

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.316.1+621.316.925

РУМЯНЦЕВ
Юрий Владимирович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ
ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Минск 2019

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **НОВАШ Иван Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрические станции» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **ЗАБЕЛЛО Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» Белорусского государственного аграрного технического университета;

ЛОМАН Михаил Степанович, кандидат технических наук, ведущий инженер Управления перспективного развития ОАО «Белэлектромонтажналадка»

Оппонирующая организация Научно-исследовательское и проектное республиканское унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»

Защита состоится 24 мая 2019 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201; телефон ученого секретаря (+37517) 292-42-32; адрес электронной почты: ronomarenkoeg@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » апреля 2019 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



Е.Г. Пономаренко

ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь на всех новых и реконструируемых электроэнергетических объектах для автоматического отключения поврежденного электрооборудования от неповрежденной части электроэнергетической системы устанавливаются микропроцессорные токовые защиты (МПТЗ). Для разработки новых модификаций таких МПТЗ с повышенным техническим совершенством и последующим вводом их в эксплуатацию требуется проведение функциональных испытаний с применением испытательных комплексов, которые подводят к испытуемым МПТЗ тестовые воздействия с целью определения правильности их функционирования.

В существующей практике проведения функциональных испытаний, подводимые от испытательного комплекса к МПТЗ тестовые воздействия, имитирующие нормальные, аварийные и послеаварийные сигналы тока, представляются простейшими синусоидальными сигналами с изменяющейся амплитудой. Такой подход не позволяет формировать достоверные тестовые воздействия, отвечающие различным режимам функционирования электроэнергетической системы, в особенности таким, при которых происходит насыщение стальных магнитопроводов электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) и силовых трансформаторов. Такие режимы являются наиболее неблагоприятными с точки зрения определения правильности функционирования МПТЗ, т. к. в этих режимах сигнал вторичного тока ТТ, измеряемый МПТЗ, является существенно несинусоидальным.

Для устранения указанных недостатков предлагается разработать испытательные программные и программно-аппаратные комплексы, позволяющие моделировать различные режимы функционирования защищаемого оборудования электроэнергетической системы и таким образом получать, а затем подводить физически к МПТЗ или в цифровом виде к ее модели тестовые воздействия, аналогичные входным сигналам МПТЗ в реальных условиях их эксплуатации.

Преимущества данного подхода, по сравнению с существующей практикой проведения функциональных испытаний токовых защит, заключаются в возможности определения правильности и особенностей функционирования МПТЗ в различных режимах работы электроэнергетической системы, что может быть использовано как при задании или корректировке настроек уже существующих МПТЗ, так и для повышения технического совершенства и конкурентного преимущества разрабатываемых отечественных устройств МПТЗ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась в соответствии с приоритетными направлениями фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь в рамках заданий:

– государственной программы научных исследований «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» на 2011–2013 гг., подпрограмма «Надежность энергоснабжения». Задание 2.5 «Совершенствование математических моделей элементов распределительных сетей для исследования новых принципов выполнения микропроцессорных защит»;

– государственной программы научных исследований «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» на 2014–2015 гг., подпрограмма «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения». Задание 1.1.28 «Совершенствование математических моделей элементов трансформаторных подстанций для исследования новых принципов выполнения микропроцессорных защит»;

– государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2016–2018 гг., подпрограмма «Энергетическая безопасность и надежность энергетических систем». Задание 1.2.04 «Программное и информационное обеспечение для проверки работоспособности микропроцессорных защит с помощью испытательно-диагностических комплексов».

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в разработке программно-аппаратного обеспечения комплексов для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит в различных режимах работы защищаемого оборудования электроэнергетической системы.

Для достижения указанной цели потребовалось решить следующие задачи:

– провести анализ структуры и принципов реализации существующих комплексов для испытаний МПТЗ и определить направления их дальнейшего совершенствования;

– разработать и реализовать в системе динамического моделирования Simulink-SimPowerSystems программные комплексы, для чего необходимо: обосновать методики задания параметров для блоков, входящих в библиотеку SimPowerSystems и представляющие модели основных элементов электрооборудования, а также разработать и реализовать в Simulink отсутствующие в данной библиотеке блоки модели трехфазной группы ТТ;

– провести сравнение результатов моделирования реализованных программных комплексов с эталонными результатами моделирования;

– разработать и реализовать в Simulink блок модели стандартного измерительного органа тока МПТЗ и входящий в его состав блок модели цифрового фильтра, а также блок модели измерительного органа тока, специально предназначенного для функционирования в условиях глубокого насыщения стали магнитопровода ТТ;

– разработать и реализовать в Simulink-SimPowerSystems испытательные программные комплексы для функциональных испытаний моделей микропроцессорной токовой защиты и микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового двухобмоточного трансформатора;

– разработать и реализовать с использованием Simulink-SimPowerSystems и испытательной установки типа Omicron CMC 356 испытательный программно-аппаратный комплекс для функциональных испытаний реальной МПТЗ;

– провести сравнение результатов функциональных испытаний реальной МПТЗ и ее модели и выработать рекомендации по применению полученных результатов.

Объект исследования: микропроцессорные токовые защиты.

Предмет исследования: комплексы для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит.

Решение поставленных задач производилось методами математического и компьютерного моделирования, теоретического анализа, вычислительного и натурального эксперимента.

Научная новизна

Разработан и реализован в Simulink блок упрощенной модели трехфазной группы ТТ с параметрами, определяемыми только каталожными данными моделируемой трехфазной группы ТТ. Разработанная упрощенная модель позволяет получать результаты моделирования с точностью до 95 %, по сравнению с эталонными результатами.

Разработана методика расчета параметров блока модели трехфазного силового двухобмоточного трансформатора из библиотеки SimPowerSystems с учетом возможности насыщения стали магнитопровода, основанная на использовании только каталожных данных силовых трансформаторов. Использование предложенной методики, в отношении рассматриваемого блока модели, позволяет получать результаты моделирования с точностью до 93 %, по сравнению с эталонными результатами.

Разработан и реализован в Simulink блок модели измерительного органа тока МПТЗ, специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения стали магнитопровода ТТ, обеспечивающий работоспособность измерительного органа тока в данных условиях и повышение его быстродействия на время, равное длительности не менее двух периодов промышленной частоты (0,04 с), по сравнению со стандартным измерительным органом тока МПТЗ.

Реализован испытательный программный комплекс для функциональных испытаний модели микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового двухобмоточного трансформатора, а также испытательный программно-аппаратный комплекс для функциональных испытаний реальных МПТЗ. Разработанные испытательные комплексы позволили выявить существенное замедление срабатывания как МПТЗ, так и дифференциальной защиты силового двухобмоточного трансформатора в условиях насыщения стали магнитопровода ТТ на время не менее 0,16 с и 0,155 с соответственно, не проявляющееся при синусоидальных формах тестовых воздействий.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный и реализованный в Simulink блок упрощенной модели трехфазной группы ТТ с параметрами, определяемыми только каталожными данными ТТ, входящих в моделируемую трехфазную группу, и позволяющий получать результаты моделирования с точностью до 95 %, по сравнению с эталонными результатами моделирования.

2. Методика расчета параметров блока модели трехфазного силового двухобмоточного трансформатора из библиотеки SimPowerSystems с учетом возможности насыщения стали магнитопровода, основанная на использовании только каталожных данных силового трансформатора, применение которой в отношении рассматриваемого блока модели позволяет получать результаты моделирования с точностью до 93 %, по сравнению с эталонными результатами моделирования.

3. Разработанный и реализованный в Simulink блок модели измерительного органа тока МПТЗ, специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения стали магнитопровода ТТ, обеспечивающий свою работоспособность в данных условиях с повышенным быстродействием по сравнению со стандартным измерительным органом тока микропроцессорной токовой защиты на время, равное не менее длительности двух периодов промышленной частоты (0,04 с).

4. Разработанный и реализованный в Simulink-SimPowerSystems испытательный программный комплекс для функциональных испытаний модели микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового двухобмоточного трансформатора, позволивший установить, что традиционные алгоритмы блокирования функционирования такой защиты при выявлении режима броска намагничивающего тока, основанные на его гармоническом анализе, могут вызывать ложное блокирование срабатывания микропроцессорной токовой дифференциальной защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ, на время не менее 0,155 с или 7,75 периодов промышленной частоты.

5. Разработанный и реализованный с использованием Simulink-SimPowerSystems и испытательной установки типа Omicron CMC 356 испытательный программно-аппаратный комплекс для функциональных испытаний МПТЗ, позволивший выявить существенное замедление срабатывания (до 0,16 с) МПТЗ в составе реальной микропроцессорной защиты типа МР801 в условиях насыщения стали магнитопровода ТТ.

Личный вклад соискателя ученой степени

Изложенные в диссертации основные результаты и положения были получены при выполнении: задания 2.5 ГПНИ «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения», задания 1.1.28 ГПНИ «Энергобезопасность, энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика», задания 1.2.04 ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» при участии соискателя, при этом личный вклад заключается в следующем: организации вычислительного эксперимента и проведении контрольных расчетов применительно к программным комплексам для исследования режимов функционирования подстанции с двухобмоточным силовым трансформатором и для исследования режимов функционирования линий электропередачи 6–35 кВ, позволяющих получать эталонные результаты моделирования; разработке методики расчета параметров блока модели трехфазного силового двухобмоточного трансформатора из библиотеки SimPowerSystems с учетом возможности насыщения стали магнитопровода; разработке и реализации в Simulink блока упрощенной модели трехфазной группы ТТ с параметрами, определяемыми только каталожными данными ТТ, входящих в моделируемую трехфазную группу; разработке и реализации в Simulink блока модели стандартного измерительного органа тока МПТЗ; разработке и реализации в Simulink блока модели измерительного органа тока МПТЗ, специально предназначенного для функционирования в условиях глубокого насыщения стали магнитопровода ТТ; разработке и реализации в Simulink-SimPowerSystems испытательного программного комплекса модели микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового двухобмоточного трансформатора; разработке и реализации с использованием Simulink-SimPowerSystems и испытательной установки типа Omicron CMC 356 испытательного программно-аппаратного комплекса для функциональных испытаний МПТЗ в составе реальной микропроцессорной защиты.

Анализ и обобщение полученных результатов проводился совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом Новашем И. В., который также оказывал практическую помощь и консультации на всех этапах выполнения диссертационной работы. Консультативную помощь на отдельных этапах проведения исследований по теме диссертации

ции оказывал член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор Романюк Ф. А.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований докладывались на международных научно-технических конференциях, симпозиумах, семинарах и форумах, а именно: международные научные симпозиумы «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, 2015 г., 2017 г.); девятая международная конференция «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations» (Закопане, Республика Польша, 2015 г.); 11-я, 12-я, 13-я, 14-я, 15-я Международные научно-технические конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, БНТУ, 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г.); девятая и десятая международные научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014» и «Энергия-2015» (Иваново, Российская Федерация, «ИГЭУ имени В. И. Ленина», 2014 г., 2015 г.); второй Белорусско-Корейский форум «Наука. Инновации. Производство» (Минск, 2013 г.); Международные научно-технические конференции «Компьютерное моделирование 2013», «Компьютерное моделирование 2015» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, «СПбПУ», 2013 г., 2015 г.); Международный семинар имени Ю. Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Минск, БНТУ, 2015 г.).

Полученные при выполнении диссертационных исследований результаты используются в учебном процессе на кафедре «Электрические станции» БНТУ при выполнении курсовых и дипломных проектов (подтверждается соответствующими актами, Приложения Б, В), а также переданы предприятию ОАО «Белэлектромонтажналадка», где разработанные технические решения использованы для повышения технического совершенства выпускаемых МПТЗ (получен акт о практическом использовании результатов исследования, Приложение А).

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ. Из них семь статей в семи номерах журнала из перечня научных изданий ВАК Республики Беларусь, общим объемом 6,8 авторского листа, три статьи в трех номерах зарубежного рецензируемого журнала, одна глава в монографии, одна статья в сборнике статей международного научного симпозиума, одна статья в сборнике научных статей международного семинара, 13 текстов и тезисов докладов в сборниках материалов международных научно-технических конференций, один патент Республики Беларусь на изобретение. Общее количество опубликованного материала составляет 11,3 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает в себя перечень условных сокращений, введение, общую характеристику работы, основную часть, состоящую из четырех глав, заключение, библиографический список и семь приложений. Библиографический список включает 169 наименований, занимает 14 страниц и включает два подраздела: список использованных источников из 142 наименований и список публикаций соискателя ученой степени состоящий из 27 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 144 страницы. Текст диссертации содержит пять таблиц и 52 рисунка общим объемом 28 страниц. Приложения занимают семь страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературных источников по теме исследования и рассмотрению существующих подходов к функциональным испытаниям МПТЗ, анализу их недостатков и возможным направлениям совершенствования.

Рассмотрены существующие подходы к функциональным испытаниям МПТЗ. Предложены направления их совершенствования, заключающиеся в разработке и реализации испытательного программного комплекса (ИПК) и испытательного программно-аппаратного комплекса (ИПАК). Указанные комплексы позволяют осуществлять моделирование различных режимов функционирования электроэнергетической системы (ЭС) и тем самым получать, а затем подводить к МПТЗ тестовые воздействия, аналогичные входным сигналам МПТЗ в реальных условиях их эксплуатации. Под ИПК подразумевается программный комплекс (ПК) функционирующий одновременно и совместно с моделью МПТЗ. В этом случае, воспроизведение результатов функционирования ПК – тестового воздействия, осуществляется непосредственно в процессе моделирования в цифровом виде. Под ИПАК подразумевается функционирование ПК совместно с испытательной установкой (ИУ) и реальным устройством МПТЗ. В этом случае происходит физическое воспроизведение тестовых воздействий с помощью ИУ, которая в свою очередь подключена к реальному устройству МПТЗ.

Реализованные ИПК и ИПАК позволят определять правильность функционирования МПТЗ в различных режимах работы защищаемого оборудования ЭС, что может быть использовано как при задании или корректировке настроек уже существующих МПТЗ, так и для повышения технического совершенства разрабатываемых отечественных устройств МПТЗ. Отмечено, что использование ИПК дает возможность не выводить из работы существующие МПТЗ при проведении их функциональных испытаний.

Рассмотрены недостатки функционирования стандартных измерительных органов (ИО) тока МПТЗ в условиях измерения ими искаженного вторичного тока ТТ вследствие его насыщения, приводящие к возможному неправильному функционированию МПТЗ в данных условиях. Отмечено, что повысить правильность функционирования МПТЗ в указанных условиях позволит разработка специального ИО тока, алгоритм функционирования которого будет учитывать информационные параметры искаженного сигнала вторичного тока ТТ.

Известны конструкции ТТ обеспечивающие повышенную точность трансформации первичного тока или практически не подверженные эффекту насыщения. Отмечено, что такие ТТ до сих пор не получили широкого распространения в ЭС, поэтому на данный момент учет возможности насыщения ТТ является вынужденной и необходимой мерой при проведении функциональных испытаний МПТЗ.

Во второй главе рассмотрены ПК с жесткой структурой, разработанные на кафедре «Электрические станции» БНТУ с использованием языка программирования Delphi. Отмечены недостатки данных ПК, заключающиеся в необходимости задания труднодоступных значений геометрических параметров магнитной системы моделируемого электрооборудования, а также жесткой структуре модели ЭС, не позволяющей изменять ее расчетную схему.

Приведены расчетные схемы данных ПК и математическое описание основных моделей электрооборудования в их составе: линии электропередачи, нагрузки, ТТ и силового трансформатора. Отмечено, что ПК с жесткой структурой для исследования режимов функционирования подстанции с двухобмоточным силовым трансформатором – KZTRANS2 и ПК для исследования режимов функционирования линий электропередачи 6–35 кВ – UKZLINE дают возможность получать результаты с высокой точностью (расхождение с натурными испытаниями не превышает 10–15 %). Указанное позволяет рассматривать результаты моделирования данных ПК, как эталонные, с которыми могут быть сравнены результаты моделирования ПК с гибкой структурой, позволяющие изменять расчетную схему. Последние реализуются с использованием системы динамического моделирования Simulink–SimPowerSystems, и для своего функционирования требуют задания только всегда доступных каталожных данных моделируемого электрооборудования.

В третьей главе разработаны и реализованы в Simulink–SimPowerSystems основные модели элементов ПК с гибкой структурой.

Модели большинства электроэнергетических элементов ПК представляются стандартными библиотечными блоками моделей SimPowerSystems. Разработана отсутствующая методика расчета значений параметров блока

модели трехфазного двухобмоточного трансформатора «*Three-phase Transformer (Two Windings)*» с учетом нелинейных свойств его магнитопровода (т. е. с учетом возможности насыщения стали магнитопровода), основанная на использовании только каталожных данных силового трансформатора. В Simulink реализован блок модели трехфазной группы ТТ, в котором учитываются геометрические параметры и характеристика намагничивания стали магнитопровода ТТ.

Обоснована методика реализации упрощенной математической модели трехфазной группы ТТ с параметрами, определяемыми только каталожными данными. На основе данной методики разработан и реализован в Simulink блок упрощенной модели трехфазной группы ТТ. Система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ с номинальным вторичным током $I_{2\text{НОМ}} = 5 \text{ А}$ и обмотками класса точности 10Р имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dB_j}{dt} = \frac{83,34 \left[(0,0004I_{1\text{НОМ}} + R_{Hj})i_{2j} + R_0i_0 \right]}{K_{\text{НОМ}} (0,0004I_{1\text{НОМ}} + R_{\text{НОМ}j})}; \\ i_{2j} = \frac{5i_{1j}}{I_{1\text{НОМ}}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{\text{НОМ}} H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}. \end{cases} \quad (1)$$

где $I_{1\text{НОМ}}$ – номинальный первичный ток ТТ; R_n – активное сопротивление нагрузки; $K_{\text{НОМ}}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{\text{НОМ}}$ – номинальное активное сопротивление нагрузки ТТ; $B_m = f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали; $j = (A, B, C)$.

Разработан и реализован в Simulink блок модели стандартного ИО тока МПТЗ и входящий в его состав блок модели цифрового фильтра (ЦФ) (рисунок 1).

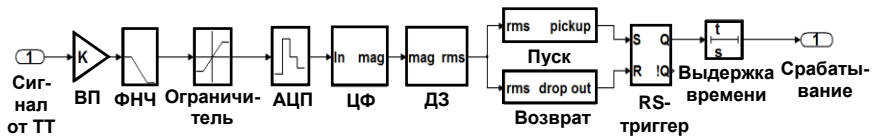


Рисунок 1. – Реализованная модель стандартного измерительного органа тока

В состав реализованной модели входят следующие основные блоки: входной преобразователь (блок «ВП»), аналого-цифровой преобразователь (блок «АЦП»), фильтр низших частот (блок «ФНЧ»), цифровой фильтр (блок «ЦФ»), а также блоки «ПУСК», «ВОЗВРАТ», «RS-триггер», «Вы-

держка времени», предназначенные для проверки сохранения условий пуска в течение заданного времени.

Проанализированы существующие методики расчета коэффициентов ЦФ, реализованных на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ), метода наименьших квадратов (МНК), а также косинусного фильтра (КФ). Разработаны файл-программы для автоматизированного расчета коэффициентов указанных ЦФ. Предложены различные способы реализации моделей ЦФ на основе стандартных блоков моделей Simulink. Отмечено, что использование конкретного типа ЦФ определяет быстродействие и правильность функционирования МПТЗ и является его отличительной особенностью от аналогичных устройств защиты других производителей.

На основе стандартного ИО тока разработан и реализован в Simulink блок модели ИО тока МПТЗ специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения ТТ. Отмечено, что в этих условиях вторичный ток ТТ имеет характерную неперiodическую искаженную форму, существенно отличающуюся от формы его первичного тока, что приводит к занижению значения амплитуды основной гармоники, определяемого ЦФ, по сравнению с ее истинным значением. Указанные особенности приводят к замедлению или отказу срабатывания стандартных ИО тока. Одним из путей решения этой проблемы является разработка ИО тока, функционирующего в зависимости от степени насыщения ТТ. Для этого предлагается формировать выходной сигнал ИО тока в виде непрерывного эквивалентного сигнала $I_{eq} = f(THD, I)$, который является функцией действующего значения I и коэффициента нелинейных искажений THD контролируемого сигнала вторичного тока ТТ. Коэффициент нелинейных искажений THD учитывает все высшие гармоники, присутствующие в контролируемом сигнале, уровень и состав которых существенно возрастает при насыщении ТТ. Таким образом, значение формируемого эквивалентного сигнала на выходе ИО тока в условиях измерения им искаженного, вследствие насыщения ТТ, сигнала вторичного тока позволяет приблизить его значение к истинному и тем самым повысить быстродействие МПТЗ в рассматриваемых условиях.

В четвертой главе приведены сравнения результатов моделирования реализованных в Simulink-SimPowerSystems ПК с гибкой структурой с эталонными результатами моделирования, полученными в ПК с жесткой структурой; приведены результаты функционирования реализованных ИПК и ИПАК; приведены рекомендации по их дальнейшему использованию.

Проверка значений параметров блока модели силового трансформатора, рассчитанных с использованием разработанной методики, проводилась путем сравнения результатов моделирования режима броска намагничивающего тока (БНТ), возникающего вследствие насыщения стали магни-

топровода ненагруженного силового трансформатора, при его постановке на холостой ход со стороны высшего напряжения. Результаты были получены в ПК, реализованном в Simulink-SimPowerSystems с использованием блока модели «*Three-phase Transformer (Two Windings)*», и ПК KZTRANS2. Структура модели, параметры элементов ЭС и время включения выключателя стороны высшего напряжения задавались идентичными. Выявлено совпадение на 93 % результатов моделирования, полученных в ПК с гибкой структурой, и эталонными результатами моделирования, полученными в ПК KZTRANS2 с жесткой структурой.

Проверка функционирования разработанных и реализованных в Simulink блоков моделей ТТ проводилась путем сравнения результатов моделирования, полученных в ПК, реализованном в Simulink-SimPowerSystems, и ПК UKZLINE. Структура модели и параметры элементов ЭС задавались идентичными. Сравнение полученных результатов моделирования приведено на рисунке 2.

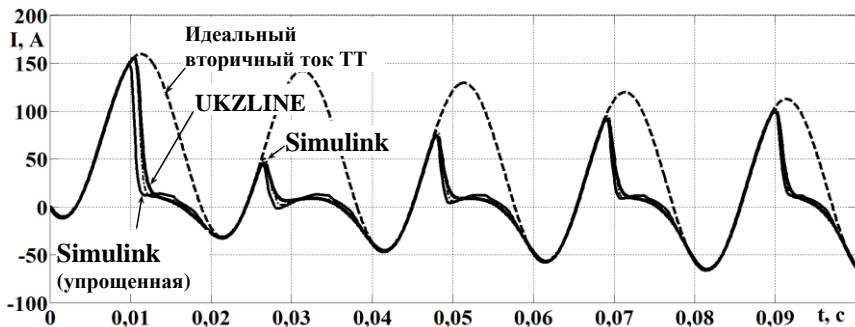


Рисунок 2. – Результаты моделирования режима насыщения трехфазной группы ТТ (фаза А)

В результате моделирования аварийного режима произошло насыщение ТТ. Выявлено совпадение на 95 % результатов моделирования, полученных в ПК с гибкой структурой, и эталонными результатами моделирования, полученными в ПК UKZLINE с жесткой структурой.

Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что разработанные модели силового трансформатора и трансформаторов тока являются адекватными, что подтверждено сравнением результатов их функционирования с эталонными результатами. Поэтому данные блоки моделей могут быть использованы при реализации ПК с гибкой структурой, требующих для своего функционирования использования только каталожных данных.

Информация о режиме функционирования защищаемого электрооборудования передается в МПТЗ через ТТ. В связи с этим, проверку разработанных блоков моделей ЦФ целесообразно осуществлять, воспроизводя наиболее неблагоприятный, с точки зрения правильного функционирования МПТЗ, режим работы ТТ – насыщение, сопровождающийся искажением формы его вторичного тока, измеряемого ИО тока МПТЗ.

Процесс установления выходного сигнала ЦФ на основе МНК, КФ и ФОС представлен на рисунке 3.

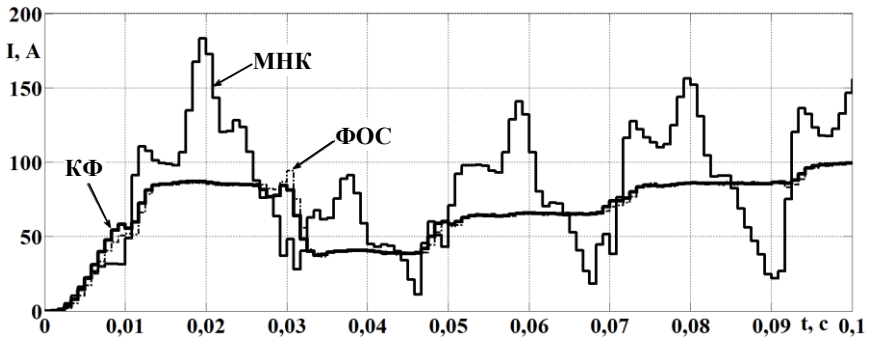
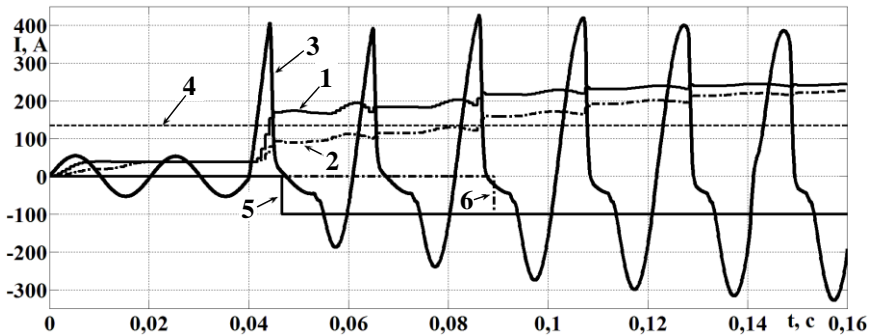


Рисунок 3. – Процесс установления выходного сигнала ЦФ

ЦФ на основе МНК демонстрирует наихудшие показатели качества и не может быть рекомендован к использованию в МПТЗ. Установлено, что ЦФ на основе КФ обеспечивает наиболее достоверное определение действующего значения полезного сигнала в условиях насыщения ТТ.

Проверка разработанного и реализованного в Simulink ИО тока для функционирования в условиях глубокого насыщения ТТ, также проводилась с использованием искаженного, вследствие насыщения ТТ, сигнала вторичного тока. На рисунке 4 приведен результат функционирования предложенного ИО тока в сравнении со стандартным ИО тока. В момент времени $t = 0,04$ с происходит короткое замыкание – аварийный режим, а в момент времени $t = 0,044$ с ТТ входит в глубокую степень насыщения, форма его вторичного тока (кривая 3) значительно искажается.

В результате установлено, что ИО тока МПТЗ специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения ТТ обеспечивает функционирование в данных условиях с повышенным на время равное длительности не менее двух периодов промышленной частоты (0,04 с) быстродействием по сравнению со стандартным ИО тока МПТЗ.



1 – выходной сигнал разработанного ИО тока; 2 – выходной сигнал стандартного ИО тока; 3 – изменение во времени вторичного тока ТТ; 4 – уставка срабатывания; 5 – срабатывание предложенного ИО тока; 6 – срабатывание стандартного ИО тока

Рисунок 4. – Результат функционирования предложенного ИО тока в сравнении со стандартным ИО тока

Для проверки возможности практического использования разработанных блоков моделей, в Simulink-SimPowerSystems был разработан и реализован ИПК для функциональных испытаний МПТЗ для защиты силового двухобмоточного трансформатора – модели микропроцессорной токовой дифференциальной защиты (МПТДЗ). Схема испытания приведена на рисунке 5 и включает, помимо стандартных и разработанных ранее блоков моделей, блок модели МПТДЗ (блок «Дифференциальная защита»).

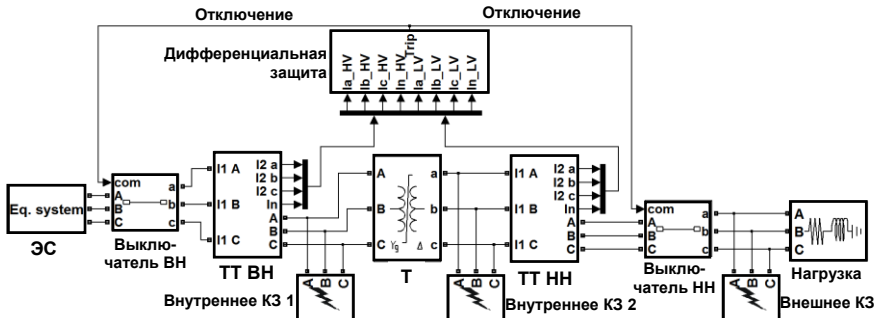


Рисунок 5. – Структурная схема модели испытаний МПТДЗ, реализованная в Simulink-SimPowerSystems

Проведены функциональные испытания модели МПТДЗ при внешних и внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ, и в режиме возникновения БНТ.

Установлено, что наличие высших гармоник (в основном 2-й гармоники) в контролируемом сигнале тока не всегда свидетельствует о возникновении режима БНТ, который не является аварийным и, следовательно, не требует отключения трансформатора.

Так, при повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ, в его вторичном токе появляются как четные, так и нечетные высшие гармоники. В процессе исследований установлено, что традиционные алгоритмы блокирования работы МПТДЗ при выявлении режима БНТ, основанные на гармоническом анализе тока, могут вызывать ложное блокирование срабатывания МПТДЗ при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ, на время не менее 0,155 с или 7,75 периодов промышленной частоты.

Рекомендовано для повышения быстродействия и правильности функционирования МПТДЗ использовать дополнительные способы идентификации режима БНТ силового трансформатора, которые в сочетании с традиционным алгоритмом блокировки по гармоническому составу, позволят повысить быстродействие защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ.

В качестве объекта испытания реальной МПТЗ, с использованием реализованного ИПАК, была выбрана МПТЗ мгновенного действия в составе микропроцессорной защиты (МПЗ) типа МР801 производства ОАО «Белэлектромонтажналадка». Структура ИПАК для испытаний представлена на рисунке 6. Моделирование режимов функционирования ЭС осуществляется в ПК с гибкой структурой, реализованном в Simulink-SimPowerSystems.

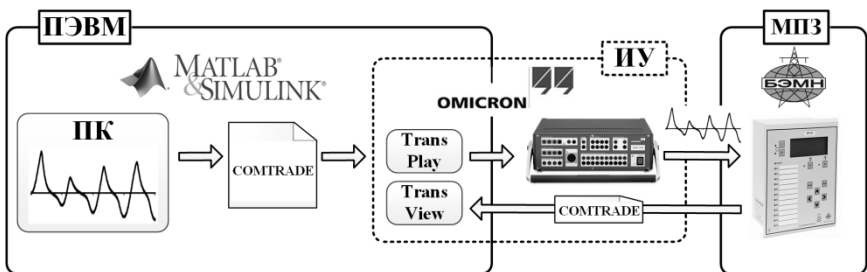


Рисунок 6. – Испытательный программно-аппаратный комплекс

Подача тестовых воздействий в МПТЗ осуществлялась в режиме разомкнутого контура с использованием ИПАК. Для этого, сигналы вторичного тока ТТ, полученные в результате моделирования режимов функционирования ЭС в ПК с гибкой структурой, преобразовывались в осциллограммы формата COMTRADE и далее физически подводились при помощи ИУ типа СМС 356 к испытуемой МПТЗ. Все тестовые воздействия были сформированы при различных номинальных параметрах модели ТТ, что позволило получить характерные формы его вторичного тока при различных режимах функционирования ЭС, соответствующие как незначительной, так и глубокой степени насыщения ТТ.

Управление ИУ осуществлялось при помощи переносной ПЭВМ с установленным на ней специализированным программным обеспечением TransPlay, обеспечивающим выбор и воспроизведение заранее подготовленных осциллограмм в формате COMTRADE.

Проведенные эксперименты позволили выявить особенности функционирования МПТЗ в составе МПЗ типа МР801, которые не проявлялись при синусоидальных формах тестовых воздействий. Так, при насыщении ТТ, вычисляемое ЦФ в составе ИО тока действующее значение полезного сигнала оказалось существенно заниженным по сравнению с его истинным значением, что приводило к максимальному замедлению срабатывания МПТЗ на время равное длительности 8 периодов промышленной частоты (0,16 с). Следует отметить, что указанная особенность характерна не только для МПТЗ в составе МПЗ типа МР801, но и для МПТЗ других производителей. Рекомендуется для повышения быстродействия и правильности функционирования МПТЗ в указанных условиях использовать разработанный измерительный орган тока МПТЗ, специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения ТТ.

Произведено сравнение времени срабатывания МПТЗ в составе МПЗ типа МР801 и ее модели в составе реализованного в Simulink-SimPowerSystems ИПК при идентичных формах тестовых воздействий. Проведенные расчеты показали, что в среднем разработанная модель срабатывает на 8 % быстрее своего реального прототипа.

Указанные незначительные отличия в функционировании модели и реального устройства позволяют рекомендовать на начальной стадии разработки новых модификаций МПТЗ отказаться от применения ИПАК и использовать более универсальные ИПК, реализованные в Simulink-SimPowerSystems.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации выполнены научно-технические исследования, направленные на разработку программно-аппаратного обеспечения комплексов, позволяющих проводить функциональные испытания микропроцессорных токовых защит в различных режимах работы защищаемого оборудования электроэнергетической системы.

Основные научные результаты диссертации

1. Программные комплексы с жесткой структурой позволяют получать результаты моделирования с погрешностями, не превышающими 10–15 % по сравнению с натурными испытаниями [6–А, 12–А, 13–А], что позволяет их использовать как эталонные, при сравнении с результатами моделирования, полученными в программных комплексах с гибкой структурой, реализованных в среде моделирования Simulink-SimPowerSystems, для подтверждения правильности их функционирования [6–А, 10–А].

2. Предложена методика расчета параметров блока модели трехфазного силового двухобмоточного трансформатора из библиотеки SimPowerSystems с учетом возможности насыщения стали магнитопровода, основанная на использовании только каталожных данных силового трансформатора. Получено совпадение результатов моделирования с точностью в 93 % [2–А] при сравнении результатов программного комплекса с гибкой структурой, реализованного в Simulink-SimPowerSystems, в котором использован блок модели трехфазного силового двухобмоточного трансформатора с параметрами, рассчитанными в соответствии с предложенной методикой, с эталонными результатами моделирования программного комплекса с жесткой структурой [24–А].

3. В Simulink разработан блок упрощенной модели трехфазной группы ТТ с параметрами, определяемыми только каталожными данными ТТ [1–А, 3–А, 14–А, 15–А, 16–А, 17–А, 19–А, 20–А, 22–А]. Получено совпадение в 95 % [10–А, 6–А] при сравнении результатов моделирования программного комплекса с гибкой структурой, реализованного в Simulink-SimPowerSystems с использованием разработанного блока упрощенной модели с эталонными результатами моделирования программного комплекса с жесткой структурой [8–А, 18–А, 21–А].

4. Методом вычислительного эксперимента установлено, что цифровой фильтр на основе косинусного фильтра обеспечивает наиболее достоверное определение значения амплитуды полезного сигнала в условиях насыщения ТТ и может быть рекомендован к использованию в отечественных МПТЗ [5–А, 11–А, 23–А, 25–А].

5. Установлено, что быстродействие предложенного измерительного органа тока МПТЗ, специально предназначенного для функционирования в

условиях глубокого насыщения ТТ, превышает быстрдействие стандартного измерительного органа тока в данных условиях на время, не менее длительности двух периодов промышленной частоты (0,04 с) [7–А, 8–А, 27–А].

6. В Simulink-SimPowerSystems реализован испытательный программный комплекс для функциональных испытаний модели микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового двухобмоточного трансформатора. Выявлено с использованием реализованного испытательного комплекса, что традиционные алгоритмы блокирования функционирования такой защиты при выявлении режима броска намагничивающего тока, основанные на его гармоническом анализе, могут вызывать ложное блокирование срабатывания микропроцессорной токовой дифференциальной защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ, на время не менее 0,155 с или 7,75 периодов промышленной частоты. Рекомендуется для повышения быстрдействия и правильности функционирования микропроцессорной токовой дифференциальной защиты использовать дополнительные способы идентификации режима броска намагничивающего тока силового трансформатора, которые в сочетании с традиционным алгоритмом блокировки по гармоническому составу позволят повысить быстрдействие защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ [4–А, 9–А].

7. Реализован испытательный программно-аппаратный комплекс с использованием Simulink-SimPowerSystems и испытательной установки типа Omicron СМС 356 для функциональных испытаний МПТЗ в составе микропроцессорной защиты типа МР801, позволивший выявить существенное замедление ее срабатывания (до 0,16 с) в условиях насыщения ТТ [6–А, 13–А, 26–А]. Рекомендуется для повышения быстрдействия и правильности функционирования МПТЗ в указанных условиях использовать разработанный измерительный орган тока МПТЗ, специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения ТТ [7–А].

8. Проведено сравнение результатов функциональных испытаний МПТЗ в составе микропроцессорной защиты типа МР801 и ее модели, полученных с использованием испытательного программно-аппаратного комплекса и испытательного программного комплекса соответственно. Установлено, что результаты функциональных испытаний отличаются не более чем на 8 %, что позволяет рекомендовать на стадии разработки новых МПТЗ и их измерительных органов тока отказаться от использования испытательных программно-аппаратных комплексов, а использовать более универсальные испытательные программные комплексы, реализованные в Simulink-SimPowerSystems [6–А, 12–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования, применяются:

– испытательный программно-аппаратный комплекс использован предприятием ОАО «Белэлектромонтажналадка» для повышения технического совершенства выпускаемых им микропроцессорных токовых защит электрооборудования, что подтверждается соответствующим актом (Приложение А);

– программные комплексы используются в учебном процессе на кафедре «Электрические станции» БНТУ при выполнении курсовых и дипломных работ по дисциплине «Релейная защита и автоматика», с целью повышения качества подготовки специалистов, что подтверждается соответствующими актами (Приложения Б, В);

– компьютерные программы (испытательные программные комплексы и программные комплексы) внесены в реестр служебных компьютерных программ БНТУ, что подтверждается соответствующими свидетельствами о регистрации (Приложения Г–Ж).

Также, полученные результаты могут быть рекомендованы для использования на предприятиях, входящих в состав Государственного производственного объединения «Белэнерго», занимающихся исследованием, разработкой, проектированием, наладкой и эксплуатацией микропроцессорных защит при выполнении работ по своему профилю.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий ВАК Республики Беларусь

1—А. Новаш, И. В. Реализация математической модели трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2014. – № 3. – С. 19–28.

2—А. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2015. – № 1. – С. 12–24.

3—А. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2015. – № 5. – С. 23–38.

4—А. Румянцев, Ю. В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора / Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 203–224.

5—А. Румянцев, Ю. В. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 397–417.

6—А. Новаш, И. В. Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 291–308.

7—А. Румянцев, Ю. В. Цифровой измерительный орган для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш // Известия

высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2018. – Т. 61. – № 6. – С. 483–493.

Статьи в других изданиях

8–А. Романюк, Ф. А. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, И. В. Новаш, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : ВГТУ, 2015. – Т. 1. С. 115–139.

9–А. Румянцев, Ю. В. Исследование надежности срабатывания цифровой дифференциальной защиты трансформатора в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / Ю. В. Румянцев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики. Минск, 2015. С. 390–396.

10–А. Romanyuk, F. Wye-connected current transformers simplified model validation in MATLAB-Simulink / F. Romanyuk, I. Novash, Y. Rumiantsev, P. Węgierek // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). – 2015. – Vol. 91, № 11. – С. 292–295.

11–А. Romaniuk, F. Comparative assessment of digital filters for microprocessor-based relay protection / F. Romaniuk, V. Rumiantsev, Y. Rumiantsev, O. Boiko // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). – 2016. – Vol. 92, № 7. – С. 128–131.

12–А. Romanyuk, F. Application of a software package for transmission line digital overcurrent protection testing in the MATLAB-Simulink environment / F. Romanyuk, I. Novash, Y. Rumiantsev, P. Rogalski // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). – 2017. – Vol. 93, № 5. – С. 148–151.

13–А. Романюк, Ф. А. Аппаратно – программные испытательные комплексы для проверки работоспособности защит электроустановок / Ф. А. Романюк, И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Перспективные материалы и технологии : материалы международного симпозиума (20–26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь). В 2-х ч. Ч1 / под ред. В. В. Рубаника. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. С. 54–56.

Материалы конференций и тезисы докладов

14–А. Румянцев, Ю. В. Математическое моделирование трехфазной группы трансформаторов тока с учетом нелинейности сердечников / Ю. В. Румянцев, И. В. Новаш // Труды международной научно-

технической конференции «Компьютерное моделирование 2013». Санкт-Петербург, 2013. С. 159–162.

15–А. Novash, I. V. Wye-connected current transformers mathematical model implementation in Simulink – Simpowersystems environment // I. V. Novash, Y. V. Rumiantsev // Science. Innovation. Production. Proceedings of the 2nd Belarus-Korea forum, Minsk, November 19–20, 2013 / Belarusian National Technical University. – Minsk, 2013. – P. 63.

16–А. Румянцев, Ю. В. Моделирование трехфазной группы трансформаторов тока в системе Simulink / Ю. В. Румянцев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2013. С. 29.

17–А. Румянцев, Ю. В. Разработка в среде Simulink-SimPowerSystems учебной модели трехфазной группы трансформаторов тока / Ю. В. Румянцев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2014. С. 16.

18–А. Новаш, И. В. Влияние двигательной нагрузки на поведение релейной защиты при замыканиях в линиях электропередач / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Электроэнергетика. Энергия-2014 : материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 15–17 апр. 2014 г. : в 7 т. / Ивановский гос. энергетический ун-т имени В. И. Ленина ; сост. А. В. Макаров. – Иваново, 2014. – Т. 3, Ч. 1. – С. 167–170.

19–А. Новаш, И. В. Реализация упрощенной модели трехфазной группы трансформаторов тока в Matlab-Simulink-SimPowerSystems / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Труды международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2015». Санкт-Петербург, 2015. С. 65–69.

20–А. Novash, I. Current transformer simplified model in MATLAB-Simulink environment / I. Novash, Y. Rumiantsev // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementations : 9th International Conference, Zakopane, Poland, June 23–26 / Lublin University of Technology – Zakopane, 2015. – P. 27.

21–А. Новаш, И. В. Влияние удаленности места замыкания на релейную защиту линии электропередачи / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев, В. В. Зеленко // Электроэнергетика. Энергия-2015 : материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Иваново, 21–23 апр. 2015 г. : в 7 т. / Ивановский гос. энергетический ун-т имени В. И. Ленина ; сост. А. В. Макаров. – Иваново, 2015. – Т. 3. – С. 136–138.

22–А. Румянцев, Ю. В. Реализация упрощенной модели трехфазной группы трансформаторов тока в среде динамического моделирования / Ю. В. Румянцев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 6.

23–А. Румянцев, Ю. В. Быстродействующие цифровые фильтры в релейной защите / Ю. В. Румянцев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 12.

24–А. Новаш, И. В. Программный комплекс для расчета аварийных режимов трехобмоточного трехфазного трансформатора / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, Н. Н. Бобко, В. А. Устимович // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 13.

25–А. Новаш, И. В. Программный комплекс для исследования цифровых фильтров микропроцессорных релейных защит / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 25.

26–А. Румянцев, Ю. В. Аппаратно-программный испытательный комплекс для проверки работоспособности цифровых токовых защит / Ю. В. Румянцев // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 40.

Патенты

27–А. Измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока: пат. 20808 Респ. Беларусь : МПК (2006.01) Н 02Н 3/08 / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш : заявитель Белорус. нац. тех. ун-т. – № а 20150485; заявл. 07.10.2015 ; опубл. 28.02.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 1. – С. 129.

РЭЗІЮМЭ

Румянцаў Юрый Уладзіміравіч

**ПРАГРАМНА-АПАРATНАЕ ЗАБЕСПЯЧЭННЕ КОМПЛЕКСАЎ
ДЛЯ ФУНКЦЫЯНАЛЬНЫХ ВЫПРАБАВАННЯЎ
МІКРАПРАЦЭСАРНЫХ ТОКАВЫХ ЗАСЦЯРОГ**

Ключавыя словы: рэлейная засцярога, мікрапрацэсарная токавая засцярога, мікрапрацэсарная токавая дыферэнцыяльная засцярога, функцыянальнае выпрабаванне, насычэнне трансфарматара току, кідок намагнічваючага току, мадэляванне.

Мэта даследаванняў: распрацоўка праграмна-апаратнага забеспячэння комплексаў для функцыянальных выпрабаванняў мікрапрацэсарных токавых засцярог (МПТЗ) у розных рэжымах работы засцярагаемага абсталявання электраэнергетычнай сістэмы.

Метады даследаванняў: матэматычнае і кампутарнае мадэляванне, тэарэтычны аналіз, вылічальны эксперымент.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны з выкарыстаннем сістэмы мадэлявання Simulink выпрабавальны праграмны комплекс і выпрабавальны праграмна-апаратны комплекс для функцыянальных выпрабаванняў мікрапрацэсарных токавых засцярог. Распрацаваныя выпрабавальныя комплексы дазволілі выявіць істотнае запаволенне спрацоўвання як мікрапрацэсарнай токавай дыферэнцыяльнай засцярогі, так і МПТЗ ва ўмовах насычэння сталі магнітаправада трансфарматара току, якое не праяўляецца пры сінусоідных формах тэставых уздзеянняў. З выкарыстаннем Simulink распрацаваны вымяральны органа току МПТЗ, адмыслова прызначаны для функцыянавання ва ўмовах глыбокага насычэння сталі магнітаправада трансфараматра току і які забяспечвае павышэнне хуткадзейнасці МПТЗ у дадзеных умовах. На распрацаваны вымяральны орган току атрыманы патэнт Рэспублікі Беларусь на вынаходства.

Рэкамендацыі па практычным выкарыстанні вынікаў, галіна выкарыстання: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны на прадпрыемствах, якія займаюцца распрацоўкай, наладкай і эксплуатацыяй МПТЗ для павышэння іх тэхнічнай дасканаласці, што падцвярждаецца атрыманым актамі аб практычным выкарыстанні вынікаў даследавання ад ААТ «Белэлектрамонтажналадка». Атрыманыя вынікі выкарыстоўваюцца ў навучальным працэсе кафедры «Электрычныя станцыі» БНТУ з мэтай павышэння якасці падрыхтоўкі спецыялістаў.

РЕЗЮМЕ

Румянцев Юрий Владимирович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ
ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ**

Ключевые слова: релейная защита, микропроцессорная токовая защита, микропроцессорная токовая дифференциальная защита, функциональное испытание, насыщение трансформатора тока, бросок намагничивающего тока, моделирование.

Цель исследований: разработка программно-аппаратного обеспечения комплексов для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит (МПТЗ) в различных режимах работы защищаемого оборудования электроэнергетической системы.

Методы исследований: математическое и компьютерное моделирование, теоретический анализ, вычислительный эксперимент.

Полученные результаты и их новизна: разработаны с использованием системы моделирования Simulink испытательный программный комплекс и испытательный программно-аппаратный комплекс для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит. Разработанные испытательные комплексы позволили выявить существенное замедление срабатывания как микропроцессорной токовой дифференциальной защиты, так и МПТЗ в условиях насыщения трансформаторов тока, не проявляющееся при синусоидальных формах тестовых воздействий. С использованием Simulink разработан измерительный орган тока МПТЗ, специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформаторов тока, обеспечивающий повышение быстродействия МПТЗ в данных условиях. На разработанный измерительный орган тока получен патент Республики Беларусь на изобретение.

Рекомендации по практическому использованию результатов, область применения: полученные результаты могут быть использованы на предприятиях, занимающихся разработкой, наладкой и эксплуатацией микропроцессорных защит для повышения их технического совершенства, что подтверждается полученным актом о практическом использовании результатов исследования от ОАО «Белэлектромонтажналадка». Полученные результаты используются в учебном процессе кафедры «Электрические станции» БНТУ с целью повышения качества подготовки специалистов.

SUMMARY

Rumiantsev Yury

SOFTWARE-HARDWARE SUPPORT FOR THE MICROPROCESSOR-BASED CURRENT PROTECTION TEST SYSTEMS

Keywords: relay protection, microprocessor-based current protection, microprocessor-based current differential protection, functional testing, current transformer saturation, transformer inrush current, modelling.

Research goal: the development of the software-hardware support for the microprocessor-based current protection test systems in the different operation mode of the power system equipment under protection.

Research methods: mathematical and computer modelling; theoretical analysis, computational experiment.

Obtained results and novelty: with the help of Simulink the software-based and software and hardware-based systems for the microprocessor-based current protection testing were developed and implemented. Considered test systems are allowed to reveal a significant operation slowdown of the microprocessor-based overcurrent and differential protection during CT saturation which is not detected under sinusoidal test signals. The model of the current measuring element specially dedicated to operation during the CT severe saturation was developed and implemented in the Simulink environment and allowed to increase the protection operation speed in these conditions. On the considered measuring element a patent for an invention was taken out in the Republic of Belarus.

Recommendations on practical use of the results, the field of application: obtained results could be used in companies that deal with design, commissioning and maintenance of the microprocessor-based protection relays for their technical excellence increasing, as demonstrated by certificate of practical use of the research results by JSC «Belelektromontazhnaladka». Obtained results are used in the educational process of the Belarusian National Technical University at the «Power stations» department to improve the quality of specialist training.

Научное издание

РУМЯНЦЕВ
Юрий Владимирович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСОВ
ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 15.04.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,51. Уч.-изд. л. 1,18. Тираж 100. Заказ 225.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.