основных и резервных защит двух- или трехобмоточного трансформатора 35-220 кВ и набор основных защит автотрансформатора 220 кВ. Предусмотрена возможность выполнения двух дифференциальных зон защиты. Вторая дифференциальная зона может использоваться в качестве ДЗТ с включением на токи ОО, а также для защиты токоограничивающего реактора или регулировочного трансформатора стороны НН или ошиновки стороны ВН.



Рис. 9 Терминал защиты трансформаторов «Бреслер ТТ 2108»

Согласно требованиям ДЗТ должна иметь ток срабатывания  $I_{д,нач} = 0,3-0,5$  о.е., что, как правило, приводит к излишнему срабатыванию при неисправности, обрыве или замыкании, во вторичных токовых цепях. Для повышения устойчивости ДЗТ реализован быстродействующий орган, упрощенная структурная схема которого для двух плеч одной фазы приведена на рис. 10. Активация органа происходит в течение 10 секунд после подачи сквозных токов нагрузки. Орган чувствителен к повреждениям вторичных цепей в диапазоне токов от 0,1 до 1,25 номинальных токов трансформатора и реагирует на приращение дифференциального тока выше уставки  $\Delta I_{обрыв}$  с одновременным спадом модуля тока в неисправном плече при отсутствии набросов тока в других плечах. Орган действует с самоподхватом на загрузку ДЗТ до уставки  $I_{д,загр}$ . Отстройка от токов небаланса, связанных с неучетом положения РПН, осуществляется использованием как приращений дифференциальных токов, так и адаптивной уставки  $I_{обрыв}$ , зависящей от уровня тока, для контроля величины небаланса в режимах нагрузки и неисправности цепей. Типичные значения уставок:  $\Delta I_{обрыв} = 0,05-0,1$  о.е.,  $I_{д,загр} = 1,2-1,5$  о.е.

Микропроцессорная защита трансформаторов «Бреслер ТТ 2108» была рекомендована к применению Аттестационной комиссией ОАО «ФСК ЕЭС» в 2007 году и к настоящему времени установлена более чем на 100 подстанциях энергосистем РФ и ближнего зарубежья. За время эксплуатации устройство показало надежную отстройку от внешних замыканий и режимов броска намагничивающего тока, а также высокую чувствительность и быстродействие.

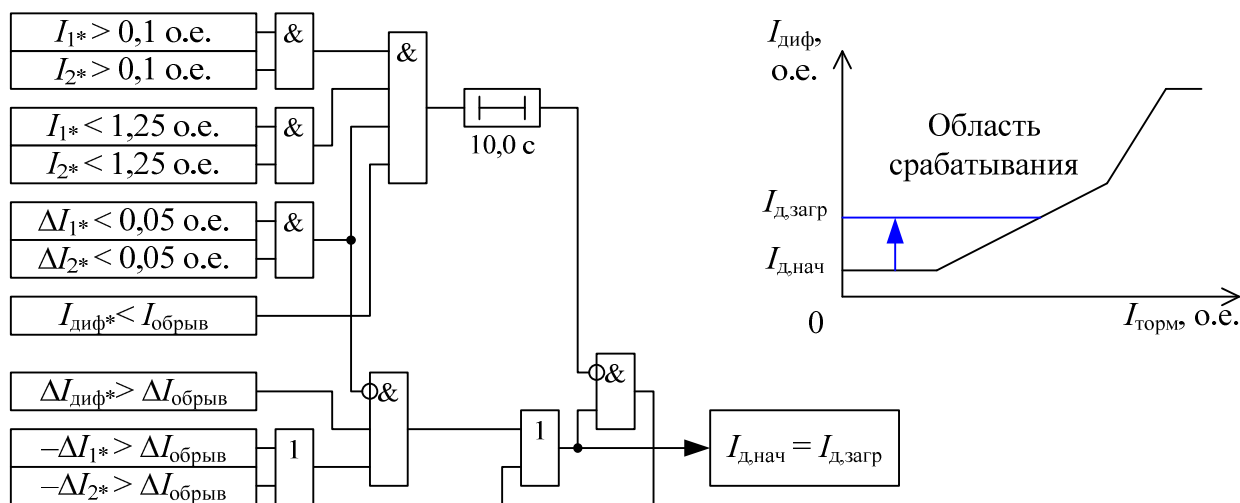


Рис. 10 Структурная схема органа контроля исправности токовых цепей ДЗТ

Распознаваемое число витков КЗ  $x_f$ , %, в обмотках трансформатора (а) и АТ (б) Табл.3

а)	Двухстороннее питание		Одностороннее питание			
	1	2	1	2		
ВН	1,4	2,6	0,2	1,2		
НН	6,9	14,6	1,1	7,1		
б)	Витковое КЗ			КЗ на землю		
	1	2	3	1	2	3
ОО	0,3	4,3	1,7	0,01	4,3	0,02
ПО	1,6	7,4	2,7	2,7	0	5,4

Столбцы: 1 – предел распознаваемости; 2 – ДЗТ, включенная на токи  $I_{1*}$ ,  $I_{2*}$ , 3 – на токи  $I_{1*}$ ,  $I_{3*}$ .

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Дано развитие метода каскадного эквивалентирования для имитационного и алгоритмического моделирования многопроводных систем с произвольными ограничениями на каскадное соединение многополюсников. Предложена каскадная модель трансформатора, что позволило применить метод для эквивалентирования систем с трансформаторными связями.

2. Разработана имитационная модель силового трансформатора с произвольным числом обмоток и произвольной нелинейной магнитной системой. Для исследования аварийных режимов предложена модель виткового замыкания в обмотке. Разработан алгоритм расчета модели трансформатора, позволяющий получить решение с заданной точностью. Реализовано упрощенное задание параметров модели с использованием каталожных данных рассматриваемого трансформатора.

3. Разработаны элементы методики исследования распознаваемости аварийных ситуаций в электрических системах, в том числе витковых замыканий в обмотках силового трансформатора. Проведено исследование распознаваемости витковых замыканий в двухобмоточном трансформаторе, а также в последовательной и общей обмотке автотрансформатора.

4. Предложена методика выбора трансформаторов тока для применения в составе устройств релейной защиты с учетом требований к передаче токов переходного режима. Предложен и реализован способ уменьшения погрешностей, вызванных насыщением трансформатора тока при передаче токов переходного режима.

5. Разработана и внедрена в производство микропроцессорная защита шин серии «Бреслер», обладающая высоким быстродействием при внезапных и развивающихся КЗ, а также устойчивостью к насыщению ТТ при внешних КЗ. В схеме защиты реализован пусковой орган с расширяемой зоной срабатывания для обеспечения чувствительности к внутренним КЗ в существующих схемах систем шин.

6. Разработан и внедрен в производство микропроцессорный терминал защиты трансформаторов серии «Бреслер». Разработана методика определения распознающих свойств дифференциальных защит, проведено сравнение с пределом распознаваемости. Предложено использование дополнительной дифференциальной зоны с включением на токи общей обмотки для повышения чувствительности к витковым замыканиям в автотрансформаторе. Разработан орган контроля исправности вторичных токовых цепях для повышения надежности к несрабатыванию ДЗТ в режимах их обрыва и замыкания.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:**

1. Шевелев А.В. Каскадное эквивалентирование статических энергообъектов / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев, Д.Г. Еремеев // Вестник Чувашского университета. Естественные и технические науки. – 2004. – № 2. – С. 160-169.

2. Шевелев А.В. Быстродействующая микропроцессорная защита шин и УРОВ // Электрические станции. – 2009. – №8. – С. 43-49.

### **Публикации в других изданиях:**

3. Chevelev A. Informational tasks of relay protection / Y. Liamets, A. Podchivaline, A. Chevelev, G. Nudelman, J. Zakonjsek // CIGRE SC B5 Colloquium: Proceedings. – Australia, Sydney, 2003. – Report 213.
4. Chevelev A. Equivalent transforms of models conditions and measurements in relay protection / Y. Liamets, A. Podchivaline, A. Chevelev, G. Nudelman, J. Zakonjsek // 8<sup>th</sup> International Conference on DPSP: Conference Proceedings. – Netherlands, Amsterdam, 2004. – P. 76-79.
5. Chevelev A. Algorithmic models and virtual relays in distance protection implementation / Y. Liamets, S. Ivanov, A. Chevelev, D. Eremeev, G. Nudelman, J. Zakonjsek // 8<sup>th</sup> International Conference on DPSP: Conference Proceedings. – Netherlands, Amsterdam, 2004. – P. 441-444.
6. Шевелев А.В. Экстремальная распознаваемость зоны повреждения линии электропередачи / Ю.Я. Лямец, А.Н. Подшивалин, А.В. Шевелев // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ): материалы III Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2000. – С. 324-326.
7. Шевелев А.В. Информационная ценность текущего наблюдения электрической системы / Ю.Я. Лямец, Е.Б. Ефимов, А.В. Шевелев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС): материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2001. – С. 172-174.
8. Шевелев А.В. Оценивание параметров трансформатора в процессе восстановления нелинейно искаженного тока / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев // ДНДС: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2001. – С. 174-176.
9. Шевелев А.В. Режимы электрической системы как активного двухполюсника / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев // ДНДС: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2001. – С. 176-180.
10. Шевелев А.В. Информационные свойства дистанционного контроля / Ю.Я. Лямец, А.Н. Подшивалин, А.В. Шевелев, Г.С. Нудельман, Я. Законьшек // Релейная защита, низковольтная аппаратура управления, регулируемый электропривод (РЗАУЭ): материалы науч.-техн. конф., посвященной 40-летию ОАО «ВНИИР» / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2001. – С. 43-48.
11. Шевелев А.В. Оптимизационный подход к восстановлению нелинейно искаженного тока / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев // РЗАУЭ: материалы науч.-техн. конф., посвящ. 40-летию ОАО «ВНИИР» / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2001. – С. 52-54.
12. Шевелев А.В. Информационные задачи релейной защиты / Д.Г. Еремеев, С.В. Иванов, Ю.Я. Лямец, А.Н. Подшивалин, А.В. Шевелев // Труды Академии электротехн. наук Чувашской Республики (АЭН ЧР). – 2003. – №2. – С. 79-100.
13. Шевелев А.В. Каскадное эквивалентирование многопроводных систем / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев, Д.Г. Еремеев // ДНДС: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2003. – С. 277-280.
14. Шевелев А.В. Каскадные модели трехфазных трансформаторов / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев // ДНДС: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2003. – С. 266-268.
15. Шевелев А.В. Каскадная модель трансформатора / Ю.Я. Лямец, А.В. Шевелев // ДНДС: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2003. – С. 269-271.

16. Шевелев А.В. Эффективность распознавания в релейной защите / А.Н. Подшивалин, А.В. Шевелев // ДНДС: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2003. – С. 275-277.

17. Шевелев А.В. Информационные задачи релейной защиты / Ю.Я. Лямец, А.Н. Подшивалин, А.В. Шевелев, Г.С. Нудельман, Я. Законьшек // ДНДС: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2003. – С. 280-283.

18. Шевелев А.В. Определение характеристики намагничивания трансформатора по вольтамперной характеристике // ДНДС: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2003. – С. 301-302.

19. Шевелев А.В. Фильтр информационных составляющих / Ю.Я. Лямец, И.Н. Николаев, А.В. Шевелев // ДНДС: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2005. – С. 143-147.

20. Шевелев А.В. Выбор измерительного трансформатора тока с учетом переходных процессов // ИТЭЭ: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2006. – С. 280-283.

21. Шевелев А.В. Устройство для предотвращения насыщения трансформатора тока // Труды АЭН ЧР. – 2008. – №1. – С. 74-76.

#### **Патенты:**

22. Шевелев А.В. Устройство для компенсации погрешности трансформатора тока // Решение о выдаче патента на изобретение от 25.11.2011 по заявке № 2011100367 от 11.01.2011.

#### **Учебно-методические работы:**

23. Распознавание замыканий в электрической системе: задания и методические указания к курсовой работе / сост.: А.Н. Подшивалин, А.В. Шевелев. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 2002. – 44 с.

**Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве, состоит в [1,13,14,15] – каскадное представление трансформатора и разработка обобщенного метода каскадного эквивалентирования при наличии произвольных ограничений, [3,4,6,7,10, 12,16,17] – участие в разработке методики исследования распознаваемости и построение характеристик распознаваемости и распознавания для разных видов замеров, [8,11] – реализация оптимизационных процедур оценивания параметров и восстановления искаженного тока, [9] – классификация режимов электрической системы, [5,10,19] – построение алгоритмических моделей объектов с использованием метода каскадного эквивалентирования, [23] – разработка задания и построение характеристик для трехфазной линии электропередачи.**

Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Печать оперативная. Тираж 120 экз. Заказ № \_\_.

Отпечатано в типографии

ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»,  
428015, г. Чебоксары, Московский проспект, 15.