

*На правах рукописи*



Яблоков Андрей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ 110-220 КВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2016

Работа выполнена на кафедре «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Лебедев Владимир Дмитриевич**

Официальные оппоненты:

**Кужиков Станислав Лукьянович** – доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы»

**Арцишевский Ян Леонардович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация энергосистем»

Ведущая организация:

ОАО "Институт "ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ", г. Москва

Защита состоится 13 мая 2016 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: [uch\\_sovet@ispu.ru](mailto:uch_sovet@ispu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен [http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Yablokova\\_A.A..pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Yablokova_A.A..pdf)

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.064.01

доктор технических наук, доцент



Бушуев

Евгений Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Инновационное развитие электроэнергетики направлено на создание интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. Ключевым компонентом активно-адаптивной сети являются подстанции, основанные на интегрированных цифровых системах измерения параметров электроэнергии, управления высоковольтным оборудованием, релейной защиты и автоматики, которые получили название цифровых.

Управление оборудованием и режимами работы цифровой подстанции основано на первичных данных, поступающих от измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Инновационные разработки оптических трансформаторов тока пока не находят широкого применения по причине высокой стоимости и до конца нерешенных задач снижения погрешностей от внешних факторов, таких как температура, вибрация, давление и внешнее электромагнитное поле.

На цифровой подстанции могут применяться традиционные электромагнитные трансформаторы напряжения совместно с измерительным объединяющим устройством, выполняющим преобразование аналогового сигнала в цифровой и его передачу в соответствии с протоколом IEC 61850-9.2LE. Оцифровка сигнала в месте установки электромагнитного трансформатора напряжения решает следующие проблемы, связанные с его эксплуатацией:

- обеспечение метрологического класса точности при перегрузках по вторичным цепям;
- наличие электромагнитных наводок на вторичные цепи, вносящих дополнительные погрешности в измерения;
- вынос высокого потенциала при аварии с открытого распределительного устройства на щит управления по вторичным цепям.

Однако, это не решает проблем самих электромагнитных трансформаторов напряжения, ведет к удорожанию реконструкции и необходимости размещения дополнительного оборудования на территории открытого распределительного устройства. Так, большинство электромагнитных трансформаторов напряжения является маслонаполненными, а, соответственно, взрыво- и пожароопасными, они имеют недостаточный частотный диапазон измерений, что накладывает некоторое ограничение на развитие систем релейной защиты, автоматики и методов определения мест повреждений, и не позволяют выполнять измерения постоянного напряжения, что необходимо для систем высоковольтных линий постоянного тока. Кроме того, работа обычных электромагнитных трансформаторов напряжения во время переходных процессов может приводить к возникновению феррорезонансных явлений, которые, в свою очередь, приводят к неправильной работе электроэнергетического оборудования, выходу его из строя, развитию крупных аварий.

Меры по борьбе с феррорезонансными явлениями изложены в руководстве по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений (РД 153-34.3-35.125-99), где в качестве одной из основных мер по борьбе с феррорезонансными явлениями предлагается использование антирезонансных трансформаторов напряжения.

Для придания электромагнитным трансформаторам напряжения антирезонансных свойств изготовители либо стремятся выполнить снижение рабочей индукции магнитопровода, либо в качестве поглотителя энергии феррорезонансных колебаний используют толстолистовую конструкционную сталь совместно с электротехнической сталью. Указанные мероприятия ведут к увеличению массогабаритных показателей, но при этом остается вероятность возникновения феррорезонансных явлений.

Практический интерес представляет другое направление в создании антирезонансных трансформаторов напряжения, которое основано на применении в трансформаторах напряжения разомкнутых магнитных сердечников с использованием стержневых магнитопроводов. В этом случае кривая намагничивания магнитной системы трансформатора становится более пологой, что снижает возможность возникновения феррорезонанса, а конструкция самого трансформатора более компактной и удобной для организации внутренней высоковольтной изоляции. Основной сложностью в области исследования и создания трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами является отсутствие методик расчетов, так как расчет конструкции и режимов работы таких трансформаторов напряжения не может быть выполнен стандартными методами, применяемыми для трансформаторов с замкнутым магнитопроводом.

В связи с этим необходимо разработать математические модели трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, позволяющие выполнять исследования его электромагнитного поля в установившихся и переходных режимах, и на их основе методики расчета метрологических характеристик и антирезонансных свойств.

Также интерес представляют не подверженные резонансу емкостные и резистивные делители напряжения. Емкостные делители напряжения имеют такие недостатки как неравномерность амплитудно-частотной характеристики, препятствующая достоверному определению процентного содержания высших гармоник в кривой первичного напряжения, что необходимо для анализа качества электроэнергии, не всегда достаточная точность измерений, поскольку высоковольтные конденсаторы на основе различных диэлектриков характеризуются диэлектрическими потерями и имеют существенную зависимость электрической емкости от приложенного напряжения и температуры, невозможность работы на постоянном токе, наличие остаточных зарядов, что приводит к высокой погрешности измерения при их повторном включении в переходных режимах.

Резистивные делители лишены указанных недостатков емкостных делителей напряжения. Однако, в настоящее время разрабатываются, исследуются и выпускаются за рубежом резистивные делители напряжения, предназначенные для использования в лабораторных исследованиях или на закрытых распределительных устройствах и имеющие масляную или элегазовую изоляцию. Чтобы сделать резистивные делители напряжения взрыво- и пожаробезопасными необходимо использовать твердотельную изоляцию. Твердотельная изоляция создает дополнительное тепловое сопротивление, препятствующее отводу тепла от резисторов, что приводит к их нагреву, а, соответственно, возможности их повреждения и снижению точности. С целью уменьшения нагрева необходимо выбирать резисторы с более высоким сопротивлением, однако, это приводит к увеличению влияния токов электрического смещения и токов утечки через изоляцию на точность измерения напряжения.

В связи с этим необходимо разработать математические модели резистивного делителя напряжения, позволяющие выполнять исследования его тепловых и электромаг-

нитных полей в установившихся и переходных режимах, и на их основе выбирать оптимальные параметры резисторов.

Таким образом, актуальным является разработка трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, не вступающих в опасные феррорезонансные явления, и резистивных делителей напряжения в твердотельной изоляции, предназначенных для эксплуатации на открытых распределительных устройствах, обеспечивающих высокую точность измерений и методик их расчета.

**Степень разработанности проблемы.** Большой вклад в исследование феррорезонансных явлений сделали Дударев Л.Е., Зихерман М.Х., Кадомская К.П., Костромский А.А., Лаптев О.И., Лихачев Ф.М., Макаров А.В., Максимов В.М., Миронов Г.А., Панасюк Д.И., Поляков В.С., Рюденберг Р., Селиванов В.Н., Сирота И.М., Селиванов В.Н., Фишман В.С., Donel H., Debraux L., Kegel R., Heuck K., Janssens N., Soudack A.C. и т.д. Обобщение результатов исследований в данной области было выполнено международным коллективом исследователей в рамках рабочей группы C4.307 Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (CIGRE) в 2014 году.

Значительная часть работ в области разработки и исследования резистивных делителей напряжения отражена в публикациях зарубежных авторов в иностранных издательствах. Интерес зарубежных авторов к резистивным делителям напряжения объясняется активным развитием систем линий постоянного тока (HVDC), предназначенных для подключения возобновляемых источников электроэнергии и в которых необходимо измерение постоянного напряжения для управления преобразователями напряжения.

Вопросами применения измерительных преобразователей совместно с системами релейной защиты и автоматики занимались Арцишевский Я.Л., Дмитриев К.С., Кужевков С.Л., Казанский В.Е., Либерзон Э.М., Стогний Б.С., Циглер Г. и др.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование первичных преобразователей напряжения для цифровой подстанции, обеспечивающих высокую точность измерений и не вступающих в феррорезонансные явления, разработка методик выбора их параметров и методик анализа их характеристик в стационарных и переходных режимах.

**Основные задачи исследования.** Для достижения поставленной цели, в работе решаются следующие основные задачи:

1. Анализ принципов выполнения первичного преобразователя напряжения для цифровой подстанции.
2. Разработка математических моделей трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, предназначенных для исследования переходных процессов в нормальных и аварийных режимах.
3. Разработка методики расчета метрологических характеристик трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами.
4. Разработка методики анализа антирезонансных свойств трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, разработка и исследование на математических моделях конструкций трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, не вступающих в феррорезонанс и обеспечивающих высокий класс точности.
5. Разработка математических моделей резистивных делителей напряжения, предназначенных для исследования переходных процессов в нормальных и аварийных режимах.

6. Разработка методик анализа тепловых и электромагнитных полей резистивного делителя напряжения, на основе которых возможен расчет метрологических характеристик данного типа первичных преобразователей, разработка и исследование на математических моделях конструкций резистивных делителей напряжения, обеспечивающих высокий класс точности.

7. Сравнение результатов расчетов, полученных на разработанных математических моделях, с экспериментальными данными.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. Разработаны гибридные полевые и цепные математические модели трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами для исследования переходных процессов в нормальных и аварийных режимах.

2. Разработаны методики расчета метрологических характеристик и анализа антирезонансных свойств трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами.

3. Разработаны гибридные полевые и цепные математические модели высоковольтных резистивных делителей напряжения для исследования переходных процессов в нормальных и аварийных режимах.

4. Разработаны методики анализа тепловых и электромагнитных полей резистивных делителей напряжения, позволяющие определять их влияние на метрологические характеристики первичных преобразователей.

**Основные методы научных исследований.** Решение поставленных задач базировалось на использовании численных методов решения дифференциальных уравнений электромагнитных и тепловых полей в частных производных совместно с методами теории электрических цепей. Экспериментальные исследования выполнены на разработанном и созданном образце резистивного делителя напряжения.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается их совпадением с экспериментальными данными и совпадением результатов, полученных с применением различных методов расчета и программных комплексов.

**Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы».**

*Соответствие диссертации формуле специальности:* в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»: в диссертационной работе объектом исследования являются организация измерений токов и напряжений на цифровой подстанции, предметом исследования – математические модели и конструктивные особенности трансформаторов напряжения. Исследования феррорезонансных явлений, разработка методик их анализа направлены на обеспечение надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества.

*Соответствие диссертации области исследования специальности:* отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы», а именно:

- п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы» соответствуют разработанные автором с использованием современных программных средств гибридные полевые и цепные модели

трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами и резистивных делителей напряжения для исследования переходных процессов в электроэнергетической системе с данными типами трансформаторов в нормальных и аварийных режимах ее работы; методика и алгоритм совместного полевого и цепного моделирования трансформаторов напряжения в динамических режимах; методика расчета метрологических характеристик и анализа антирезонансных свойств трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами; методика анализа тепловых и электромагнитных полей резистивных делителей напряжения в стационарных и динамических режимах; результаты исследований феррорезонансных явлений с трансформаторами напряжения типа НКФ (трансформатор напряжения, каскадный, фарфоровая крышка) и трансформаторами напряжения с разомкнутыми магнитопроводами;

- п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствует методика и алгоритм совместного полевого и цепного моделирования трансформаторов напряжения в динамических режимах; методика расчета метрологических характеристик и анализа антирезонансных свойств трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами на основе гибридных полевых и цепных моделей; методика анализа тепловых и электромагнитных полей резистивных делителей на полевых распределенных моделях.

**Практическая значимость работы.** В результате выполненных исследований показано, что трансформаторы с разомкнутыми магнитопроводами вступают в опасный феррорезонанс в гораздо более узком диапазоне емкостей, шунтирующих контактные разрывы высоковольтных выключателей, и емкостей на землю. Разработана конструкция трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, не вступающая в феррорезонансные явления и обеспечивающая высокий класс точности. Разработаны способы, позволяющие компенсировать амплитудную и фазовую погрешности однофазных трансформаторов напряжения. Результаты данных исследований могут быть использованы заводами-производителями измерительных трансформаторов при проектировании и изготовлении трансформаторов с разомкнутыми магнитопроводами.

Разработанные методики анализа антирезонансных свойств трансформаторов напряжения на основе полевых и цепных моделей могут быть использованы для исследования феррорезонансных явлений в электроэнергетических системах.

Выполненные исследования на созданном экспериментальном образце и на математических моделях позволили разработать конструкции резистивных делителей напряжения, обеспечивающих высокий класс точности.

**Использование результатов работы.** Результаты выполненных автором исследований и разработок использованы при создании экспериментального образца цифрового трансформатора напряжения по соглашению №14.574.21.0072 о предоставлении субсидий от 27 июня 2014 года по теме «Разработка и исследование цифровых трансформаторов напряжения 110 кВ, основанных на фундаментальных физических законах с оптоэлектронным интерфейсом для учета электроэнергии в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью». Разработанные методики исследования антирезонансных свойств трансформаторов напряжения использованы при выполнении работ по договору оказания услуг по исследованию явлений феррорезонанса на ОРУ-220 кВ для нужд филиала «Ко-

стромская ГРЭС» АО «Интер РАО-Электрогенерация» № 8-КОС/005-0066-15 от 03 марта 2015 года.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Гибридные полевые и цепные математические модели трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами для исследования переходных процессов в нормальных и аварийных режимах.

2. Методики расчета метрологических характеристик и анализа антирезонансных свойств трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами.

3. Гибридные полевые и цепные математические модели высоковольтных резистивных делителей напряжения для исследования переходных процессов в нормальных и аварийных режимах.

4. Методики анализа тепловых и электромагнитных полей резистивных делителей напряжения, позволяющие определять метрологические характеристики первичных преобразователей.

5. Результаты разработки, исследования и анализа работы трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами в электроэнергетической системе.

6. Результаты разработки и исследования резистивного делителя напряжения.

**Личный вклад соискателя.** Постановка задач, разработка теоретических и методических положений, математических методов, проведение исследований, анализ и обобщение результатов, в том числе и в качестве изобретений. Обсуждение методов решения поставленных задач проводилось с научным руководителем.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XV и XIX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА» (г. Москва, 2009, 2013); региональной научно – технической конференции студентов и аспирантов «ЭНЕРГИЯ» (г. Иваново, 2009, 2010, 2014, 2015 гг.); III и IV международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012; г. Новочеркасск, 2013); международной научно-технической конференции «СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ» (XVII Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 2013 г.); международной конференции «Инновационные решения в области качества изготовления и надежности эксплуатации измерительных трансформаторов тока и напряжения» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Надежность либерализованных систем энергетики» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); International conference on computer technologies in physical and engineering applications (г. Санкт-Петербург, 2014 г.) и др.

Диссертационная работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.574.21.0072 о предоставлении субсидий от 27 июня 2014 года по теме «Разработка и исследование цифровых трансформаторов напряжения 110 кВ, основанных на фундаментальных физических законах с оптоэлектронным интерфейсом для учета электроэнергии в интеллектуальной электроэнергетической системе с активно-адаптивной сетью», уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0072).

**Опубликованные работы.** Результаты исследований и разработок, проведенных автором, отражены в 26 опубликованных печатных работах, в том числе из них

1 монография, 2 работы – в журнале, рекомендованном ВАК РФ, и 4 работы – в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS. Получено 3 патента на полезные модели и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

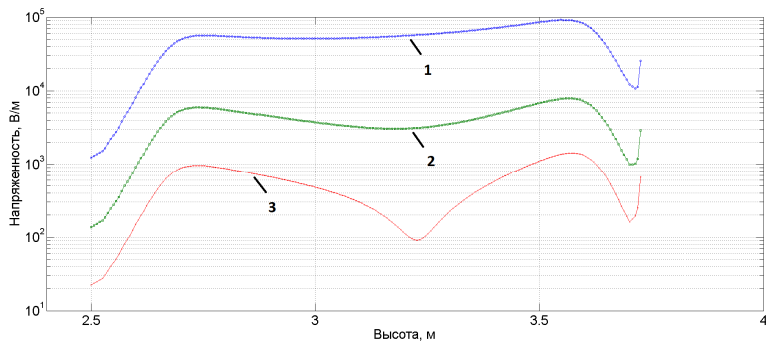
**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 93 наименований и 11 приложений. Общий объем диссертации составляет 237 страниц, из них основной текст – 173 страницы, список литературы – 12 страниц, приложения – 52 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, дается общая характеристика работы.

**В первой главе** выполнен анализ вариантов структуры цифровой подстанции и сформулированы требования к первичным преобразователям напряжения. Проанализированы конструкции и принципы действия оптических, индуктивных, емкостных и резистивных преобразователей напряжения в соответствии со сформулированными требованиями.

Используя аналитические методы и разработанные автором полевые модели, выполнены исследовательские расчеты, позволяющие оценить влияние высоковольтных токоведущих частей и заземленных элементов металлических конструкций электротехнического оборудования на чувствительные элементы, измеряющих напряженность электрического поля, например, в оптических трансформаторах напряжения. Анализ осуществлялся для типового расположения оборудования на открытом распределительном устройстве подстанции. Результаты расчетов показали, что наибольшее влияние на погрешность измерений оказывают токопроводы ошиновки, находящиеся под напряжением соседних фаз. Уровень наводок от них может достигать 12 % от величины полезного сигнала (рис. 1). Выполнен анализ мер, позволяющих исключить влияние соседних фаз на погрешность измерений оптических преобразователей напряжения и отмечена трудность их технической реализации.



1 – трансформатор фазы А; 2 – трансформатор фазы В; 3 – трансформатор фазы С

Рис. 1 – Распределение напряженности электрического поля вдоль осей трансформаторов напряжения ( $U_{\text{фазыА}}=U_{\text{ном.}}$ ,  $U_{\text{фазыВ}}=0$ ,  $U_{\text{фазыС}}=0$ )

В результате выполненных исследований сделан вывод об актуальности разработки трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами, не подверженным опасным феррорезонансным явлениям, и резистивных делителей напряжения в твердотельной изоляции, предназначенных для эксплуатации на открытых распределительных устройствах, обеспечивающих высокую точность измерений. Также актуальна разработка моделей и методик расчета указанных первичных преобразователей.

**Вторая глава** посвящена разработке конструкций, математических моделей, методик расчета и исследованию трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами.

В работе был разработан метод исследования электромагнитных переходных процессов в трансформаторах напряжения на основе полевых (распределенных) математических моделей. Для исследования переходных процессов в электроэнергетических системах в нормальных и аварийных режимах были разработаны гибридные полевые и цепные математические модели трансформаторов напряжения с разомкнутым магнитопроводом.

Полевая часть математической модели трансформатора напряжения с разомкнутым магнитопроводом, предназначенная для определения параметров данного типа трансформаторов (например, индуктивности), основана на решении уравнения магнитного поля:

- в геометрическом пространстве

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}, \quad (1)$$

- в пространственно-частотной области

$$(j\omega\sigma\vec{A}) + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}, \quad (2)$$

где  $\nabla$  – дифференциальный оператор Гамильтона;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал, Вб/м;  $\vec{J}$  – вектор плотности сторонних токов, А/м<sup>2</sup>;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота, рад/с;  $\sigma$  – электропроводность (проводника обмотки), См.

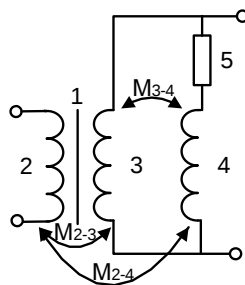
Уравнение (1) использовалось для определения степени насыщения магнитной системы трансформатора напряжения для предварительного анализа феррорезонансных явлений, расчеты по уравнению (2) использовались для анализа метрологических свойств в линейном режиме.

Для расчета токов и напряжений обмотки полевых моделей каскадов трансформатора соединяются в электрическую цепь. Ток, протекающий в обмотках, рассчитывается на основе уравнений, описывающих электрическую цепь трансформатора. Напряжения на обмотках определялись по результатам расчета поля по формуле:

$$U = I \cdot R - \frac{n}{S} \iint_{S_l} \vec{E} d\vec{l} dS, \quad (3)$$

где  $n$  – количество витков обмотки;  $\vec{E}$  – электромагнитная компонента напряженности электрического поля, В/м;  $S$  – площадь поперечного сечения обмотки, м<sup>2</sup>;  $I$  – ток, протекающий через обмотку, А;  $R$  – активное сопротивление обмотки, Ом.

Трансформаторы напряжения с разомкнутыми магнитопроводами имеют выраженную зависимость амплитудной и фазовой погрешностей от размещения обмоток на магнитопроводе друг относительно друга. Для компенсации данных погрешностей был разработан и проверен метод их компенсации (рис. 2), заключающийся в разделении вторичной обмотки на две с последовательно подключенным резистором в одной из них. Компенсация амплитудной и фазовой погрешностей выполняется путем одновременного изменения числа витков в разделенных вторичных обмотках и сопротивления резистора.



- 1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка;  
3, 4 – первая и вторая вторичные обмотки;  
5 – резистор

Рис. 2 – Схема замещения трансформатора напряжения, иллюстрирующая метод компенсации амплитудной и фазовой погрешностей

Определение погрешности напряжения по величине и углу трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами выполняется на основе совместного полевого и цепного расчета.

Для исследования переходных процессов в электроэнергетической системе с данным типом трансформаторов в нормальных и аварийных режимах её работы был разработан алгоритм на языке программирования MATLAB, позволяющий подключать к внешним электрическим цепям, собранным в программном пакете Simulink, полевые модели трансформатора, основанные на решении уравнения:

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu^{-1} \nabla \times \vec{A}) = \vec{\delta}, \quad (4)$$

где  $t$  – время, с;  $\mu_0$ ,  $\mu_r$  – абсолютная и относительная магнитные проницаемости соответственно;  $\vec{\delta}$  – вектор плотности сторонних токов, А/м<sup>2</sup>.

**Третья глава** посвящена исследованию антирезонансных свойств трансформатора напряжения с разомкнутым магнитопроводом.

Исследование выполнялось на упрощенной схеме электрической цепи, моделирующей условия испытаний на подстанции при отключении секции шин многоразрывными выключателями (рис. 3).

Расчет феррорезонансной схемы на основе совместного полевого и цепного расчета позволяет наиболее полно исследовать процессы в трансформаторе напряжения. Однако, при изучении феррорезонансных

явлений основным вопросом является определение наличия феррорезонанса при различных значениях емкостей, шунтирующих контактные разрывы выключателей, и емкостей ошиновок.

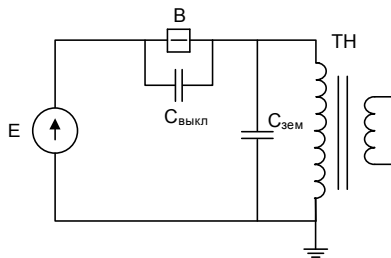


Рис. 3 – Схема замещения для исследования феррорезонансных процессов

Проведение серии расчетов с полевой моделью занимает значительное время. В связи с этим, исследование антирезонансных свойств трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами выполнено на основе решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} i &= i_{зем} + i_{выкл}, \\ e &= U_{C_{выкл}} + i \cdot R + \frac{d\psi}{dt}, \\ e &= U_{C_{выкл}} + U_{C_{зем}}, \\ i_{выкл} &= C_{выкл} \frac{dU_{C_{выкл}}}{dt}, \\ i_{зем} &= C_{зем} \frac{dU_{C_{зем}}}{dt}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $i_{зем}$  – ток, протекающий через емкость на землю, А;  $i_{выкл}$  – ток, протекающий через высоковольтный выключатель, А;  $U_{C_{выкл}}$  – напряжение на высоковольтном выключателе, В;  $U_{C_{зем}}$  – напряжение на емкости на землю, В;  $C_{выкл}$  – емкость, шунтирующая контактные разрывы высоковольтных выключателей, Ф;  $C_{зем}$  – емкость электрооборудования относительно земли, Ф.

При этом основная кривая намагничивания вычисляется на полевой модели при вариации величины тока по формуле:

$$\psi = \sum_{i=1}^m \left( \frac{n}{S} \int_V \bar{A} dV \right). \quad (6)$$

Оценка достоверности моделей была проведена путем сопоставления данных математических экспериментов для трансформатора НКФ-220 с данными моделирования, полученными в апробированной программе FERES 1.0, и экспериментальными данными, полученными при возникновении реального феррорезонансного явления.

Исследования разработанных конструкций (рис. 4) показали, что трансформаторы напряжения с разомкнутыми магнитопроводами вступают в опасный феррорезонанс с гораздо меньшим диапазоном емкостей выключателей и емкостей электрооборудования на землю, и амплитуда тока при феррорезонансе у таких трансформаторов ниже, чем у трансформаторов с замкнутыми магнитопроводами. Одна из разработанных конструкций вообще не вступает в опасный феррорезонанс. Использование разомкнутой магнитной системы позволяет получить трансформатор с необходимым классом точности при невысокой номинальной мощности.

С целью более полного исследования феррорезонансных процессов была разработана математическая модель ОРУ-220 кВ в программном пакете Simulink. Отличительными особенностями разработанной модели являются трехфазное исполнение, учет междофазных емкостей одной системы шин и междофазных емкостей разных систем шин (рис. 5).

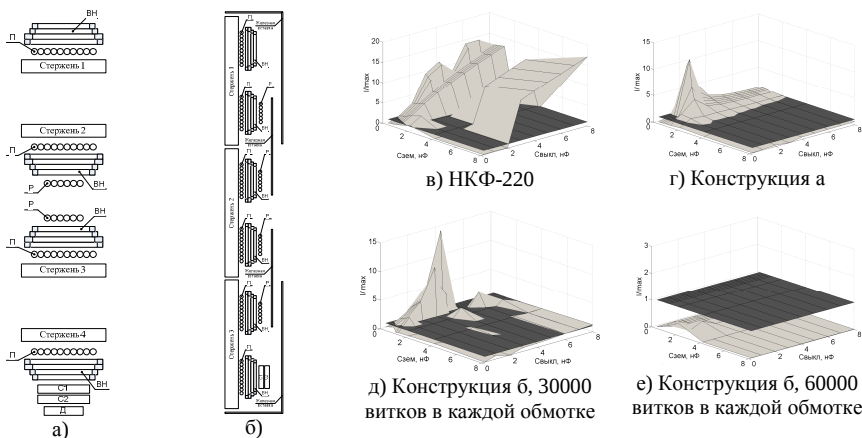


Рис. 4 – Конструкции трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами и области существования феррорезонанса при  $1.15U_{ном}$

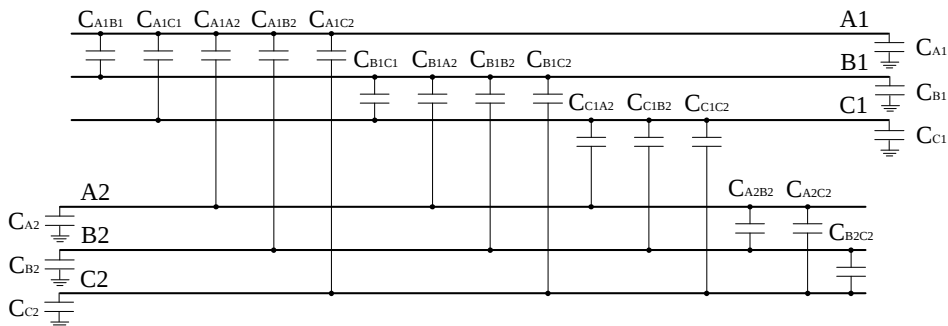


Рис. 5 – Схема замещения первой и второй систем шин ОРУ

Результаты выполненных исследований на разработанной модели в описанных выше режимах позволили сделать следующие выводы:

1. Междофазные емкости одной системы шин оказывают влияние в основном когда феррорезонанс зависит от угла коммутации выключателя. При феррорезонансе на одной из фаз при учете междофазных емкостей он может развиваться и на остальных фазах системы шин.

2. Учет междофазных емкостей разных систем шин приводит к значительному расширению области опасного феррорезонанса. Это объясняется тем, что система шин, на которой не произошло короткого замыкания, остается в работе и через междофазные емкости между системами шин «подпитывает» феррорезонанс на другой системе шин.

3. Перенапряжение на системе шин значительно расширяет область опасного феррорезонанса. Феррорезонанс в этом случае может наблюдаться даже при невысоких значениях емкостей выключателей, находящихся в диапазоне 25-50 пФ. Данные значения емкостей могут быть между высоковольтными вводами элегазовых

выключателей. Таким образом, феррорезонанс возможен и при использовании элегазовых выключателей. Исключить феррорезонанс в этом случае возможно за счет увеличения емкости на землю путем установки конденсаторов на системе шин.

4. Феррорезонанс не происходит ни в одном из исследуемых режимов при использовании трансформатора напряжения с вертикальным расположением разомкнутых магнитопроводов и количеством витков в каждой обмотке равным 60000.

Таким образом, трансформатор напряжения с разомкнутыми магнитопроводами отвечает требованиям, сформулированным в первой главе к измерительным трансформаторам: он устойчив к феррорезонансным явлениям, имеет высокую точность измерения и может применяться как с объединяющими устройствами, так и с микропроцессорными терминалами релейной защиты и автоматики.

**Четвертая глава** посвящена разработке математических моделей, методик анализа и исследованию тепловых полей резистивного делителя напряжения.

Сформулированы и обоснованы основные целевые функции, к которым необходимо стремиться при разработке резистивного делителя напряжения:

$$TKC \rightarrow \min; \Delta T \leq 30^\circ C; \lambda_{герм} \rightarrow \max; I_C^k \rightarrow \min; U_{выд} \geq U_{гроз.имп.} \quad (7)$$

где ТКС – температурный коэффициент сопротивления резисторов;  $\Delta T$  – нагрев резисторов относительно температуры окружающей среды;  $\lambda_{герм}$  – теплопроводность герметика;  $I_C$  – емкостный ток;  $U_{выд.}$  – выдерживаемое резистивным делителем напряжение;  $U_{гроз. имп.}$  – испытательное напряжение грозового импульса для соответствующего класса напряжения трансформатора согласно ГОСТ 1516.3-96.

С целью повышения точности измерения необходимо обеспечить максимальное отношение тока, протекающего в резистивных элементах, к токам электрического смещения в диэлектрике опорного изолятора и окружающего пространства. Увеличение указанного отношения токов возможно путем уменьшения сопротивления резистивных элементов, что приводит к повышению тепловыделения на них и к возможному их перегреву.

С целью поиска разумного компромисса между обеспечением точности измерения, с одной стороны, и предотвращением перегрева резистивных элементов, с другой, была разработана математическая модель, основанная на решении уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-a \nabla T) = \frac{q_v}{c \cdot \rho}, \quad (8)$$

с граничным условием третьего рода:

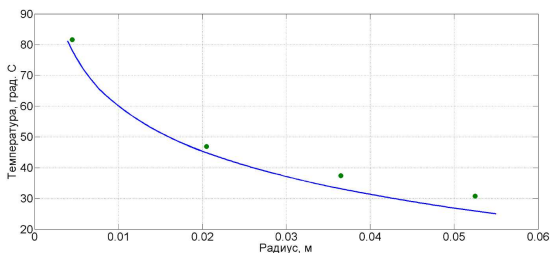
$$q_s = \alpha (T_{cm} - T_g), \quad (9)$$

где  $T$  – температура,  $^\circ C$ ;  $t$  – время процесса, с;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $q_v$  – тепловой источник, связанный с выделением тепловой энергии на резисторах,  $Вт/m^2$ ;  $c$  – теплоемкость среды,  $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$ ;  $\rho$  – плотность среды,  $кг/m^3$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, индексы « $cm$ » и « $g$ » относятся к температуре стенки и воздуха, соответственно,  $Вт/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $q_s$  – тепловой поток через внешнюю поверхность изолятора,  $Вт/m^2$ .

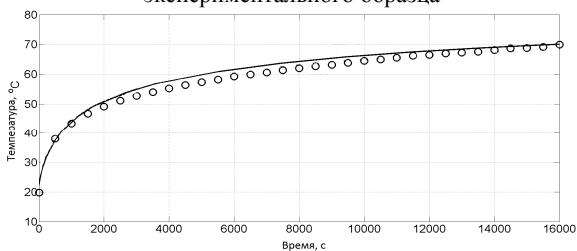
Разработанный экспериментальный образец (рис. 5), содержащий два делителя напряжения (осевой и спиральный) в твердотельной изоляции, позволил верифицировать разработанную математическую модель в статическом и динамическом режимах (рис. 6).



Рис. 5 – Экспериментальный образец резистивного делителя напряжения



а) Распределение температур по сечению в центре экспериментального образца



б) Зависимость максимальной температуры на поверхности резистора от времени

Рис. 6 – Сравнение результатов расчета на модели (линия) с результатами экспериментальных исследований (круги)

На верифицированной математической модели были выполнены исследования по определению параметров и оптимального размещения резисторов, а также их перегрева и возможности повреждения при наличии перенапряжений. В соответствии с ГОСТ 1983-2001 трансформатор напряжения должен неограниченно долго выдерживать  $1.2 U_n$ . Результаты исследований (рис. 7) показывают, что даже при  $1.9 U_n$  резисторы нагреваются до температуры, которую они способны долговременно выдерживать. Размещение резисторов у внутренней стенки изолятора по спирали позволяет значительно сократить их нагрев по сравнению с размещением резисторов на оси изолятора.

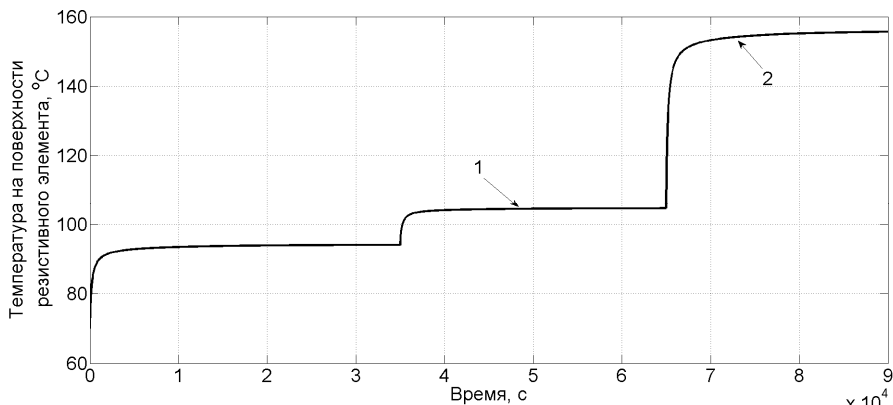


Рис. 7 – Зависимость максимальной температуры на поверхности резистора от времени при  $1.2 U_n$  (1) и  $1.9 U_n$  (2)

**Пятая глава** посвящена разработке математических моделей, методик анализа и исследованию электромагнитных полей резистивного делителя напряжения.

Разработано две методики расчета токов электрического смещения и токов утечки изолятора на основе исследования электромагнитных полей на математических моделях.

Методика последовательных вычислений с предварительным расчетом частичных емкостей основана на решении уравнения Лапласа, записанного для электрического поля:

$$-\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla \varphi = 0, \quad (10)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;  $\varphi$  – электрический потенциал, В. На границах окружающего первичный преобразователь пространства задается граничное условие Неймана.

Математическая модель, основанная на решении уравнения (10), совместно со второй группой формул Максвелла позволяют определить собственные и частичные емкости резисторов делителя напряжения. Значения собственных емкостей резисторов, рассчитанные по данной методике, совпали со значениями, рассчитанными по аналитическим формулам (расхождение не превысило 1,5 %).

Рассчитанные значения емкостей использовались для создания цепной модели резистивного делителя напряжения, расчет которой позволяет определить величину токов электрического смещения и токов утечки в изоляции резистивного делителя и их влияние на погрешность измерения напряжения.

Методика параллельных вычислений через наведенные токи подразумевает итерационное решение гибридной цепной и полевой моделей резистивного делителя напряжения. Токи электрического смещения и токи утечки предлагается учесть сразу при расчете, используя квазистатическую модель резистивного делителя напряжения, основанную на решении уравнения:

$$-\nabla \cdot ((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r) \nabla \varphi) = 0, \quad (11)$$

где  $\sigma$  – электрическая проводимость, См/м;  $\varphi$  – потенциал, В.

Математическая модель, в основе которой лежит решение уравнения (11), дополняется уравнениями электрической цепи, записанными в соответствие со схемой замещения резистивного делителя.

Методика параллельных вычислений через наведенные токи при большом количестве резисторов является менее трудоемкой и более быстрой, наилучшим образом подходит для выполнения оптимизационных расчетов. Методика последовательных вычислений с предварительным расчетом частичных емкостей является более универсальной и позволяет исследовать динамические процессы.

Выполненные исследования резистивного делителя напряжения 110 кВ показали, что при равномерном распределении резисторов емкостные токи оказывают значительное влияние на погрешность измерения (фазовая погрешность 21,2°). Были выполнены исследования методов уменьшения емкостных токов:

- использование колец в верхней части изолятора резистивного делителя напряжения, находящихся под потенциалом высоковольтного провода;

- расположение резисторов по эквипотенциалам электростатического поля (верх или центр резисторов на эквипотенциальных линиях, резистор по центру между эквипотенциальными линиями);
- использование двух резистивных делителей напротив друг друга, один из которых является экранирующим.

Использование данных мер позволяет значительно сократить фазовую погрешность до  $0,2^\circ$ .

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработанные математические модели трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами позволяют выполнять исследования переходных процессов в электроэнергетической системе с данным типом первичных преобразователей в нормальных и аварийных режимах её работы.

2. Разработанные методики расчета трансформаторов напряжения с разомкнутыми магнитопроводами позволяют определять метрологические характеристики и антирезонансные свойства данного вида трансформаторов. Данные методики могут быть применены не только к разнообразным конструкциям трансформаторов с разомкнутыми магнитопроводами, но и к традиционным трансформаторам с замкнутыми магнитопроводами.

3. Использование разомкнутой магнитной системы позволяет получить трансформатор с необходимым классом точности при невысокой номинальной мощности. Низкая номинальная мощность накладывает ограничение на традиционное использование таких трансформаторов напряжения. С другой стороны, если трансформатор напряжения с разомкнутым магнитопроводом является составной частью цифрового трансформатора и имеет в качестве нагрузки только свою, практически не потребляющую энергии нагрузку – электронный преобразователь (к тому же с заранее согласованным входным сопротивлением), то данная проблема отпадает.

4. Трансформаторы напряжения с разомкнутыми магнитопроводами вступают в опасный феррорезонанс с гораздо меньшим диапазоном емкостей выключателей и емкостей электрооборудования на землю, и амплитуда тока при феррорезонансе у таких трансформаторов ниже, чем у трансформаторов с замкнутыми магнитопроводами. Одна из разработанных конструкций вообще не вступает в опасный феррорезонанс.

5. Разработанные математические модели тепловых и электромагнитных полей резистивных делителей напряжения позволяют выполнять исследования переходных процессов в электроэнергетической системе с данным типом первичных преобразователей в нормальных и аварийных режимах её работы.

6. Основное влияние на точность измерения напряжения резистивным делителем оказывают токи электрического смещения и токи утечки в его изоляции. Для уменьшения их влияния на точность измерения предложено выбирать минимально допустимое сопротивление резисторов на основе анализа тепловых полей резистивных делителей по разработанной методике. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что размещение резисторов по спирали позволяет снизить их нагрев.

7. Выполненные исследования резистивных делителей показывают, что для обеспечения высокой точности измерений необходимо уменьшать не только влия-

ние токов электрического смещения, но и их величину. В работе предложены мероприятия, позволяющие значительно уменьшить емкостные токи.

8. Выполненные исследования применения резистивных делителей напряжения в условиях ОРУ на математических моделях показали, что токоведущие элементы соседних фаз не оказывают влияния на результаты измерения, приводящего к снижению класса точности 0,2.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Исследование антирезонансного трансформатора напряжения 220 кВ на основе математического моделирования. Сравнительный анализ конструкций // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета / ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2011. – Выпуск №5. – С. 25-28.

2. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Исследование динамических процессов в измерительных трансформаторах тока и напряжения // Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета / ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2013. – Выпуск №6. – С. 98-104.

### Научные статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS

3. Lebedev V.D., Makarov A.V., **Yablokov A.A.** Modeling of ferroresonance phenomena in software products Simulink // Proceedings of International conference on computer technologies in physical and engineering applications (ICCTPEA). – Saint-Petersburg, Russia, June 30 - July 04, 2014. – pp. 97-98.

4. Lebedev V., Shuin V., **Yablokov A.**, Filatova G. Modeling of measuring current and voltage transformers in dynamic modes // Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – Tomsk, Russia, 16-18 Oct. 2014. – pp. 1-7.

5. Lebedev V.D., **Yablokov A.A.** Research of the metrological characteristics and voltage transformer with open core antiresonance properties // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, Switzerland, 2015. – №698. – pp. 160-167.

6. Lebedev V.D., **Yablokov A.A.** Analysing the thermal state of voltage transformer based on resistive voltage divider // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). – IOP Publishing, 2015. – №93. – p. 1-6.

### Публикации в других изданиях

7. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Проворов А.С., Готовкина Е.Е. Автоматическое моделирование электромагнитных устройств в программе MATLAB и приложениях // Пятнадцатая Междунар. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика// Тез. докл. В 3-х т. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – т.1. – С. 102-104.

8. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Проворов А.С., Козак Е.В., Готовкина Е.Е. Моделирование трансформатора напряжения в программе MATLAB и приложениях. Тезисы докладов региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия 2009» // Электроэнергетика: ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет. – Иваново, 2009. – Том 3. – С. 102 – 104.

9. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Исследование электромагнитных процессов на основе совместного полевого и цепного расчетов // ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Материалы региональной научно – технической конференции студентов и аспирантов. – ГОУ ВПО “Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина”. Иваново, 2010. – Т.3. – С.136-138.

10. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Определение параметров элементов антирезонансного трансформатора напряжения на основе компьютерного полевого моделирования (методы моделирования и исследования вычислительных погрешностей) // Вестник научно-промышленного общества – М: Изд-во «АЛЕВ-В», 2010. – Вып. 14. – С.51-60.

11. **Яблоков А.А.** Разработка антирезонансного измерительного трансформатора 220 кВ с разомкнутым магнитопроводом // Всероссийский конкурс научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 238-241.

12. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Антирезонансный измерительный трансформатор 220 кВ с разомкнутым магнитопроводом для цифрового трансформатора // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научно-технической конференции: сборник статей в 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т.2. – С. 226-230.

13. Лебедев В.Д., Яблоков А.А. Оптимизация конструкции антирезонансного измерительного трансформатора напряжения 220 кВ с разомкнутым магнитопроводом // РАДИО-ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Девятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. В 4-х т.– М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – Т. 4. – С. 332.

14. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics: Учеб. пособие / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 328 с.

15. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** К вопросу создания модели измерительного трансформатора напряжения с разомкнутым магнитопроводом // Материалы Международной научно-технической конференции «СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 29-31 мая 2013. – Т. 1 «Электроэнергетика». – С. 170 – 172.

16. **Яблоков А.А.**, Можжухина В.В. Разработка трёхфазного комбинированного цифрового микропроцессорного трансформатора тока и напряжения 10 кВ на базовых физических принципах по стандарту IEC 61850 для «цифровой» автоматизированной подстанции // Конкурсе молодежных научно-исследовательских работ: материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 45 – 47.

17. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Нестерихин А.Е., Полушкин В.А. Измерительные пояса Роговского для цифрового трансформатора тока // Научные труды IV Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, 14-18 октября 2013. – Т. 2. – С.116-119.

18. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Анализ антирезонансных свойств измерительных трансформаторов напряжения на основе интегрированного математического моделирования // Информационно-аналитический журнал «Энергоэксперт» / Издательский дом «Вся электротехника». – Москва, 2013. - № 6 (41). – С. 28-31.

19. Лебедев В.Д., Макаров А.В., **Яблоков А.А.** Исследование феррорезонансных явлений в измерительных трансформаторах напряжения // Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: Материалы конференции. В 7 т. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014. – Т. 3, Ч. 1 – С. 219-222.

20. Лебедев В.Д., Макаров А.В., **Яблоков А.А.** Исследование феррорезонансных явлений в схемах с измерительными трансформаторами напряжения // Вестник Российского национального комитета СИГРЭ. Выпуск 4. Материалы Молодежной секции РНК СИГРЭ. Сборник конкурсных докладов «Энергия-2014» по электроэнергетической и электротехнической тематикам по направлениям исследований СИГРЭ. Т. 1. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014. – С. 77-80.

21. Lebedev V., Makarov A., **Yablokov A.**, Filatova G. Modeling of magnetization reversal process in magnetic circuit of measuring transformers // Proceedings of Power and Energy Student Summit 2015. – Dortmund, Germany, 2015. – S05.3.

22. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Нечаев Е.В. Исследование цифрового трансформатора напряжения // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспиран-

тов и молодых ученых «Энергия-2015»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 3. – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. – С. 121-122.

23. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Лебедев Д.А., Наумов А.В. Исследование электромагнитной совместимости оптических и цифровых трансформаторов тока и напряжения // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 27-29 мая 2015. – Т. III «Электротехника». – С. 471 – 475.

24. Слышалов В.К., Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Меркулов А.Ю. Моделирование делителя напряжения цифрового измерительного трансформатора // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 27-29 мая 2015. – Т. III «Электротехника». – С. 475 – 479.

25. Lebedev V.D., **Yablokov A.A.** Analysing the impact of electrical displacement and leakage currents in transformer insulation on voltage measurement accuracy // Applied Mechanics and Materials. – Trans Tech Publications, Switzerland, 2015. – №792. – pp. 220-229.

26. Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.**, Федотов С.П. Разработка и исследование трансформатора напряжения с разомкнутыми магнитопроводами / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 148 с.

#### **Результаты интеллектуальной деятельности**

1. Патент на полезную модель №133346 «Каскадный антирезонансный трансформатор напряжения». Авторы: Лебедев В.Д., Федотов С.П., **Яблоков А.А.** Приоритет полезной модели: 23 апреля 2013 года. Срок действия: до 23 апреля 2023 года. Территория: Российская Федерация.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013611796 «Расчет параметров катушек высоковольтных трансформаторов». Авторы: Лебедев В.Д., **Яблоков А.А.** Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 5 февраля 2013 года.

3. Патент на полезную модель №146922 «Каскадный антирезонансный трансформатор напряжения». Авторы: Лебедев В.Д., Федотов С.П., **Яблоков А.А.** Приоритет полезной модели: 27 мая 2014 года. Срок действия: до 27 мая 2024 года. Территория: Российская Федерация.

4. Патент на полезную модель №158733 «Каскадный антирезонансный трансформатор напряжения». Авторы: Лебедев В.Д., Федотов С.П., **Яблоков А.А.** Приоритет полезной модели: 15 июня 2015 года. Срок действия: до 15 июня 2025 года. Территория: Российская Федерация.

ЯБЛОКОВ Андрей Анатольевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ 110-220 КВ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 10.03.2016 г. Формат 60х84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 134

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ