

УДК 621.311.001

## ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ИХ АДЕКВАТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Андреев М. В., Боровиков Ю. С.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: andreevmv@tpu.ru*

В данной работе рассмотрена проблема неправильных действий релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА), в том числе дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ). Установлено, что главной причиной этого является несоответствие настроек ДЗТ реальным условиям её функционирования, главным образом связанное с применением в существующей методике расчета уставок ДЗТ ряда грубых упрощений. На основании исследований, кратко представленных в работе, сделан вывод о том, что адекватные математические модели, учитывающие особенности конкретных реализаций и процессы в измерительных трансформаторах тока (ИТТ) и интегрированные в соответствующие средства применения, к которым, в частности, относится и разработанная автором статьи программа математического моделирования ДЗТ, являются эффективными инструментами проверки и оптимизации уставок ДЗТ.

Ключевые слова: дифференциальная защита трансформатора, математическое моделирование, оптимизация уставок, метод графов.

## OPTIMIZATION OF TRANSFORMERS DIFFERENTIAL PROTECTION SETTINGS WITH ITS ADEQUATE MATHEMATICAL MODELS

Andreev M. V., Borovikov Y. S.

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, street Lenina, 30), e-mail: andreevmv@tpu.ru*

In this paper considered the problem of wrong actions of relay protection (RP) and emergency automation (EA), including the transformer differential protection (TDP). It was found that the main reason of this problem it is discrepancy of TDP settings from real operation conditions, mainly associated with the use of several gross simplifications in existing method of TDP settings calculation. Based on the research, briefly presented in the article, it is concluded that the adequate mathematical models, considering peculiarities of the specific implementations and processes in current transformers (CT) and integrated into the appropriated aids, in particular, into designed by article's author program – mathematical modeling of TDP, are effective tools for testing and optimizing of TDP settings.

Key words: transformer differential protections, mathematical simulation, relay protection settings optimization, method of graphs.

### Введение

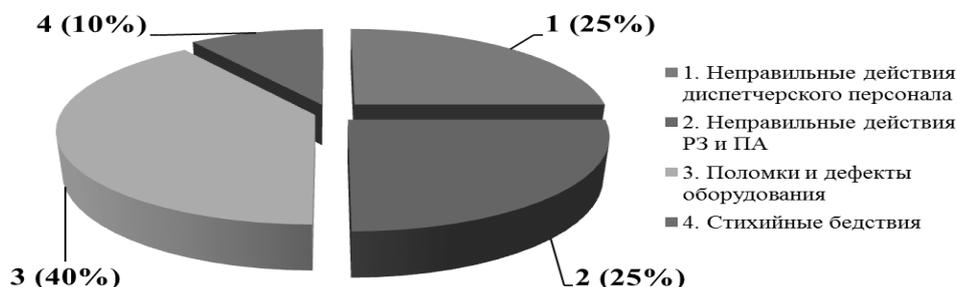
Генераторы, трансформаторы (автотрансформаторы), линии электропередачи (ЛЭП) и другое оборудование электроэнергетических систем (ЭЭС) непрерывно связаны между собой единым и непрерывным процессом производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. При этом силовые трансформаторы и автотрансформаторы, наряду с присущими им функциями, являются технологическими «концентраторами» и относятся к категории наиболее дорогостоящего оборудования ЭЭС. Поэтому их необоснованное отключение или выход из строя связаны со значительным технологическим и экономическим ущербом. Минимизировать эти последствия позволяет правильное

действие релейной защиты (РЗ) и прежде всего основной – дифференциальной защиты трансформаторов (ДЗТ).

Между тем, согласно отображаемой диаграммой (рисунок 1) обобщенной статистике аварийности в российских и зарубежных ЭЭС, примерно 25 % тяжелых аварий являются следствием неправильных действий РЗ и противоаварийной автоматики (ПА) [1], в том числе и ДЗТ, которая работает неправильно примерно в 20 % случаев. Причем, неправильные действия РЗ в 50 – 70 % случаев приводят к развитию аварийных ситуаций в тяжелые системные аварии.

Поскольку в приведенной статистике поломки и дефекты учтены отдельно, главной причиной неправильных действий РЗ становится несоответствие их настроек реальным условиям функционирования, которое, принимая во внимание используемые методики, определяется двумя основными факторами:

- 1) использованием при расчете уставок недостаточно полной и достоверной информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС;
- 2) неадекватным учетом погрешностей, формируемых конкретными реализациями РЗ и измерительными трансформаторами (ИТ).



**Рис. 1.** Обобщенная статистика причин аварийности в электроэнергетических системах

При этом проблема минимизации первого фактора является общей для всех РЗ, и ее решение зависит от свойств и возможностей программных и программно-аппаратных комплексов моделирования ЭЭС [2, 3], обеспечивающих достаточно полное и достоверное воспроизведение на неограниченном интервале процессов в оборудовании ЭЭС при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы.

Данная работа главным образом посвящена решению задачи минимизации второго фактора.

**Целью исследований** является повышение эффективности и надежности функционирования ДЗТ за счет оптимизации их настроек с помощью всережимных математических моделей, учитывающих конкретные реализации и процессы в ИТ.

## Материалы и методы

В соответствии с дифференциальным принципом исследуемой защиты, в случае отсутствия повреждений или же при наличии повреждения вне зоны действия ДЗТ, измеряемые токи при формировании дифференциального полностью компенсируют друг друга и соответственно срабатывания защиты не происходит. Очевидно, что идеальность недостижима в реальных устройствах ДЗТ, и вследствие этого дифференциальный ток будет равен некоторому току небаланса, основные причины возникновения которого связаны с особенностями защищаемого объекта и измерительных трансформаторов тока (ИТТ):

1. Наличие броска намагничивающего тока (БНТ), который возникает в питающей обмотке силового трансформатора (СТ) и является максимальным при включении ненагруженного СТ под напряжение. Другими причинами появления БНТ могут являться: внешнее КЗ; восстановление уровня напряжения после отключения внешнего КЗ; переход КЗ из одного вида в другой; несинхронное подключение генераторов к системе. БНТ характеризуется длительно затухающей апериодической составляющей, содержанием различных гармоник, а также большой амплитудой в начальный момент времени. Возникновение БНТ может привести к глубокому насыщению ИТТ и соответственно искажению формы сигнала вторичного тока.
2. Неодинаковость схем соединения обмоток СТ. При этом возникает сдвиг между токами с разных сторон трансформатора и соответственно возникает ток небаланса.
3. Различие токов в плечах защиты, вследствие работы РПН трансформатора. Перемещение отпайки РПН приводит к изменению коэффициента трансформации СТ, в результате чего меняются соотношения первичных токов и, соответственно, вторичные токи трансформаторов тока.
4. Различие токов в плечах защиты, вследствие неодинаковости ИТТ. Ввиду того, что номинальные токи на сторонах силового трансформатора значительно отличаются друг от друга, то выбираемые по ним ИТТ имеют разные коэффициенты трансформации и конструктивное исполнение, а соответственно различные характеристики и погрешности.

Меры, предпринимаемые для устранения описанных причин небаланса, определяются конкретной реализацией ДЗТ. Помимо программно-аппаратной отстройки, их учет предполагает существующие методики расчета уставок ДЗТ, анализ которых позволил выявить следующие упрощения:

- погрешности ИТТ, которые, очевидно, не являются постоянными и зависят от величины и характера нагрузки и от входного тока, учитываются фиксированными приближенными коэффициентами;

- влияние апериодической составляющей, определяемое конкретными условиями функционирования защиты, учитывается приближенным коэффициентом;
- касательно зарубежных терминалов цифровой ДЗТ, при расчетах используются приближенные и недостаточно обоснованные коэффициенты;
- не учитываются погрешности, вносимые конкретными реализациями ДЗТ.

Ввиду обозначенных допущений, настройка защиты получается весьма грубой и приближенной, что, в конечном счете, и приводит к её неправильным действиям. В связи с этим рассчитанные уставки требуется проверить и, в случае необходимости, скорректировать, что весьма эффективно можно выполнить с помощью математических моделей, адекватно учитывающих особенности конкретных реализаций и процессы в ИТТ, синтезированных в соответствии со следующей методикой:

1. Анализ принципиальных схем ДЗТ для формирования адекватной схемы замещения.
2. Составление схемы замещения с учетом ИТТ и особенностей конкретной реализации.
3. Синтез с помощью метода графов и формулы Мэсона передаточных функций (ПФ) средств ДЗТ с учетом процессов в ИТТ и конкретной реализации.
4. Составление математических описаний на основе ПФ, моделируемых ДЗТ с целью их анализа во временной или в частотной областях.
5. Предварительное исследование полученных математических моделей с помощью программ Mathcad, MATLAB Simulink, EMTP, PSCAD и др. для проверки адекватности их функционирования и проведения необходимых корректировок.
6. Ранжировка с помощью теории точности и чувствительности параметров (если требуется) элементов схемы и её функциональных узлов для оценки их влияния на качество функционирования созданной модели ДЗТ в зависимости от значения коэффициента чувствительности.
7. Формализация полученных математических описаний в виде программных кодов для реализации математических моделей ДЗТ в средствах их применения.
8. Экспериментальное исследование разработанных моделей ДЗТ в средствах их применения.

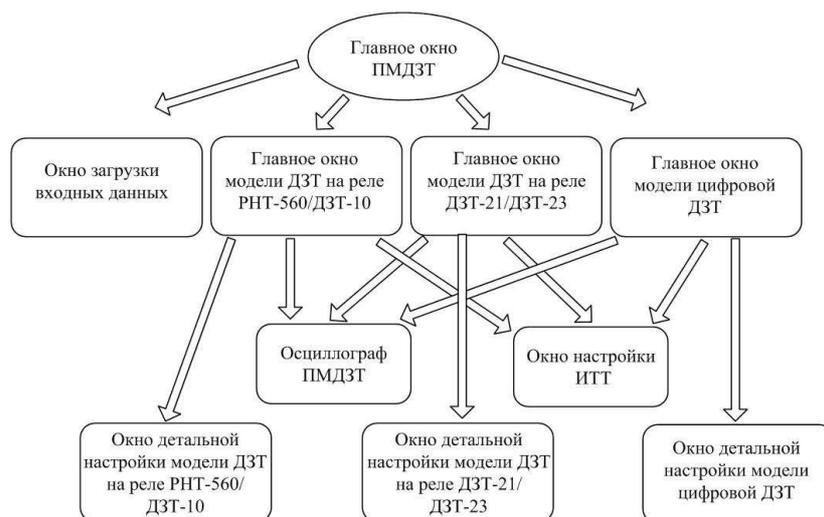
Разработка математических моделей ДЗТ связана с необходимостью создания средств их реализации, в частности, программных. При этом подобная программа должна обладать возможностями:

1. Использования внешних файлов с данными, в том числе COMTRADE-файлов, которые используются в аварийных регистраторах и некоторых средствах моделирования ЭЭС.
2. Поэлементной реализации ПФ ключевых функциональных звеньев схемы ДЗТ.

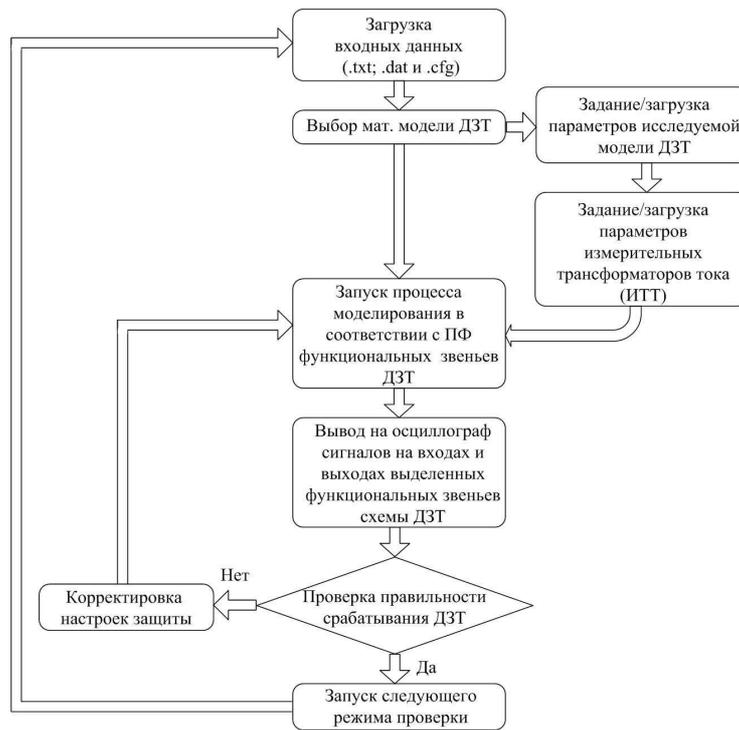
3. Визуализации сигналов на входах и выходах ключевых функциональных звеньев схемы ДЗТ для их анализа и записи.
4. Иметь простой и понятный пользователю интерфейс.
5. Работать в широко распространенных операционных системах, таких как Windows XP, Windows 7 и др.

Данные требования определили структуру и функциональные возможности разработанной автором статьи специализированной программы математического моделирования дифференциальных защит трансформатора (ММДЗТ), позволяющей выполнять исследования дифференциальных защит на базе реле РНТ-560/ДЗТ-10, ДЗТ-21/ДЗТ-23 и цифровых ДЗТ, а также проверку и настройку этих защит для реальных условий их функционирования. Последнее реализуется за счет возможности загрузки COMTRADE-файлов.

Структура разработанной программы представлена на рисунке 2. Алгоритм работы с программой представлен на рисунке 3.



**Рис. 2.** Структура программы ММДЗТ



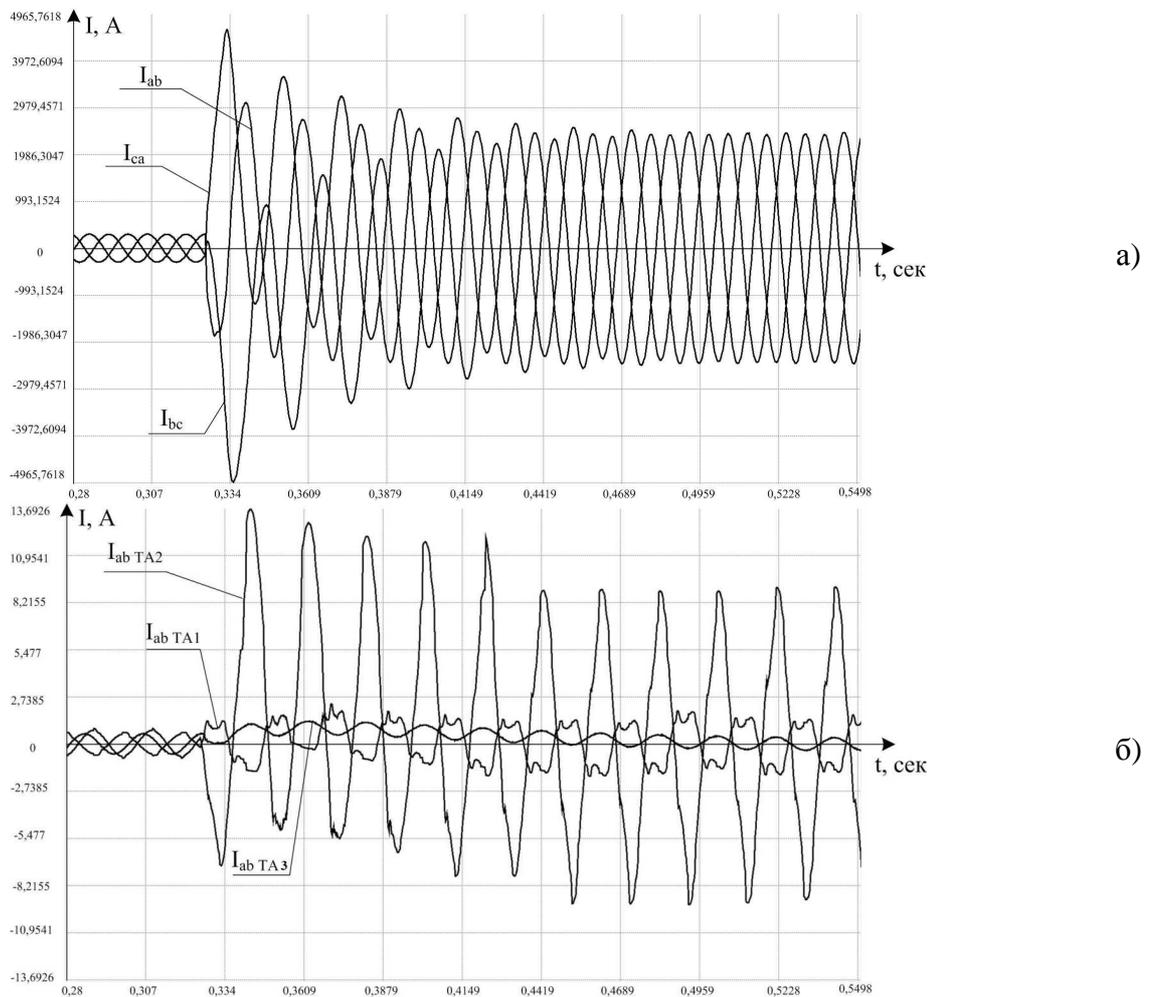
**Рис. 3.** Алгоритм работы с программой ММДЗТ

### Результаты исследований и обсуждение

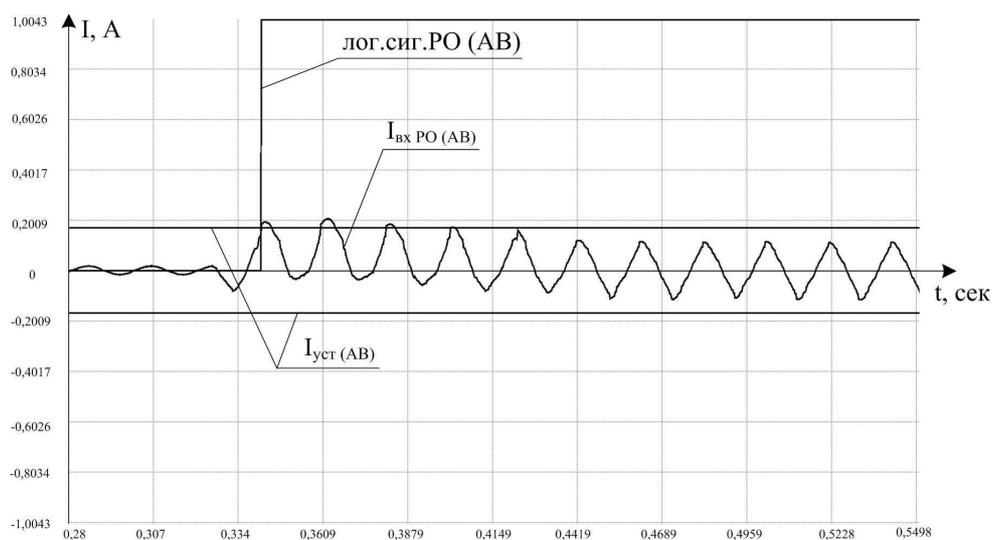
На рисунках 4 и 5 представлены фрагменты результатов проверки и оптимизации настроек ДЗТ на реле РНТ-565 с помощью программы ММДЗТ. Расчет уставок данной защиты осуществлялся в соответствии с существующими руководящими указаниями [4]. Для нахождения токов коротких замыканий (КЗ) использована программа АРМ СРЗА, являющаяся основной в существующей теории и практике для вычисления токов КЗ и уставок РЗ. Входная информация для исследования, т.е. первичные токи, получена с помощью разработанного в Энергетическом институте Томского политехнического университета Всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) [3, 5].

Энергосистемы, воспроизведенные в АРМ СРЗА и ВМК РВ ЭЭС, идентичны по топологии и параметрам основного оборудования в рамках используемых в них математических моделей и соответствуют южной части Томской ЭЭС. В качестве защищаемого объекта выбран автотрансформатор АТДЦТН-200000/220/110 ПС Зональная Томской ЭЭС.

Искажение форм вторичных токов ИТТ, которое хорошо заметно на рисунке 6, связано и насыщением стали сердечника (при моделировании ИТТ для учета нелинейности цепи намагничивания принята зависимость  $B=f(H)$  электротехнической стали 3413 [6]).



**Рис. 4.** а) Линейные первичные токи стороны ВН автотрансформатора при внешнем трехфазном КЗ на шинах 220 кВ ПС Зональная; б) Линейные токи между фазами А и В на выходах измерительных трансформаторов тока при внешнем трехфазном КЗ на шинах 220 кВ ПС Зональная



**Рис. 5.** Входной ток реагирующего органа (ток в исполнительном реле) дифференциального реле, уставка и логический сигнал о срабатывании/несрабатывании защиты для комплекта АВ при внешнем трехфазном КЗ на шинах 220 кВ ПС Зональная

Исполнительное реле РТ-40 дифференциального реле РНТ-565 должно срабатывать при минимальном входном синусоидальном токе 0.17 А [7, 8]. В данном режиме внешнего трехфазного КЗ на шинах 220 кВ ПС Зональная произошло срабатывание всех трех комплектов (АВ, ВС, СА) ДЗТ, что является их ложным действием защиты. Основная причина этого – неполная компенсация токов из-за неодинаковых фазовых смещений (собственных фазовых погрешностей) ИТТ, установленных на разных сторонах защищаемого объекта. Исключить ложное срабатывание ДЗТ в данном режиме удастся регулированием сопротивления резистора, включенного между первой и второй секцией короткозамкнутых обмоток ( $R_{КЗ}$ ): выставлено 6 Ом вместо 10 Ом для комплекта АВ; 6.5 Ом вместо 10 для комплекта ВС; 7 Ом вместо 10 для комплекта СА.

Ложные срабатывания защиты наблюдались также при трехфазных КЗ на шинах 110 кВ и 10 кВ ПС Зональная. Корректировка настроек (регулировка  $R_{КЗ}$ ) позволила это устранить, исключив при этом неправильные действия при внутреннем трехфазном КЗ. Дальнейшая проверка при других видах повреждений: всевозможных двухфазных и однофазных КЗ, а также при включении автотрансформатора в работу на холостом ходу, показала отсутствие неправильных действий РНТ-565 при новых скорректированных настройках, что позволило считать их оптимальными.

Аналогичные исследования проводились и для других ДЗТ: для защиты на реле ДЗТ-21 и цифровой ДЗТ SIEMENS SIPROTEC 7UT62. В результате были выявлены ложные срабатывания защит при внешних КЗ, которые также удалось устранить корректировкой настроек.

### **Выводы**

1. В настоящее время сохраняется проблема неправильных действий ДЗТ. Главной причиной этого является несоответствие настроек защиты реальным условиям её функционирования, связанное с применением в существующей методике расчета уставок ДЗТ ряда грубых упрощений, обозначенных выше. Наличие проблемы подтверждается и проведенными исследованиями, результаты которых очень кратко, ввиду ограниченности объема, представлены в данной статье.
2. Весьма эффективными инструментами оптимизации (корректировки) уставок ДЗТ различных видов и типов являются их адекватные математические модели, учитывающие особенности конкретных реализаций и процессы в ИТТ, интегрированные в соответствующие средства применения, к которым, в частности, относится и разработанная автором статьи программа ММДЗТ.

## Список литературы

1. Гуревич В. И. Проблемы оценки надежности релейной защиты. // Электричество. – 2011. – № 2. – С. 28-31.
2. Компания RTDS Technologies [Электронный ресурс]: база данных содержит информацию о комплексе реального времени RTDS. – Электрон. дан. – [2011]. – Режим доступа: <http://www.rtds.com>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Гусев А. С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия Вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9-10/1.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110 – 500 кВ: Расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с., ил.
5. Гусев А. С., Свечкарев С. В., Плодистый И. Л. Универсальная математическая модель силовых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4.
6. Котенев С., Евсеев А. Переходные процессы при включении трансформатора в сеть с синусоидальным напряжением // Силовая электроника. – 2005. – № 4. – С. 34-37.
7. Алексеев В. С., Варганов Г. П., Панфилов Б. И., Розенблюм Р. З. Реле защиты. М.: Энергия, 1976. – 464 с.: ил.
8. Овчинников В. В. Реле РНТ в схемах дифференциальных защит. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 88 с.: ил. – (Б-ка электромонтера; Вып. 621).

### Рецензенты:

Гусев Александр Сергеевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.

Хрущев Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрических сетей и электротехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.