

На правах рукописи



ПОПОВ Станислав Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
(ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»)

Научный руководитель доктор технических наук,  
профессор Ванин Валерий Кузьмич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
Евдокунин Георгий Анатольевич,  
проф. кафедры «Электрические системы и сети»  
ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»  
кандидат технических наук,  
Мокеев Алексей Владимирович,  
доцент кафедры «Электроснабжение  
промышленных предприятий» Северного  
(Арктического) Федерального университета

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г. в «10 00» часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д29. Главное здание, ауд.325,

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 года

Ученый секретарь

диссертационного совета  
Д 212.229.11  
Кандидат технических наук



Попов М.Г.

## **Актуальность проблемы**

Быстродействие и другие технические характеристики систем релейной защиты, автоматики и управления трансформаторами оказывают значительное влияние на устойчивость электрических станций и электроэнергетических систем в целом. Развитию подобных систем уделяли значительное внимание авторы: Атабеков Г.И., Булычев А.В., Ванин В.К., Дмитренко А.М., Дроздов А.Д., Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Кужеков С.Л., Линт М.Г., Нагай В.И., Новаш В.И., Подгорный Э.В., Федосеев А.М., Ульяницкий Е.М., Шнеерсон Э.М. и многие другие.

Техническое совершенство и надежность функционирования средств диагностики, автоматики и релейной защиты в основном определяются качеством входной информации. В этой связи одним из путей их развития является повышение метрологических характеристик измерительного тракта защиты и разработка методов, учитывающих его динамические свойства. Наиболее актуальной задачей при этом становится разработка алгоритма восстановления первичных токов трансформаторов тока с учетом нелинейности их параметров.

Отмеченные направления совершенствования современных микропроцессорных устройств РЗА неизбежно связаны с многочисленными экспериментально-поисковыми исследованиями различных функциональных структур, методов, алгоритмов измерения и контроля параметров режимов работы защищаемого электрооборудования. При этом практически единственным возможным способом исследования является применение современных численных методов, реализующих адекватное математическое описание всех элементов расчетной схемы электрической сети с учетом их внутренней конструкции и нелинейности электромагнитных параметров. Большой вклад в развитие методов численного моделирования переходных процессов в силовых трансформаторах внесли Александров Г.Н., Евдокунин А.Г., Засыпкин А.С., Попов М.Г., Рагозин А.А., Шакиров М.А. и др.

В этой связи тема диссертационных исследований, направленных на дальнейшее увеличение быстродействия и достоверности контроля средств РЗА безусловно актуальна. Актуальность работы подтверждается тем, что данные исследования были проведены при поддержке правительства РФ в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.2 Проведение научных исследований целевыми аспирантами. Результаты

исследований вошли в основу выполнения государственного контракта № П199 от 22 апреля 2010 г.

**Целью работы** является разработка быстродействующей дифференциальной защиты трансформаторов, а также совершенствование технических средств измерения тока и напряжения.

Для достижения поставленных целей потребовалось **решение следующих задач:**

- Критический анализ алгоритмов дифференциальной защиты и определение способов их улучшения.
- Разработка высокоточных преобразователей тока и напряжения с необходимым динамическим диапазоном работы для согласования ТТ с микропроцессорными устройствами защиты.
- Создание лабораторного комплекса для проведения исследований, включающего в себя математические модели энергооборудования, устройства тестирования опытных образцов средств защиты, программное обеспечение (ПО) для проведения всех необходимых исследований, удобный человеко-машинный интерфейс.
- Создание адекватного математического описания переходных процессов силовых трансформаторов с учетом динамических характеристик измерительного тракта дифференциальной защиты.
- Совершенствование алгоритмов формирования тормозных и рабочих сигналов дифференциальных защит, за счет использования алгоритмов восстановления первичного тока ТТ.
- Разработка новых алгоритмов торможения на основе токов намагничивания ТТ и оценка их эффективности.

При решении поставленных задач использовались следующие **методы научного исследования:** создание испытательных стендов для исследования динамических свойств вторичных преобразователей, создание опытных образцов датчиков, а также численные и аналитические методы расчета режимов электроэнергетического оборудования.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** подтверждается корректностью используемого математического описания и совпадением результатов расчетных исследований с данными натуральных экспериментов. Сделанные в работе выводы не противоречат данным аналогичных исследований, опубликованных в литературных источниках.

**Научная новизна** работ соискателя:

1. Предложены схемы и способы повышения помехоустойчивости вторичных преобразователей тока и напряжения с расширенным динамическим диапазоном.
2. Предложен и реализован в среде программирования MatLab алгоритм исследования нелинейных динамических электрических систем, содержащих силовые и измерительные трансформаторы. Для совместного решения системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений применен численный метод интегрирования с контролем погрешности решения.

3. Разработаны новые алгоритмы торможения дифференциальных защит с использованием фильтра тока намагничивания ТТ, обеспечивающие более высокое быстродействие, устойчивость контроля и чувствительность по сравнению с существующими аналогами.

#### **Практическая ценность результатов работы**

1. Разработаны высокоточные преобразователи тока и напряжения для средств релейной защиты, противоаварийной автоматики, регистрации аварийных событий, а также испытательных комплексов.
2. Созданные методы и алгоритмы численного расчета нестационарных режимов ЭЭС и соответствующее программное обеспечение интегрированы с комплексной системой реального времени испытаний и диагностики (DoRTSD – Real-Time System of Diagnostics) силового электрооборудования и микропроцессорных средств РЗА, которая разрабатывается на кафедре «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».
3. Выполнена программная реализация библиотеки функциональных алгоритмов, которые могут быть интегрированы во встраиваемое программное обеспечение микропроцессорных дифференциальных защит.
4. Усовершенствованная в работе схема дифференциальной защиты обладает лучшими показателями быстродействия, чувствительности, устойчивости, достоверности измерений и может быть использована при разработке микропроцессорных устройств.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- 1 Схемы прецизионных вторичных преобразователей тока и напряжения для быстродействующих средств релейной защиты и противоаварийной автоматики.
- 2 Методы восстановления первичного тока и тока намагничивания ТТ.
- 3 Способы применения фильтра тока намагничивания ТТ в дифференциальных защитах.
- 4 Структурная схема дифференциальной защиты с использованием фильтра тока намагничивания ТТ.

**Реализация результатов работы:** Вторичные преобразователи и созданный испытательный комплекс для их тестирования используются в научных исследованиях и разработках для промышленности, проводимых на кафедре «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет». Результаты диссертационной работы используются в следующих учебных курсах «основы автоматического управления в энергетике», «релейная защита и автоматика», «цифровые и микропроцессорные средства противоаварийной автоматики».

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях «Кибернетика энергетических систем» по тематике «Диагностика энергооборудования»

(Новочеркасск, 2010г ), Международной научно-технической конференции СИГРЭ «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (Санкт-Петербург, 2011 г), и научно-практических семинарах «неделя науки» (Санкт-Петербург, 2008-2010 гг), «Молодые ученые-промышленности северо-западного региона» (Санкт-Петербург 2010г.). Результаты работы отмечены во всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Эврика-2011 г», и конкурсе грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2011 г (диплом ПСП №11453).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, в том числе 3 статьи в изданиях, входящих в список рекомендуемых в перечне ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 75 наименований на 6 стр. Работа изложена на 144 страницах, в том числе: 137 стр. основного текста, 80 рисунков.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана структура построения материала в диссертации. Отмечен вклад ученых и специалистов по тематике данной диссертации.

**В первой главе** выполнен качественный анализ принципов построения дифференциальной защиты и рассмотрены методы повышения эффективности ее работы. При анализе причин вызывающих ток небаланса, погрешность вычисления рабочего тока защиты разделена на инструментальную и методическую. Погрешности измерительного тракта защиты и неточности выравнивания токов плеч защиты отнесены к инструментальной погрешности. Эти составляющие можно интерпретировать как несовершенство устройства дифференциальной защиты и средств измерения. Ток небаланса, обусловленный током намагничивания трансформатора и устройством регулирования под нагрузкой (РПН), определяются исключительно параметрами трансформатора и являются методической погрешностью, которая определяет несовершенство дифференциального принципа защиты силовых трансформаторов и должна обуславливать коррекцию алгоритмов работы защиты.

Проведенный анализ существующих проблем построения дифференциальных защит показал, что основной причиной, снижающей их быстродействие и чувствительность, являются токи небаланса, обусловленные инструментальной погрешностью измерительного тракта. Показано, что повысить метрологические характеристики измерительного тракта, и тем самым достоверность контроля защиты возможно за счет использования устройств более высокого класса точности и дальнейшего устранения влияния остаточной погрешности путем применения специализированных алгоритмов.

В результате исследований выявлено, что алгоритмы торможения дифференциальной защиты в функции токов плеч обладают главным, общим недостатком, который заключается в том, что тормозной сигнал при внешних КЗ значительно уменьшается при увеличении погрешности трансформаторов тока, в

то время как дифференциальный сигнал возрастает. Это приводит к необходимости существенного занижения чувствительности защиты или к ее блокировке. Дополнительным недостатком является то, что методика выбора параметров срабатывания защиты основана на вероятностной зависимости тока небаланса от величины тока плеч, то есть, чем больше токи плеч защиты, тем выше вероятность увеличения тока небаланса. Это обуславливает определённые трудности при выборе коэффициентов торможения, в частности к необходимости либо проведения различных испытаний при наладке защиты, либо наличия достаточно большого опыта эксплуатации на схожих объектах защиты.

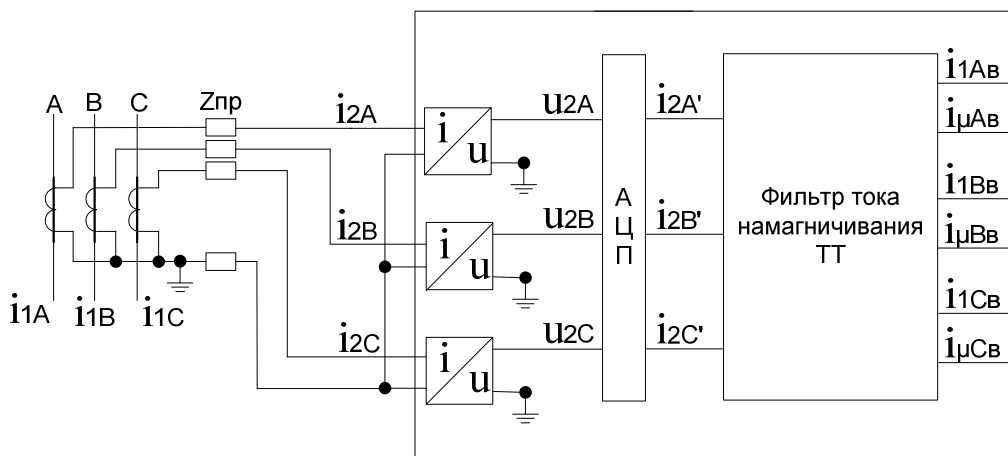


Рис. 1. Структурная схема восстановления первичных токов

Наиболее перспективным направлением совершенствования дифференциальной защиты является разработка алгоритма восстановления первичных токов и отстройка от остаточного тока небаланса путем торможения сигналом, пропорциональным ошибке измерения. Качественный анализ данного способа показал необходимость разработки высокоточных вторичных преобразователей и разработки нелинейного фильтра тока намагничивания трансформаторов тока (см. рис. 1).

**Вторая глава** посвящена разработке высокоточных вторичных преобразователей тока и напряжения для быстродействующих средств защиты и автоматики. В работе проведен сравнительный анализ существующих схем вторичных преобразователей. С помощью их передаточных функций исследованы динамические характеристики. Установлено, что наилучшими свойствами обладают компенсационные датчики тока и напряжения с использованием трехобмоточного трансформатора (см. рис. 2).

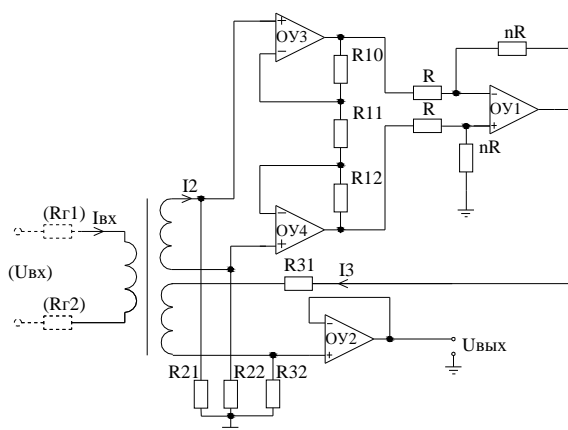


Рис. 2. Принципиальная схема вторичного преобразователя тока (напряжения)

При разработке принципиальной схемы с расширенным динамическим диапазоном работы основное внимание было уделено повышению

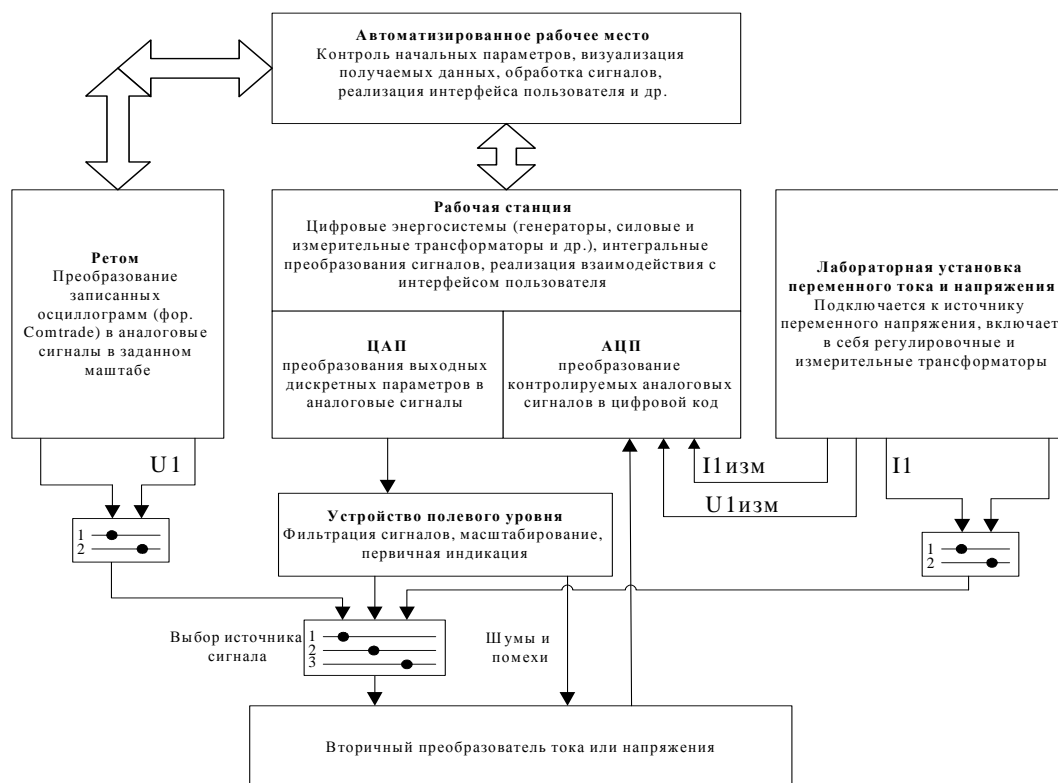


Рис.3. Структурная схема испытательного комплекса

помехозащищенности преобразователей. Для этого в схему датчика добавлен усилительный каскад на основе измерительного и дифференциального усилителей (см. рис. 2). Дополнительно для снижения влияния шумов и помех выполнено симметрирование схемы, а также выравнивание потенциала по всей свободной площади печатной платы, на которой выполнен измерительный преобразователь.

Для разработки и испытаний вторичных преобразователей использован диагностический комплекс, в котором синхронизированы процессы генерирования, измерения и обработки сигналов (см. рис. 3)

Тестирование опытных образцов преобразователей (см. рис. 4) показало, что приведенные значения погрешности преобразования сигналов в установившихся режимах не превышают 0,5%. Динамический диапазон датчиков тока составляет 1500 ( $I_{ex} = 0.05 \div 100 \text{ A}$ ), датчиков напряжения 1000 ( $U_{ex} = 0.1 \div 100 \text{ B}$ ). В указанных пределах относительная погрешность преобразования не превышала 5%.

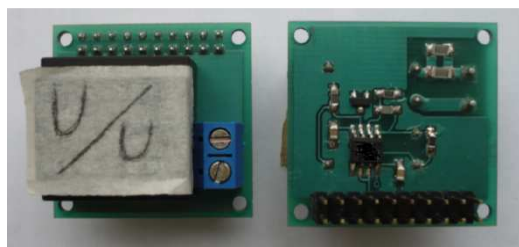


Рис. 4 Вторичный преобразователь напряжения



**Третья глава** посвящена исследованию переходных процессов эквивалентной двухмашинной схемы электропередачи (см. рис. 5) с установленной мощностью генераторов  $S_{Г1} = 200 \div 4100$  МВА и  $S_{Г2} = 200 \div 4100$  МВА, включая измерительный тракт систем РЗА. Кроме этого, значительное внимание уделено вопросам разработки алгоритмов восстановления первичного тока ТТ в реальном времени.

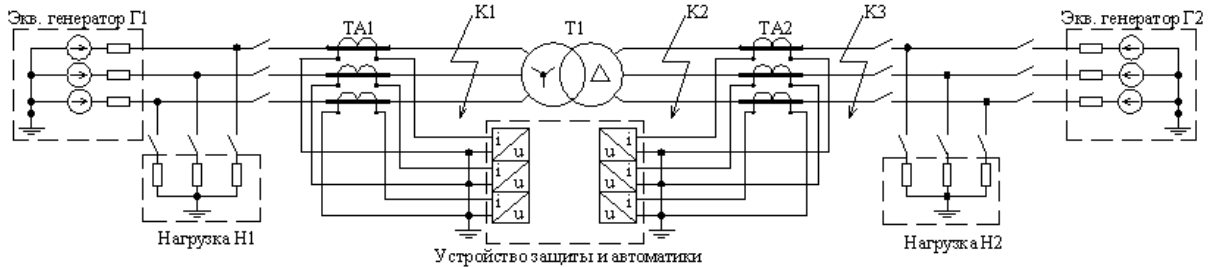


Рис. 5. Расчетная схема эквивалентной электроэнергетической системы

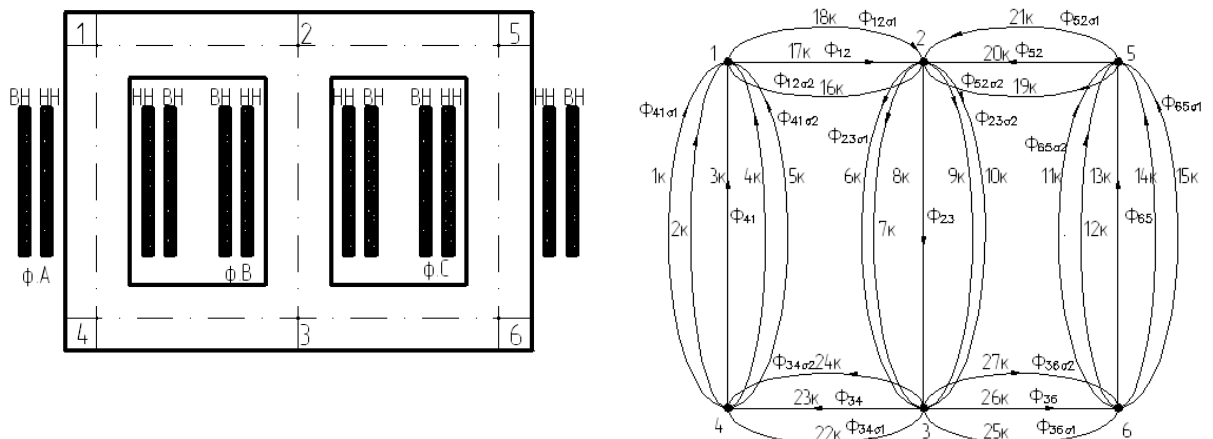


Рис. 6. Конструкция (а) и расчетная схема распределения магнитных потоков (б) трехфазного двухобмоточного трансформатора ТДЦ-80000/110

Переходные процессы трехфазного двухобмоточного трансформатора ТДЦ-80000/110 (см. [4],  $u_k = 11,0 \%$ ;  $I_{xx} = 0,6 \%$ ;  $P_{кз} = 310$  кВт) описывались нелинейными алгебраическими и дифференциальными уравнениями. Формирование общей системы уравнений силового трансформатора производилось согласно методике, подробно описанной в [3] с учетом его конструктивного исполнения, фазные обмотки которого являются цилиндрическими и размещаются на соответствующих стержнях магнитопровода (см. рис. 6).

Подсистема нелинейных алгебраических уравнений составляется с учетом принятого распределения магнитных потоков и включает в себя 27 контурных и 5 узловых уравнений (1). При этом принимаются допущения о постоянстве сечения потоков, линейности и однородности немагнитной среды и др. Аналитическое определение коэффициентов индукции и взаимной индукции производится в результате преобразования системы нелинейных алгебраических уравнений при установлении взаимосвязи между фазными токами обмоток и их потокосцеплениями.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{n_{yc}} H_k l_k = \sum_{m=1}^{n_{ob}} i_m w_m, \\ \Phi_{41\Sigma\sigma} + \Phi_{14} - \Phi_{12} - \Phi_{12\Sigma\sigma} = 0; \\ \Phi_{52} + \Phi_{52\Sigma\sigma} + \Phi_{12} + \Phi_{12\Sigma\sigma} - \Phi_{23} - \Phi_{23\Sigma\sigma} = 0; \\ \Phi_{65} + \Phi_{65\Sigma\sigma} - \Phi_{52} - \Phi_{52\Sigma\sigma} = 0; \\ \Phi_{36} + \Phi_{36\Sigma\sigma} - \Phi_{65} - \Phi_{65\Sigma\sigma} = 0; \\ \Phi_{23} + \Phi_{23\Sigma\sigma} - \Phi_{34} - \Phi_{34\Sigma\sigma} - \Phi_{36} - \Phi_{36\Sigma\sigma} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

Где  $n_{yc}, n_{ob}$  - соответственно, количество участков и обмоток входящих в рассматриваемый контур;  $l_{jn}$  - длина k-го участка магнитной цепи;  $\Phi_{jn} = H_{jn} s_{jn} \mu_0 \mu(H_{jn})$  - магнитный поток в магнитопроводе между узлами j,k;  $\Phi_{jn\Sigma\sigma} = \sum_{i=1}^m H_{jn\sigma i} s_{jn\sigma i} \mu_0$  - сумма магнитных потоков рассеяния между узлами j,k;  $s_{jn}$  - эквивалентное сечение магнитного потока;  $m$  - общее количество эквивалентных потоков рассеяния;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнитная постоянная;  $\mu(H_{jn})$  - относительная магнитная проницаемость участка сердечника.

Адекватность разработанной математической модели силового трансформатора ТДЦ-80000/110 подтверждена сравнительным анализом результатов расчетных исследований и паспортных характеристик ( $u_k, I_{xx}$  и  $P_{кз}$ ).

Магнитная схема замещения и соответствующее ей математическое описание измерительных трансформаторов

тока отличается в сравнении с моделью ТДЦ-80000/110 эквивалентным представлением потоков рассеяния, а также отсутствием взаимного электромагнитного влияния фазных токов, поскольку конструкция трансформаторов тока (ТТ) относительно проста и чаще всего представляет собой тороидальный сердечник с равномерной намоткой витков вторичной обмотки (см. рис. 7). При этом первичная обмотка обычно представляет собой один или несколько витков.

Несмотря на это, необходимо отметить значительные трудности вычисления магнитной проницаемости сердечника ТТ, обусловленные: остаточной индукцией трансформаторов тока; гистерезисом характеристики намагничивания  $B = f(H)$ ; зависимостью этой характеристики от частоты. В общем случае характеристика намагничивания

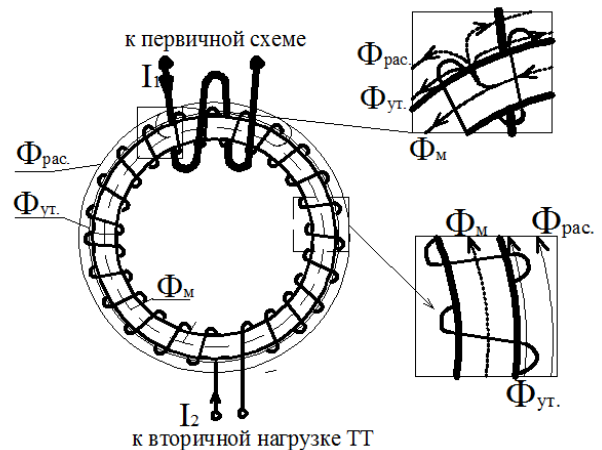


Рис. 7 Расчетная схема ТТ с тороидальным сердечником

представляется семейством гистерезисных петель, которые могут быть получены в результате натуральных (физических) экспериментов с использованием источников промышленной частоты. Полученные зависимости могут быть аналитически аппроксимированы уравнениями Джэйлса-Атертона.

Разработанное математическое описание реализовано в универсальной среде программирования Matlab. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений осуществляется с использованием численного метода интегрирования с контролем погрешности численного решения при оценке остаточного члена  $O(h)$ . Во всех исследуемых режимах корни системы дифференциальных уравнений не удовлетворяют критерию жесткости

$\left( \frac{\max |\alpha_i + j\omega_i|}{\min |\alpha_k + j\omega_k|} \gg 1 \right)$  и находятся внутри области устойчивости численного метода.

Величина шага интегрирования  $h$  (или  $dt$ ) при проведении расчетов выбиралась исходя из приемлемого значения погрешности (не более  $10^{-6}$  А) вычисления фазных токов и являлась постоянной величиной  $dt = 100$  мкс. На каждом  $m$ -ом такте интегрирования с шагом  $h_m$  последовательно выполняются следующие процедуры (см. рис. 8):

- 1) процедура поиска значений производных токов  $\frac{di(t_m)}{dt}$  эквивалентных генераторов, нагрузок и потокосцеплений  $\frac{d\Psi(t_m)}{dt}$  силовых и измерительных трансформаторов;
- 2) процедура определения новых значений дифференциальных переменных
- 3) процедура определения фазных токов и напряжений силового и измерительных трансформаторов методом Ньютона с заданной величиной погрешности расчета  $\sigma$ .

На основе этой методики предложен алгоритм восстановления первичного тока. При этом для сокращения времени расчета учет гистерезиса в обратной модели не производится. Оценка чувствительности численного метода

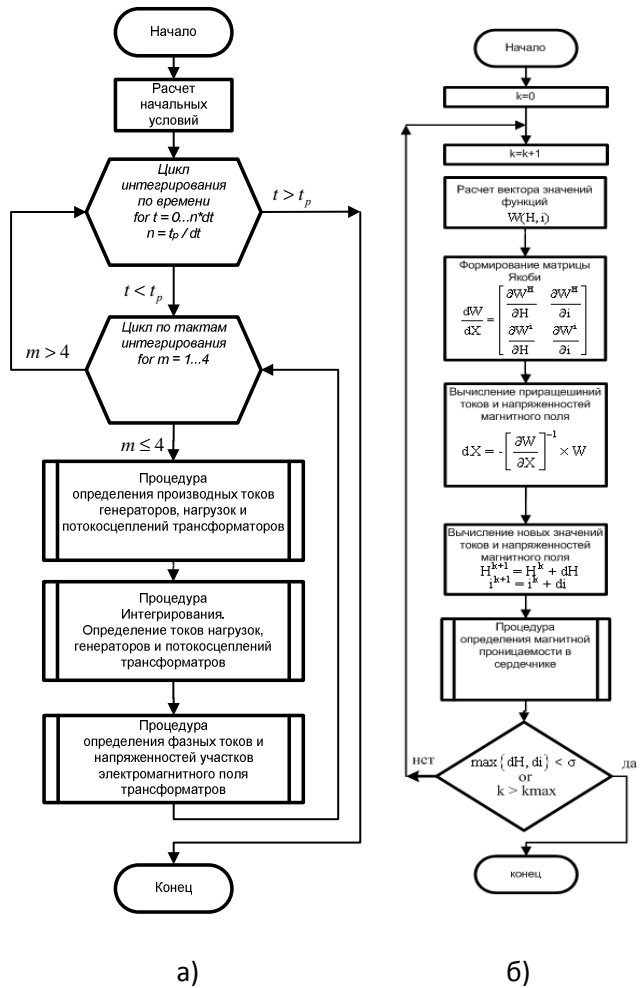


Рис. 8 Блок-схема алгоритма расчета динамических режимов энергосистемы (а) и расчета фазных токов силовых, измерительных трансформаторов (б)

интегрирования к выбору шага интегрирования проводилась при его вариации в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$ . При этом выявлено, что при шаге менее  $10^{-4}$  погрешность восстановления не превосходит 1%.

В связи с тем, что в течение времени параметры ТТ могут отклоняться от установленных значений, было проведено исследование алгоритма восстановления первичного тока при отклонении параметров обратной модели ТТ. При неточном восстановлении первичного тока можно выделить режимы характеризующиеся завышенными (перекомпенсация тока намагничивания,  $i_{\mu B} > i_{\mu}$ ) и заниженными (недокомпенсация,  $i_{\mu B} < i_{\mu}$ ) величинами восстановленного первичного тока относительно его действительного значения (см. рис. 9,10). Для оценки качества численного расчета тока намагничивания ТТ в работе использовалась приведенная погрешность:

$$\varepsilon'_{\mu}(t) = \frac{I_{\mu B} - I_{\mu}}{I_{\mu}},$$

где  $I_{\mu B} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t (i'_{1B} - i_2)^2 dt}$  восстановленный ток намагничивания ТТ.

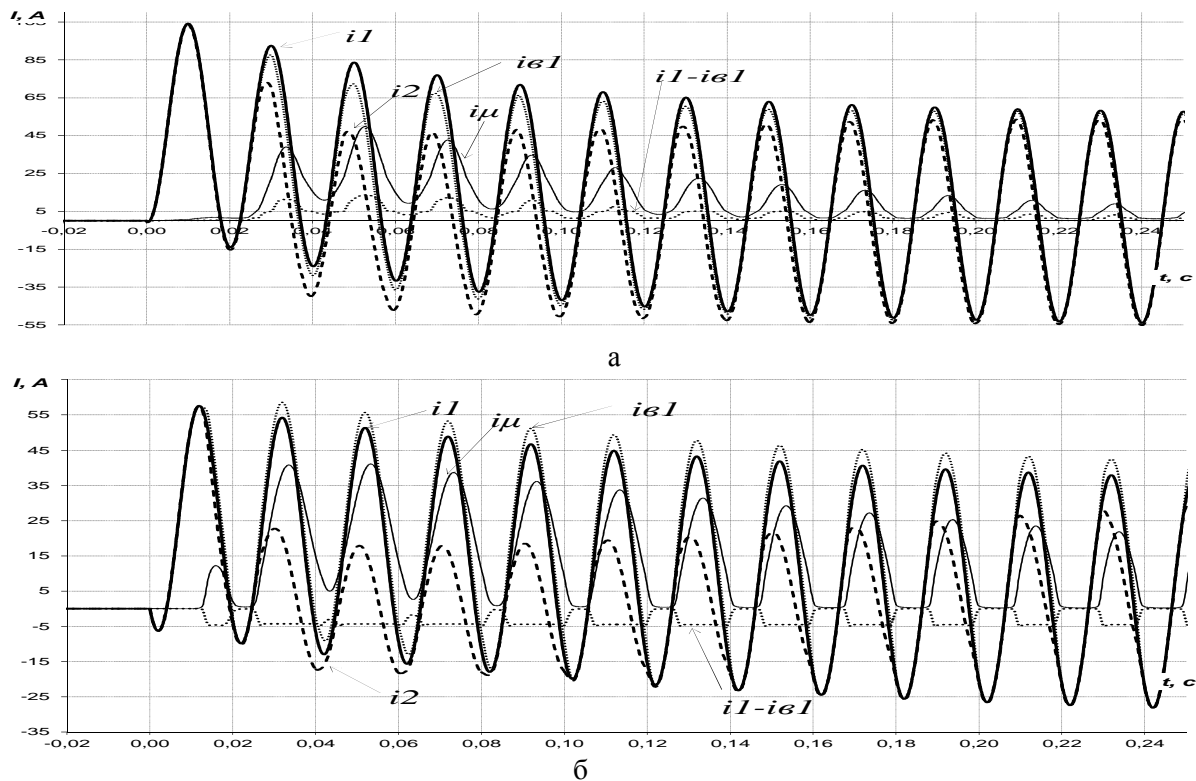


Рис. 9. Осциллограммы токов в ТТ и восстановленных токов в режиме недокомпенсации (а) и перекомпенсации (б), где  $i_{\mu}$  - ток намагничивания ТТ;  $i_1$  - приведенный первичный ток ТТ;  $i_2$  - вторичный ток ТТ;  $i_{1B}$  - приведенный восстановленный первичный ток ТТ;

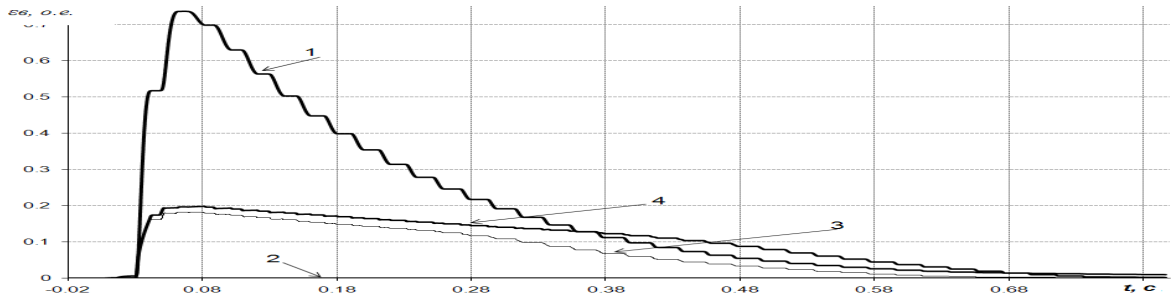


Рис. 10. Осциллограммы погрешности ТТ и погрешности восстановленного первичного тока: 1 - Погрешность трансформатора тока; 2- погрешность восстановления первичного тока  $\varepsilon_g(t)$  при точном задании характеристик; 3-  $\varepsilon_g(t)$  в режиме недокомпенсации; 4-  $\varepsilon_g(t)$  в режиме перекомпенсации.

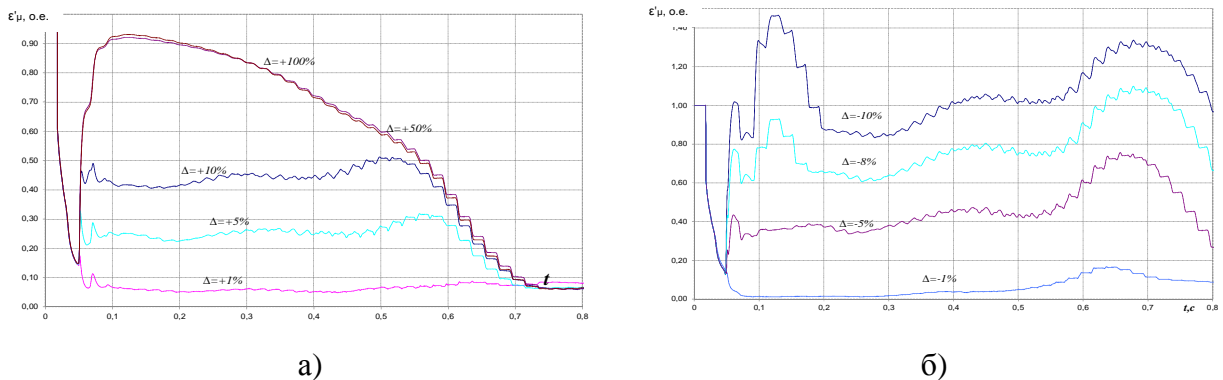


Рис. 11. Осциллограммы изменения приведенной погрешности восстановления тока намагничивания ТТ при КЗ при вариации отклонения кривой намагничивания в режиме недокомпенсации (а) и перекомпенсации (б).

Приведенная погрешность  $\varepsilon'_\mu$  оценивалась в наиболее неблагоприятном динамическом режиме: внезапное КЗ с максимальной аperiodической составляющей и кратностью периодической составляющей тока, соответствующей предельно допустимой для исследуемого ТТ по условию 10 %-ой погрешности. При этом варьировались следующие параметры модели восстановления первичного тока ТТ: кривая намагничивания, вторичная нагрузка, начальная индукция (см. рис. 11). В частности установлено, что при максимально допустимой погрешности алгоритма равной 50%, допускается отклонение характеристики намагничивания обратной модели ТТ от реальной в диапазоне -5% ÷ +10%.

В расчетных случаях, когда остаточная индукция ТТ не превосходит значений 0.1-0.15 Тл, максимальная погрешность воспроизведения первичного тока ТТ менее 15 %. Однако при значительной величине остаточной индукции (~ 0.5 Тл), например, при повторном включения силового трансформатора на КЗ, погрешность восстановления первичного тока может достигнуть 80% и выше, что необходимо учитывать при проектировании защиты.

**Четвертая глава** посвящена применению алгоритмов восстановления первичного тока и тока намагничивания ТТ в дифференциальной защите и анализу их эффективности.

Основу защиты составляет фильтр тока намагничивания (ФТН). Входным сигналом фильтра тока намагничивания (см рис. 12) является измеренный

вторичный ток. На выходе этого функционального блока формируется расчетное значение тока намагничивания. Приведенный восстановленный первичный ток представляется выражением:

$$i'_{11B} = i_{12} + i'_{1\mu B}$$

В работе предложены различные способы применения ФТН. Наиболее простым является способ, когда на вход блоков формирования рабочего и тормозного сигналов поступает не измеренный вторичный ток, а восстановленный первичный ток (см. рис. 12,а). Другой способ характеризуется тем, что при использовании ФТН появляется сигнал, пропорциональный току небаланса защиты. Это дает возможность разработки новых алгоритмов торможения токами намагничивания ТТ (см. рис. 12,б). Возможно также и совместное использование этих способов (см. рис. 12,в).

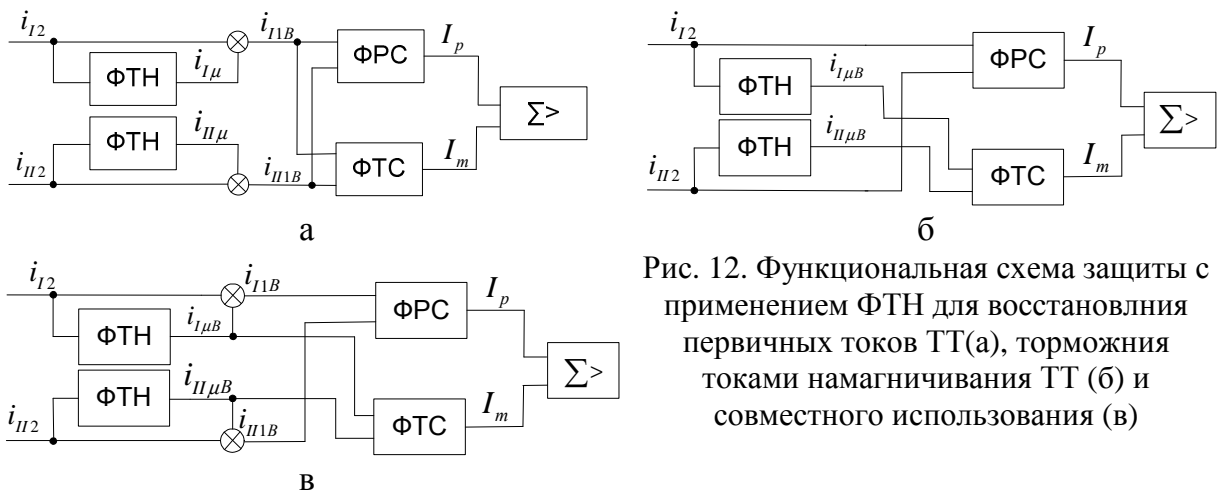


Рис. 12. Функциональная схема защиты с применением ФТН для восстановления первичных токов ТТ(а), торможения токами намагничивания ТТ (б) и совместного использования (в)

Использование фильтра тока намагничивания для восстановления первичного тока (см. рис. 12а,в) позволяет при внешнем КЗ снизить ток небаланса защиты до величины равной погрешности восстановления первичных токов. При внутреннем КЗ происходит повышение чувствительности. Следует отметить, что для схемы рис. 12,а рекомендуется тормозной алгоритм - «разность суммы абсолютных значений токов плеч и дифференциального тока». В этом случае выбор уставок дифференциальной защиты производится на основе полученных зависимостей минимально требуемого коэффициента торможения от погрешностей ТТ и ФТН. Показано, что величина минимального значения тока срабатывания защиты, определяется выражением:

$$I_{с.мин} = \kappa_3 I_{нб.расч} \approx 0,05 I_{ном.Т}$$

где  $\kappa_3$  - коэффициент запаса, учитывающий погрешности расчета

При росте уровня первичного тока в защите должен присутствовать сигнал торможения (см. рис. 13). Коэффициент торможения в этом случае выбирается при максимальном токе ТТ по условию 10% погрешности и, в рассматриваемом примере составляет 0.15. Таким образом, даже при условии сравнения наибольшего значения тока срабатывания и тока торможения в защите, коэффициент чувствительности будет увеличен более чем в два раза в сравнении с исходным.

Характерной особенностью применения функциональной схемы рис. 12,б является формирование тормозного сигнала в функции токов намагничивания ТТ плеч защиты. Показано, что абсолютной селективностью дифференциальных защит при внешних КЗ, в случае идеальной фильтрации токов намагничивания, будут обладать все возможные способы торможения. Однако только способ торможения геометрической разностью токов намагничивания создаст наименьшее загромождение защиты при внутренних КЗ. Основным преимуществом этого алгоритма является увеличение тормозного тока при возрастании тока небаланса защиты.

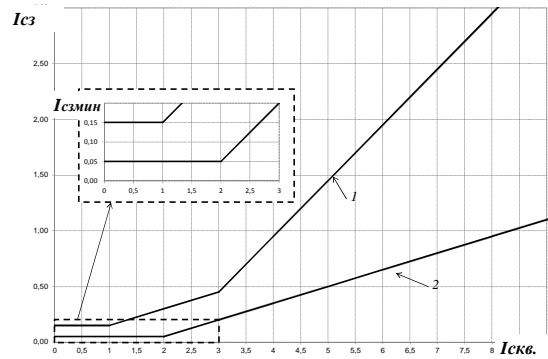


Рис. 13. Тормозная характеристика при использовании алгоритма восстановления первичных токов. 1 – типовая тормозная характеристика; 2 – тормозная характеристика при использовании алгоритма восстановления первичного тока

Неоднозначность выбора коэффициентов торможения  $k_T$  и перекомпенсации  $k_n$  для алгоритмов схем рис. 12а,б обусловлена необходимостью определения возможных погрешностей восстановления первичного тока. Трудность расчета этих коэффициентов усугубляется высокой чувствительностью фильтра тока намагничивания к флуктуации параметров измерительной части системы.

Формирование рабочего тока из восстановленных первичных токов при торможении разностью токов намагничивания ТТ плеч защиты (рис. 12в) позволяет снизить требования к погрешности работы фильтра тока намагничивания. В этом случае гарантируется быстрое действующее отключение внутреннего КЗ и исключается ложное срабатывание защиты при внешних КЗ при погрешности расчета тока намагничивания менее 50% в режиме недокомпенсации. Отметим, что режим перекомпенсации является более благоприятным по сравнению с режимом недокомпенсации. Для гарантированного обеспечения режима перекомпенсации в алгоритмах формирования рабочего и тормозного сигнала дифференциальной защиты используется увеличенный расчетный ток намагничивания:

$$i_p = i_{2I} + k_n i_{\mu BI} + i_{2II} + k_n i_{\mu BII},$$

$$I_m = f(k_n i_{\mu I}, k_n i_{\mu II}),$$

где  $k_n$  - коэффициент перекомпенсации.

Важно подчеркнуть, что коэффициент перекомпенсации изменяет также и рабочий ток защиты. Это обеспечивает достаточную чувствительность защиты к внутренним КЗ (см. рис. 14) и селективность при внешних КЗ (см. рис. 15). Для защиты двухобмоточного трансформатора коэффициент перекомпенсации

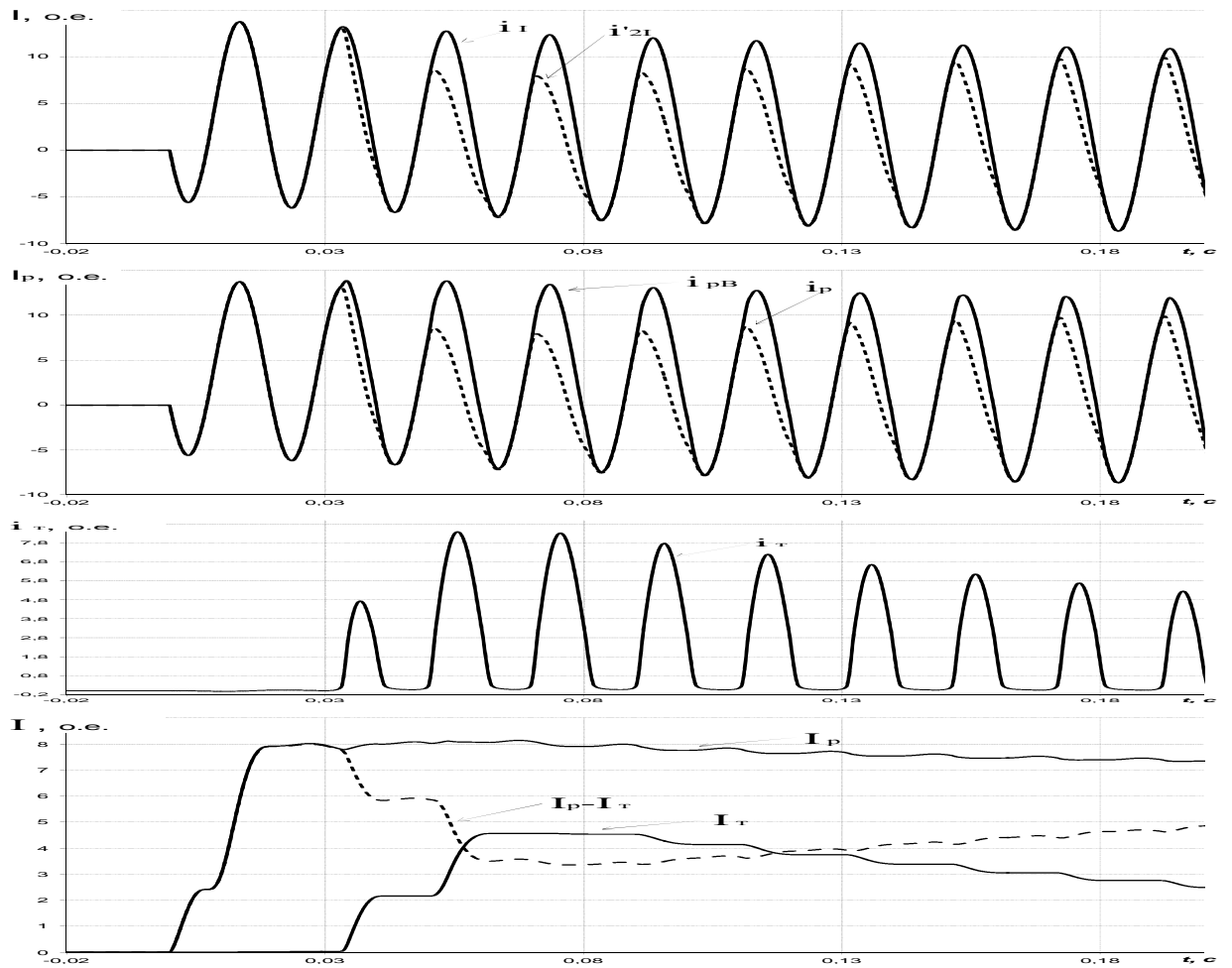


Рис. 14. Работа дифференциальной защиты с использованием ФТН. Внутреннее КЗ.

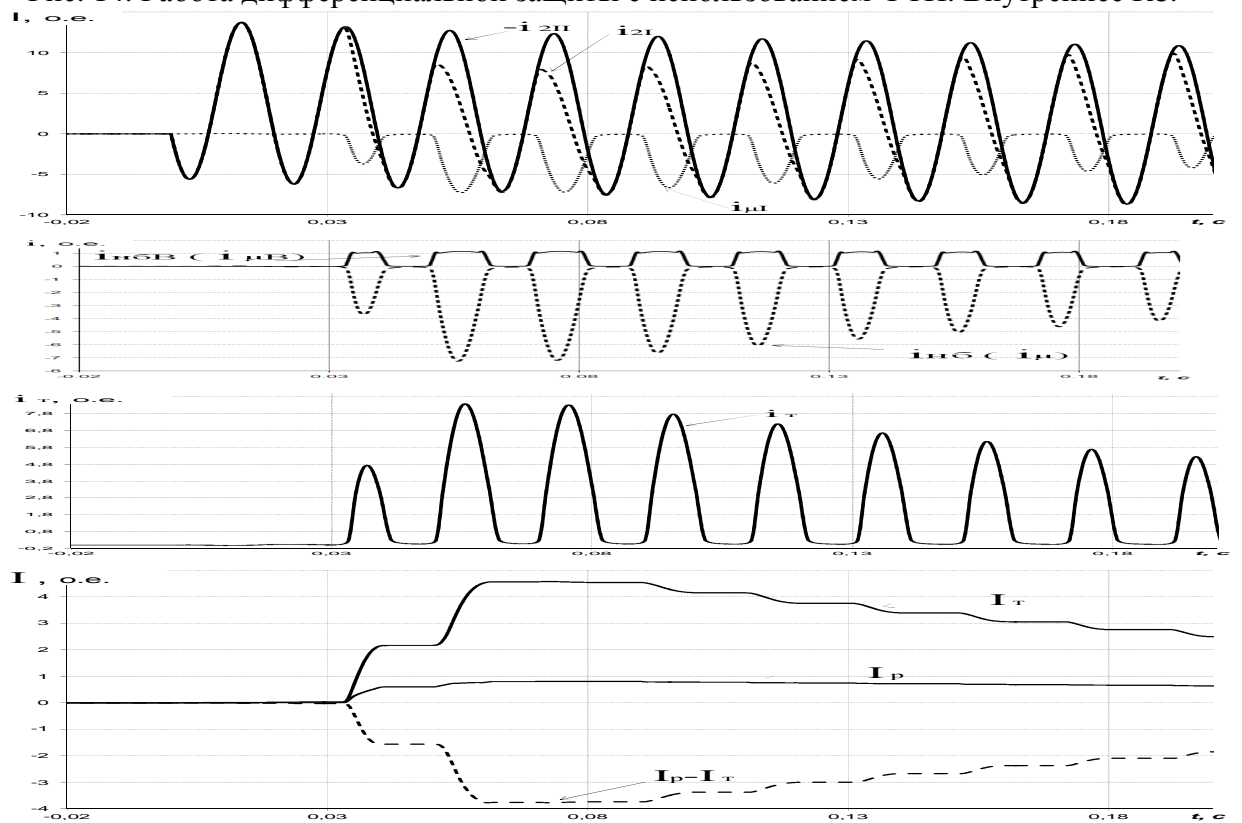


Рис. 15. Работа дифференциальной защиты с использованием ФТН. Внешнее КЗ.



рекомендуется выбирать в диапазоне 1.2-1.5.

Достоинством представленного подхода является отсутствие дополнительного торможения при токах, соответствующих диапазону предельно допустимой кратности по условию 10% погрешности ТТ. При этом величина тока срабатывания защиты принимается равной  $0,05 I_{ном}$  во всем указанном диапазоне. Рассмотренные функциональные схемы нашли свое применение в усовершенствованной дифференциальной защите двухобмоточного трансформатора. Структурная схема (см. рис. 16) содержит объект защиты 1, трансформаторы тока плеч защиты 2-3, промежуточные преобразователи вторичного тока ТТ 4,5, блок АЦП 6,7, функциональный решающий блок, в котором реализуется алгоритм дифференциальной защиты и формируется сигнал отключения.

Основной особенностью схемы является использование в ней нелинейных блоков 8-9, в которых вычисляются токи намагничивания трансформаторов тока, и решается задача восстановления первичных токов. Полученные сигналы выравниваются в блоке 10 с учетом коэффициента трансформации силового трансформатора и схемы соединения его обмоток. После чего восстановленные токи соответствующих присоединений защищаемого объекта используются для формирования рабочего сигнала 15. Приведенные токи намагничивания поступают на вход формирователя тормозного сигнала 16. Блоки 15,16 отражают формирование действующих значений тормозного и рабочего сигналов, при этом интервал усреднения данных величин может регулироваться. Рабочий и тормозной сигналы поступают на выходной блок 18, на выходе которого формируется сигнал на отключение защищаемого объекта. Схема дополнена блоком самодиагностики защиты 20. В данном блоке обрабатываются полученные токи намагничивания, первичные и вторичные токи.

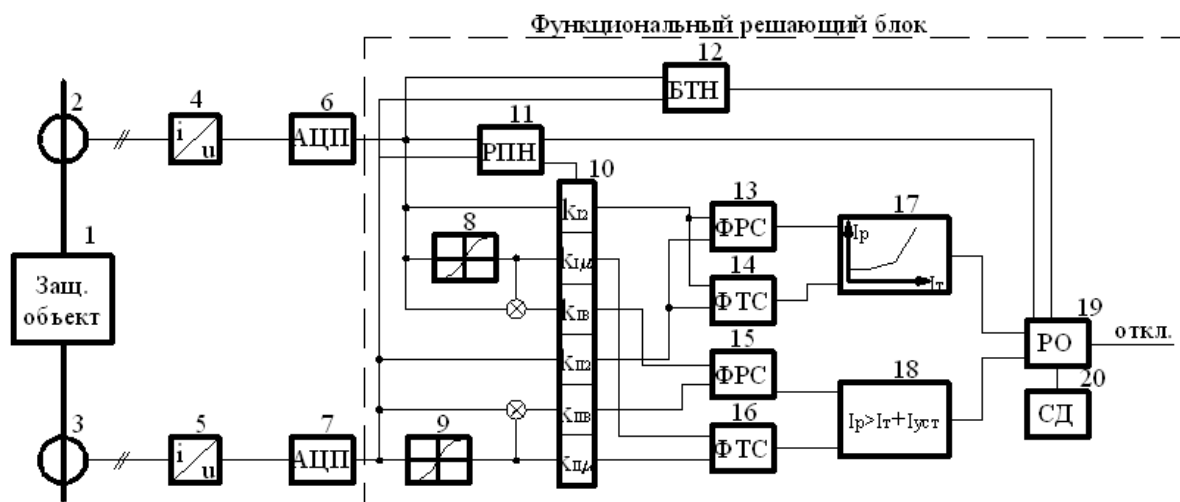


Рис. 16. Общая структурная схема дифференциальной защиты с использованием фильтра тока намагничивания ТТ.

В случаях выявления возможного превышения допустимой погрешности работы ФТН, защита загроубляется (повышается уставка срабатывания), либо блокируется. При этом предусматривается переключение дифференциальной

защиты на работу по одному из алгоритмов торможения в функции токов плеч защиты, например, разностью суммы абсолютных значений токов плеч и дифференциального тока. Для этого схема дополнена блоками 13,14,17. В блоке 20 также реализуется алгоритм, выявляющий режим глубокого насыщения ТТ и обрыв токовых цепей. В последних случаях полностью блокируется действие защиты на отключение.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны опытные образцы вторичных преобразователей тока и напряжения с расширенным динамическим диапазоном ( $I_{ex} = 0.05 \div 100 \text{ A}$ ,  $U_{ex} = 0.1 \div 100 \text{ B}$ ) и повышенной помехозащищенностью. Данные преобразователи предназначены для использования в системах релейной защиты и противоаварийного управления, а также в цифровых регистраторах аварийных событий и диагностических комплексах.

2. Созданные вторичные преобразователи, средства их тестирования методы численного расчета нестационарных режимов ЭЭС и соответствующее прикладное программное обеспечение интегрированы в комплексную систему испытаний и диагностики реального времени (DoRTSD – Real-Time System of Diagnostics) силового электрооборудования и микропроцессорных средств РЗА.

3. Разработано цифровое устройство (ФТН) восстановления первичного тока ТТ с учетом нелинейных характеристик его параметров, которое повышает устойчивость и достоверность контроля параметров энергосистемы средств релейной защиты и противоаварийной автоматики. Интеграция ФТН в структурную схему дифференциальной защиты позволила существенно повысить ее быстроедействие и чувствительность.

4. Показано, что применение разработанного алгоритма восстановления первичного тока совместно с существующими алгоритмами торможения позволяет снизить коэффициент торможения и минимальный ток срабатывания более чем в два раза (до  $k_m = 0.1-0.2$  и  $I_{с.мин} \approx 0,05I_{ном}$ ). При использовании нового алгоритма дифференциальной защиты уставка срабатывания принимается равной  $0,05I_{ном}$  во всем диапазоне первичных токов ТТ, удовлетворяющих условию 10% погрешности.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных в перечне ВАК РФ**

- 1) *Попов С.О.* Вторичные преобразователи для интеллектуальных устройств управления, защиты и диагностики электрооборудования энергосистем/ *Ванин В.К., Попов С.О.* // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – Спецвыпуск. - С. 33-36.
- 2) *Попов С.О.* Повышение эффективности дифференциальных защит энергетического оборудования/ *Ванин В.К. Попов М.Г., Попов С.О.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011.- №3(130). - С. 27-31.

- 3) *Попов С.О.* Особенности исследования динамических свойств микропроцессорных средств защиты силовых трансформаторов/ *Ванин В.К., Попов М.Г. Попов С.О.* // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011.- №5. - С 55-62.

#### **Публикации в других изданиях**

- 4) *Попов С.О.* Дифференциальная защита силового оборудования. Методы повышения эффективности/ *Ванин В.К. Попов М.Г., Попов С.О.* // Новости Электротехники. – 2012. - №1(73).- С. 26-29.
- 5) *Попов С.О.* Современные методы и средства в научных исследованиях и обучении/ *Попов С.О., Синильников Р.Н.* // материалы XIV Всерос. конф. фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Т. 1/ Изд-во Политехн. ун-та. – СПб, 2010. - С 207-209.
- 6) *Попов С.О.* Разработка новых алгоритмов дифференциальных защит силовых трансформаторов/ *Гараева Н.Р., Попов М.Г. Попов С.О.*// материалы XIV Всерос. конф. фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Т. 1/ Изд-во Политехн. ун-та.- СПб, 2010. - С. 19-20.
- 7) *Попов С.О.* Разработка схемы замещения силовых автотрансформаторов в фазных и симметричных координатах/ *Гараева Н.Р., Попов М.Г., Попов С.О.* // Материалы конф. политехнического симпозиума Молодые ученые – промышленности северо-западного региона/ Изд-во Политехн. ун-та.- СПб, 2010. - С. 82-84.
- 8) *Попов С.О.* Совершенствование методов и программного обеспечения исследований переходных процессов автотрансформаторов с компенсационной обмоткой/ *Попов М.Г. Гараева Н.Р., Попов С.О.* // Материалы XIV Всерос. конф. фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Т. 1. / Изд-во Политехн. ун-та.- СПб, 2010. - С. 206-207.