

*На правах рукописи*



**СНИТЬКО Ирина Сергеевна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСШИРЕННОГО  
ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА В САПР СИЛОВЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННЫХ  
МОДЕЛЕЙ**

Специальность

05.13.12. – Системы автоматизации проектирования  
(электротехника, энергетика)

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

Иваново – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ).

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Тихонов Андрей Ильич**

**Официальные оппоненты:**

**Ковалев Сергей Протасович**, доктор физико-математических наук, ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук», ведущий научный сотрудник;

**Кобелев Андрей Степанович**, кандидат технических наук, ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром», начальник расчетно-теоретического сектора.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится «10» июня 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен [http://ispu.ru/files/Dissertaciya\\_Snitko.pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Snitko.pdf).

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.064.02



Копылова  
Лариса Геннадьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Тенденции развития энергетической отрасли диктуют необходимость расчета, анализа и прогнозирования режимов работы участков электрических сетей (ЭС) в установившихся и переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимах. Т.к. основным оборудованием распределительных сетей являются силовые трансформаторы (СТ), их параметры во многом определяют режимы работы всей сети. *Поэтому актуальной является проблема точного расчета параметров трансформатора при его проектировании и определения влияния этих параметров на работу сети при его эксплуатации.*

Существенное влияние на работу сети оказывает такой параметр трансформатора, как напряжение короткого замыкания (КЗ), который во многом определяется характером магнитных полей вне магнитопровода. Традиционные схемы замещения трансформатора, не учитывающие взаимного влияния полей вне магнитной системы, неточно описывают его работу в переходных несимметричных и аварийных режимах. Наибольшие проблемы возникают при моделировании многообмоточных трансформаторов. Все это отражается на точности моделировании ЭС в наиболее ответственных с точки зрения надежности ее эксплуатации режимах работы. *Поэтому актуальной является проблема создания имитационных моделей, адекватно описывающих работу трансформатора в различных режимах работы.* Данная проблема находится в русле современных тенденций цифровизации экономики, в частности, направления, связанного с созданием цифровых двойников технических устройств.

Методики расчета параметров трансформаторов в системах автоматизированного проектирования достигли высокого уровня точности еще в Советском Союзе благодаря работам П.М. Тихомирова, Г.С. Цыкина, Л.В. Лейтеса, А.И. Лурье, Я.Л. Фишлера, Р.С. Бабиса, П.Л. Калантарова, Ю.Б. Бородулина. Большой вклад в теорию внесли экспериментальные и статистические исследования, выполненные Всесоюзным институтом трансформаторостроения (ВИТ), Всесоюзным электротехническим институтом им. В.И. Ленина (ВЭИ). Значительную исследовательскую работу провели специалисты крупных заводов, таких как «Электрозавод» (г.Москва) (МЭЗ), «Запорожтрансформатор» (г. Харьков), «Минский электротехнический завод им. В.И. Козлова» (г.Минск), ПО «Уралэлектротряжмаш» (г. Екатеринбург). Данная диссертация находится в русле Ивановской школы САПР, представленной в трудах Ю.Б. Бородулина, Ю.Я. Щелькалова, Ю.Б. Казакова, Г.В. Попова, В.Н. Нуждина, А.Р. Колганова, А.И. Тихонова, В.А. Мартынова.

Для целей точного расчета параметров трансформатора в настоящее время используют системы инженерного анализа, связанные с исследованием моделей магнитного поля.

**Работа выполнялась** в Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина.

**Цель работы** заключается в расширении функционала подсистем поверочного расчета в САПР СТ за счет уточненных имитационных моделей, позволяющих уже на стадии проектирования анализировать особенности характерных режимов работы данных устройств в составе электрических сетей.

#### **Задачи, решаемые в диссертации:**

1. Разработать методику определения параметров КЗ СТ на стадии проектирования с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы.

2. Создать имитационную модель, позволяющую анализировать переходные, в том числе и аварийные режимы СТ, а также учесть взаимное влияние полей вне магнитной системы.

3. Сформулировать методику расчета установившихся симметричных и несимметричных режимов работы участков ЭС, содержащих СТ, с учетом нелинейности характеристик СТ.

4. Разработать подсистему расширенного поверочного расчета в составе САПР СТ, которая может использоваться как при проектировании СТ, так и при исследовании влияния параметров СТ на работу ЭС.

5. Апробировать разработанные модели режимов работы СТ в составе ЭС.

**Соответствие паспорту специальности.** Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности 05.13.12: «...специальность, занимающаяся проблемами создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа.... Специальность включает принципы и методы, отличающиеся тем, что они содержат разработку и исследования научных основ проектирования, построения и функционирования интегрированных интерактивных комплексов анализа и синтеза проектных решений...».* В части области исследования специальности 05.13.12 – пункту 2: «Разработка научных основ создания систем автоматизации проектирования ...»; пункту 3: «Разработка научных основ построения средств САПР,

разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений...».

**Методы исследования.** Использованы методы теории САПР, теории силовых трансформаторов, теории цепей, магнитного поля, в частности, метод конечных элементов, методы анализа переходных процессов в нелинейных электрических цепях, в частности, в цепях с трансформаторами, методы расчета и анализа режимов работы электрических сетей.

**Научная новизна.**

1. Предложена методика расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов, *отличающаяся* использованием уточненных имитационных моделей, позволяющих уже на стадии проектирования анализировать особенности работы проектируемого устройства в установившихся и переходных нормальных и аварийных режимах с учетом параметров электрической сети, в том числе и с учетом возможной несимметрии.

2. Сформулирована методика расчета параметров короткого замыкания силовых трансформаторов при их проектировании на основе результатов моделирования магнитного поля, *отличающаяся* наличием возможности учета взаимного влияния полей обмоток трансформатора вне магнитной системы, позволяющая строить уточненные имитационные модели трансформаторов.

3. Разработана имитационная модель силового трансформатора, *отличающаяся* возможностью учета взаимных индуктивностей полей вне магнитной системы, обеспечивающего повышенную точность расчета переходных, в том числе аварийных, режимов работы трансформатора.

4. Создана математическая модель расчета установившихся симметричных и несимметричных (в том числе и аварийных) режимов работы силовых трансформаторов, *отличающаяся* учетом индуктивностей полей вне магнитной системы и нелинейных параметров магнитной системы трансформатора.

**Практическая значимость** результатов работы:

1. С использованием табличного процессора Microsoft Excel и библиотеки моделирования магнитного поля EMLib реализован параметрический генератор конечно-элементной модели для расчета полей вне магнитной системы СТ и модуль расчета матрицы индуктивностей, основанный на полевых расчетах, в составе САПР СТ.

2. С применением табличного процессора Microsoft Excel и пакета MATLAB разработан модуль расчета матрицы индуктивностей, использующий аналитическую модель обмоток трансформатора.

3. На основе Microsoft Excel и MATLAB Simulink создана имитационная модель СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы, которая может быть интегрирована в модель произвольных ЭС.

4. С помощью Microsoft Excel и MATLAB реализована подсистема расчета установившихся симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы СТ, интегрированная в САПР СТ, позволяющая снизить затраты на проведение натуральных испытаний СТ и тем самым повысить эффективность проектирования.

5. С использованием табличного процессора Microsoft Excel создан модуль имитационного моделирования СТ, используя который развита подсистема расширенного расчета параметров короткого замыкания в составе подсистемы поверочного расчета САПР СТ.

6. Осуществлен расчет параметров короткого замыкания нескольких трансформаторов, производимых на ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир).

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждается использованием теории силовых трансформаторов и магнитных цепей, методов анализа переходных процессов, а также апробированных методов математического моделирования, сравнением результатов расчета с результатами приемо-сдаточных испытаний трансформаторов, полученных на заводах ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир).

**Реализация результатов работы.** Результаты работы внедрены в производственный процесс в ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир), а также в учебный процесс на кафедре ТОЭЭ ИГЭУ (г. Иваново).

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

**Автор защищает:**

- положения научной новизны;
- методику исследования влияния параметров силового трансформатора на работу электрической сети в установившихся и переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимах;
- результаты апробации разработанных моделей и методик.

**Личный вклад автора** состоит в разработке методики расчета параметров короткого замыкания СТ на этапе его проектирования, учитывающей взаимное влияние полей вне магнитной системы; имитационной модели СТ с учетом матрицы индуктивностей обмоток; модели установившихся симметричных, несимметричных и аварийных режимов работы СТ в составе ЭС; методики исследования влияния параметров

трансформатора на работу электрической сети в переходных симметричных, несимметричных и аварийных режимах; в разработке структуры подсистемы уточненного расчета параметров короткого замыкания в составе подсистемы поверочного расчета САПР СТ; в участии в разработке и отладке программного обеспечения подсистемы поверочного расчета САПР СТ, в частности, параметрического генератора модели полей вне магнитопровода СТ, подсистемы расчета матрицы индуктивностей, в том числе с использованием аналитической модели полей вне магнитной системы; в проведении численных исследований на предмет корректности допущений, принятых в полевых моделях; в проведении экспериментальных исследований на основе экспериментов на реальных трансформаторах в целях апробации разработанных моделей.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на конференциях: на XIII, XIV, XV и XVI научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, г. Москва, МЭИ, 2018 г.); «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Международная научно-техническая конференция XX и XXI Бенардосовские чтения, г. Иваново, ИГЭУ, 2019, 2021 гг.); «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» (Всероссийская научно-практическая конференция, г. Казань, КГЭУ, 2019 г.); «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Всероссийская научно-практическая конференция, г. Иваново, ИПСА ГПС МЧС, 2020 г.); 2020 International Ural conference on electrical power engineering, Uralcon 2020 (г. Челябинск, 2020 г.).

**Публикации.** По результатам работы опубликованы 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 8 статей в периодических изданиях, сборниках статей и материалов конференций, 6 тезисов докладов, подана 1 заявка на свидетельство на программный продукт.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и приложения. Основная часть работы изложена на 129 страницах и содержит 51 иллюстрацию.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы определения параметров КЗ СТ, в частности собственных и взаимных индуктивностей обмоток, а также задачи анализа симметричных и несимметричных статических и динамических режимов работы СТ. Особое внимание уделяется задаче моделирования магнитного поля вне магнитопровода и имитационным моделям СТ и участков сети, содержащих СТ.

Подчеркнуты недостатки существующих моделей СТ, используемых для целей анализа режимов их работы: упрощенный учет основных параметров, а зачастую и представление трансформаторов линейными сопротивлениями, что приводит к некорректной оценке переходных режимов; взаимная связь обмоток обычно учитывается приведением обмоток к одному классу напряжения. Эти допущения приводят к возникновению погрешностей при анализе режимов работы СТ, что влияет на выбор и настройку коммутационной аппаратуры в составе ЭС. Принято решение о построении уточненных имитационных моделей СТ. Данные модели могут быть использованы для создания цифровых двойников (ЦД) СТ.

Особо стоит отметить отсутствие в современных моделях учета взаимного влияния полей вне магнитной системы, влияющего на работу СТ в переходных и аварийных режимах работы. В связи с этим проведен анализ существующих методик определения параметров поля вне магнитопровода. Особый интерес представляют подходы, построенные на решении задачи расчета магнитного поля. Инженерные методики, проверенные годами, также дают неплохие результаты при определении названных параметров на этапе проектирования СТ, но не позволяют использовать эти характеристики СТ в цифровых двойниках.

Принято решение использовать в качестве основного компонента методики расчета собственных и взаимных индуктивностей магнитного поля вне магнитопровода, откалиброванные по известным способам определения параметров трансформатора, обеспечивающим требуемую точность в установившихся режимах работы СТ. Полевые задачи можно решать с использованием мультифизических пакетов (COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell) или со свободно распространяемыми библиотеками расчета физических полей, такими как EMLib (разработка ИГЭУ).

Для исследования СТ решено дополнить существующие системы, построенные на основе табличного процессора Microsoft Excel, который интегрируется с математическими пакетами, расширяющими его функционал, такими как MatLAB или его свободно распространяемый аналог SciLab, а также со свободно распространяемыми библиотеками расчета физических полей, такими как EMLib.



Объектами для исследования выбраны широко распространенные (по данным ПАО «Россети») устройства: силовые трансформаторы классом напряжения 10/0,4 кВ мощностью до 1000 кВА с соединением обмоток «треугольник/звезда». Также в качестве объектов рассмотрены трехобмоточные трансформаторы классом напряжения 35/10/0,4 кВ.

**Во второй главе** приведены результаты разработки имитационных моделей СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы. Предложены две математические модели: одна из них позволяет рассматривать установившиеся симметричные и несимметричные режимы работы СТ, а вторая – динамические режимы работы. В обеих моделях СТ представлен как элемент электроэнергетической системы и учитывает влияние как СТ на ЭЭС, так и наоборот.

Модель для расчета статических режимов работы построена на использовании понятия о комплексной магнитной проницаемости и учитывает как нелинейность ветви намагничивания, так и собственные и взаимные индуктивности.

Магнитная цепь СТ для любого момента времени представляется схемой замещения в виде дискретных линейных и нелинейных комплексных сопротивлений и источников магнитодвижущей силы (МДС) (рис.1). Это дает возможность применить к анализу поля методы теории линейных и нелинейных цепей синусоидального тока.

При определении токов ветвей силового трансформатора используется алгоритм (рис. 2), в основе которого лежит решение методом Ньютона-Рафсона нелинейного уравнения

$$[U] = [Z(\sigma)][I]. \quad (1)$$

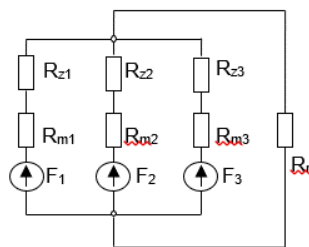


Рис. 1. Магнитная цепь СТ

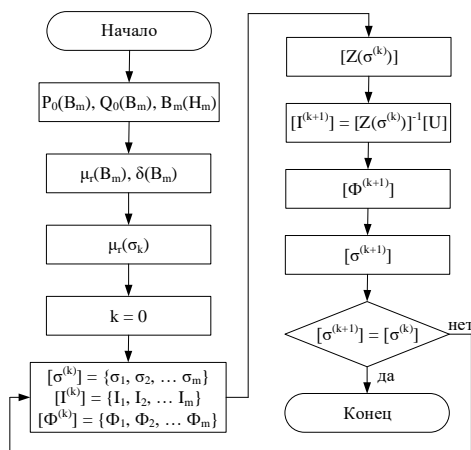


Рис. 2. Алгоритм расчета токов ветвей СТ

Здесь  $[Z(\sigma)] = [R] + [Z_\mu(\sigma)]$  – матрица комплексных сопротивлений ветвей СТ, в которой  $[R]$  – диагональная матрица активных сопротивлений ветвей схемы,  $[Z_\mu(\sigma)]$  – квадратная матрица комплексных сопротивлений ветвей СТ, обусловленных магнитным полем и потерями в стали. Матрица комплексных сопротивлений, как и токи ветвей, в конечном счете, является функцией номера отрезка аппроксимированной кубическими сплайнами характеристики  $\mu_r(B_m)$ .

Индуктивности обмоток по полям вне магнитопровода (в том числе и взаимные) учитываются в данной модели квадратной матрицей  $[L]$  в составе матрицы  $[Z_\mu(\sigma)]$ .

Математическая модель переходных режимов СТ строится с использованием библиотеки MatLAB Simulink SimPowerSystems на основе моделей идеального трансформатора. Достоинством модели переходных режимов является возможность имитации работы СТ с любой подключаемой нагрузкой. Модель реального однофазного трансформатора была расширена до имитационных моделей трехфазного двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов. В частности, на рис. 3 представлена нелинейная модель двухобмоточного трансформатора, в которой индуктивности обмоток представлены традиционным способом без учета взаимного влияния полей вне магнитной системы. Данная модель описывается известной системой уравнений для одной фазы:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = -e_1 + L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} + r_1 i_1; \\ u_2 = e_2 - L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} - r_2 i_2; \\ e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi_c(t)}{dt}; \\ e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi_c(t)}{dt}; \\ \Phi_c(t) = \lambda_{\mu c} F_0(t); \\ F_0(t) = i_1 \omega_1 + i_2 \omega_2. \end{array} \right. \quad (2)$$

Для расчета данных индуктивностей была использована осесимметричная модель магнитного поля, имитирующая опыт КЗ (намагничивающие силы (НС) обмоток одинаковые и противоположные по знаку).

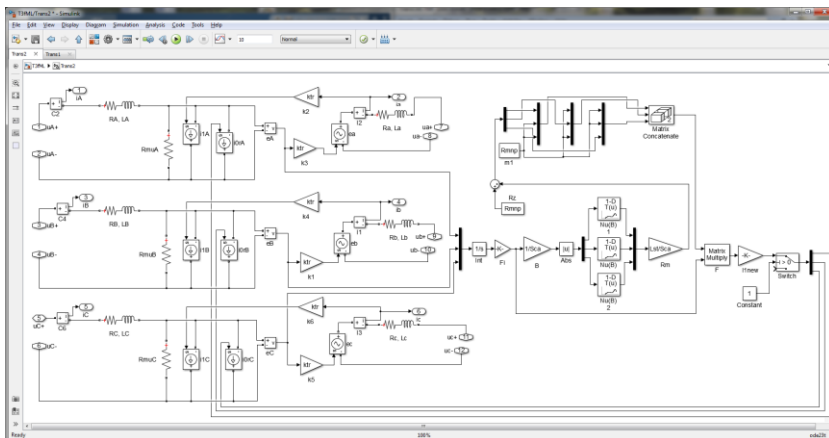


Рис. 3. Имитационная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора

Проведенное исследование показало, что стержень трансформатора в данной модели может быть представлен цилиндром, выполненным из электротехнической стали. По внутренней поверхности бака необходимо задать граничное условие Неймана. При этом результаты расчета СТ на модели, представленной на рис. 3, в установившемся режиме с большой точностью соответствуют инженерной методике расчета напряжения КЗ. Анализ необходимости учета вытеснения магнитного поля из массивных стальных элементов трансформатора показал, что влияние скин-эффекта в стали на картину полей рассеяния незначительное (разница по потоку не превышает 1%). Активное сопротивление обмоток корректируется с учетом дополнительных потерь в баке.

Для учета взаимного влияния обмоток в уточненных моделях СТ, созданных с использованием библиотеки MatLAB Simulink SimPowerSystems, индуктивности обмоток заменяем схемами замещения на основе управляемого источника. Это позволяет имитировать процессы с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы. Модель индуктивной связи по полям вне магнитопровода одной фазы двухобмоточного (а) и трехобмоточного (б) трансформатора представлена на рис. 4.

Взаимное влияние полей вне магнитной системы учитывается использованием матриц индуктивностей, элементы которых определяются по результатам расчета поля каждой из обмоток следующим образом:

$$L_{jk} = \frac{\partial \Psi_j}{\partial i_k} \approx \frac{\Psi_j}{i_k}, \quad (3)$$

где  $\Psi_j$  – потокосцепление j-й обмотки;  $i_k$  – ток k-й обмотки.

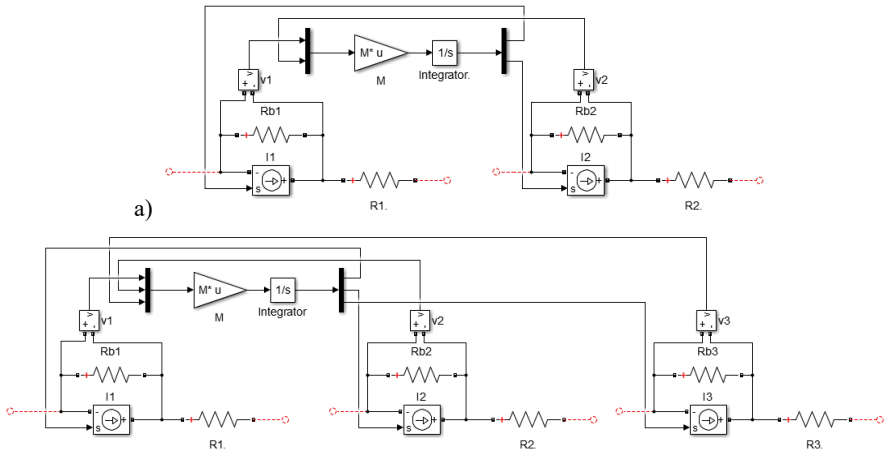


Рис. 4. Модель индуктивной связи по полям рассеяния первичной и вторичной обмоток одной фазы двухобмоточного (а) и трехобмоточного (б) трансформатора с использованием матрицы индуктивностей

Определение взаимных индуктивностей обмоток, расположенных на разных стержнях, возможно аналитическим путем на основании расчета магнитного поля двух катушек:

$$M = \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w_a-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} A(R_2, i \cdot D_2 + h - k \cdot D_1) 2\pi R_2 \right] + \frac{1}{2I} \sum_{i=0}^{w_a-1} \left[ \sum_{k=0}^{w-1} A(R_1, i \cdot D_2 + h - k \cdot D_1) 2\pi R_1 \right], \quad (4)$$

где  $D_1, D_2$  – диаметры проводника первой и второй катушек;  $w, w_a$  – число витков первой и второй катушек;  $I$  – ток первой катушки;  $R_1, R_2$  – средний радиус первой и второй катушек;  $h$  – разница высот нижних точек катушек (если вторая катушка выше, то  $h$  – число положительное).

Для расчета векторного магнитного потенциала магнитного поля применяется зависимость

$$A(r, z) = \frac{\mu I R}{4\pi \sqrt{z^2 + R^2 + r^2}} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \Psi \cdot d\Psi}{\sqrt{1 - \frac{2 \cdot R \cdot r \cdot \cos \Psi}{z^2 + R^2 + r^2}}}, \quad (5)$$

где  $r$  – расстояние от расчетной точки до оси кольцевого витка;  $z$  – высота рассматриваемой точки относительно плоскости витка.

Для учета сопротивления поля нулевой последовательности в схеме, изображенной на рис. 1, предусмотрено сопротивление  $R_{m0}$ , которое

рассчитывается на модели, аналогичной модели поля вне магнитопровода, но с сонаправленными токами в обмотках, по формуле

$$R_{m0} = \frac{F_{\Sigma}}{\Phi_{\Sigma}} = \frac{2I_0 w}{\Phi_{\Sigma 0}} = \frac{2I_0 w}{\Psi_1 w + \Psi_2 w} = \frac{2I_0}{\Psi_1 + \Psi_2}. \quad (6)$$

Используя полученные данные, формируются имитационные модели анализа статических и динамических симметричных и несимметричных режимов работы СТ.

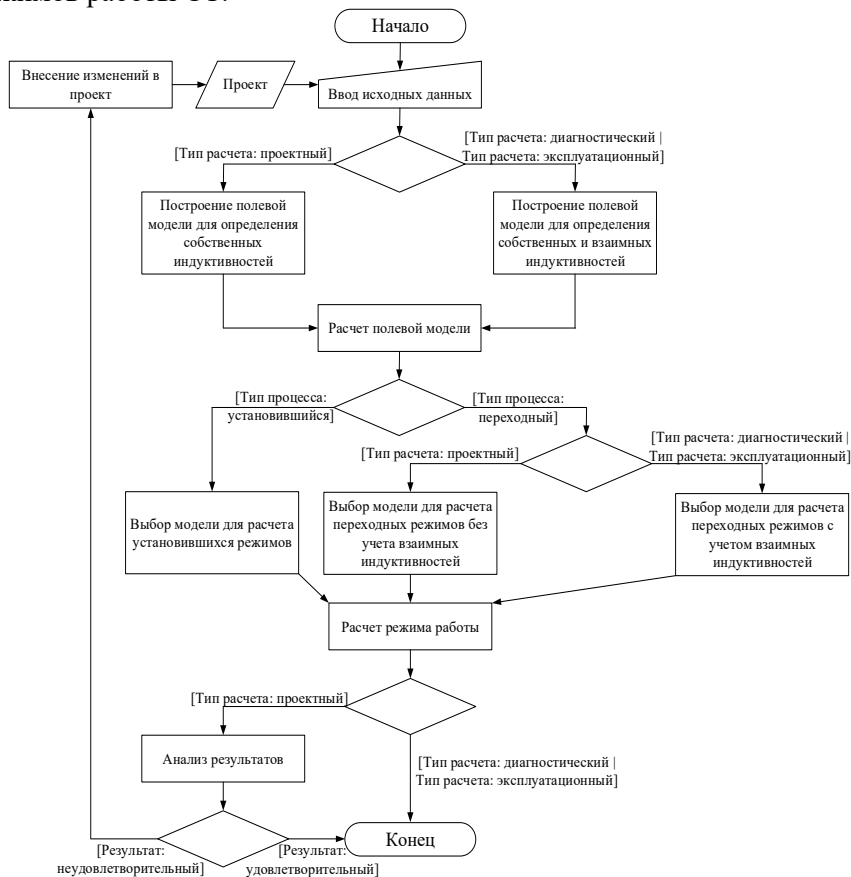


Рис. 5. Алгоритм построения ЦД СТ

С использованием вышеназванных имитационных моделей расчета статических и переходных режимов работы СТ разработана методика построения цифрового двойника СТ, алгоритм которой приведен на рис. 5. Также разработана методика анализа участков ЭС, содержащих СТ

(рис. 6). Данные методики позволяют учитывать конкретные цели расчета (тип расчета и режим работы СТ), и на основании этих данных строить уточненные модели и использовать параметры СТ, наилучшим образом подходящие для них.

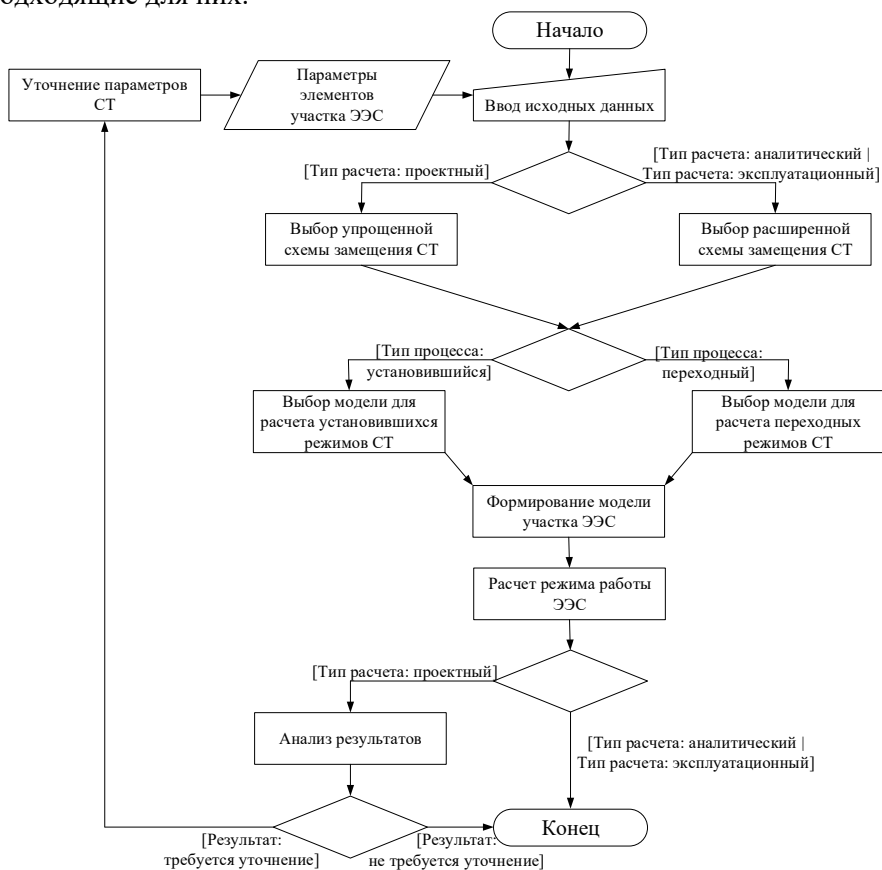


Рис. 6. Алгоритм анализа участков ЭС

**В третьей главе** приведены результаты программной реализации и апробации полученных моделей. Для апробации методики определения индуктивностей обмоток был рассмотрен силовой трансформатор ТМГ-1000-10/0,4 D/Yн-11 производства ООО «Трансформер». По описанной ранее методике определены индуктивности первичной и вторичной обмоток, с учетом которых определена величина напряжения КЗ. Расхождение расчетной величины с паспортным значением составило 1,8%, что говорит о высокой точности предлагаемого подхода.

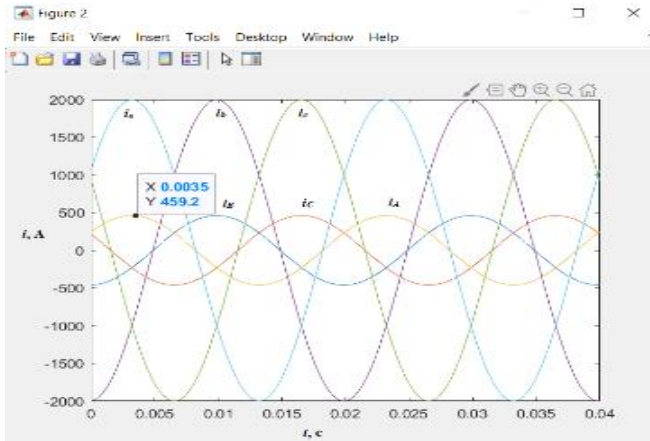


Рис. 7. Результаты расчета режима трехфазного КЗ СТ

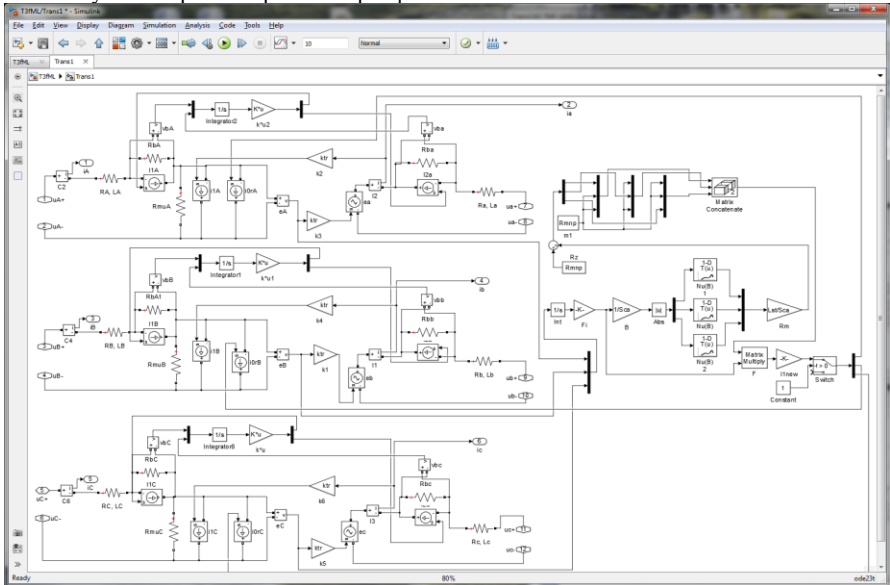


Рис. 8. Имитационная модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом взаимных индуктивностей

В качестве объекта исследования при апробации имитационных моделей был выбран трансформатор ТМГ-1000-10/0,4 D/Yн-11. По алгоритму, изображенному на рис. 2, построена система расчета симметричных и несимметричных установившихся режимов работы. Результатами расчета являются графики мгновенных значений токов ветвей СТ.

Графики первичных и вторичных токов для режима трехфазного КЗ (при подключении на величину напряжения КЗ) приведены на рис. 7. Значение тока в первичной обмотке отличается от номинального тока на 2,1%

На основании модели индуктивной связи (см. рис. 4) была построена модель трехфазного двухобмоточного трансформатора (рис. 8).

Промоделированы следующие режимы СТ: включение на номинальную нагрузку, включение на холостой ход, трехфазное КЗ, несимметричные КЗ (однофазное и двухфазное).

Из результатов расчета режима трехфазного КЗ при подключении на величину напряжения КЗ (рис. 9, а) следует, что ток первичной обмотки в установившемся режиме отличается от номинального тока на 1,9%, что говорит о корректности модели с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы.

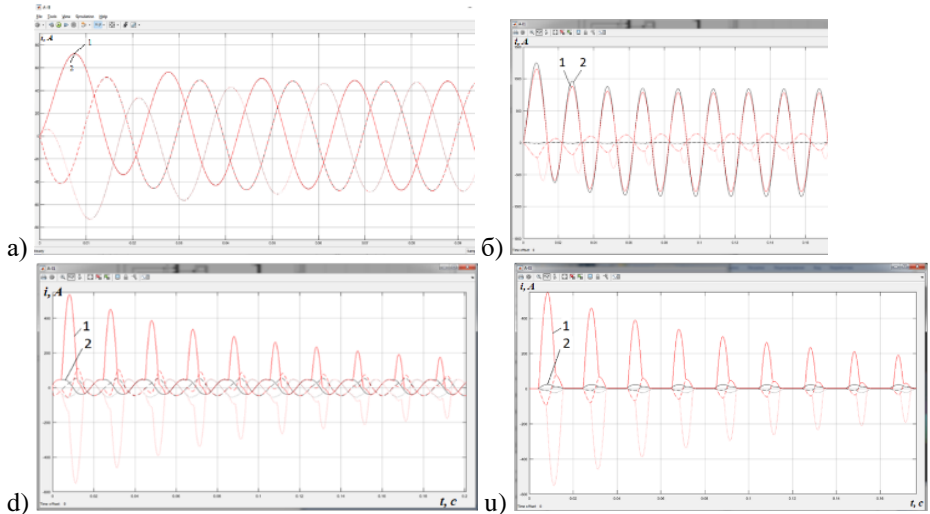


Рис. 9. Осциллограммы первичных токов двухобмоточного СТ, полученные на имитационных моделях с учетом взаимных индуктивностей (кривая 2) и без взаимных индуктивностей (кривая 1): а) включение на трехфазное КЗ; б) включение на однофазное КЗ; в) включение на нагрузку; г) включение на режим ХХ

В режимах несимметричных КЗ (рис. 9, б), режиме ХХ (рис. 9,в) и включения на нагрузку (рис. 9,г) выявлено расхождение в результатах двух моделей в переходных режимах, обусловленное влиянием взаимных индуктивностей, которые невозможно учесть на современных цепных моделях. В режиме ХХ и режиме под нагрузкой амплитуды токов, получаемых на разных моделях, отличаются на 95% и 93% соответственно. В



режиме несимметричных КЗ расхождение составляет 8% для однофазного КЗ и 7% для двухфазного КЗ. Результаты расчета установившихся режимов СТ практически совпадают: расхождение не превышает 1%.

Полученные результаты свидетельствуют о неточности моделирования переходных (в том числе и аварийных) режимов СТ на используемых в настоящее время моделях, не учитывающих взаимное влияние обмоток по полям вне магнитной системы. Особенно существенные погрешности возникают при моделировании многообмоточных трансформаторов.

**В четвертой главе** приведено описание существующей системы САПР СТ, реализованной с использованием модульного принципа, основанного на использовании табличного процессора Microsoft Excel. Входными данными для проектирования СТ является техническое задание (ТЗ). Выходными данными является оптимизированный проект устройства, готовый к сборке и проведению приемосдаточных испытаний.

В качестве недостатка существующей структуры стоит отметить отсутствие возможности оценить работу СТ в наиболее тяжелых режимах и, соответственно, спрогнозировать жизнеспособность объекта проектирования. В качестве решения данной проблемы предложено использование подсистемы расширенного поверочного расчета (рис. 10), построенной с использованием описанных выше имитационных моделей СТ. Подсистема расширенного поверочного расчета организована в форме автономного листа рабочей книги Microsoft Excel и управляется с использованием виртуальных кнопок. Результатами расчета являются численные данные о кривых токов обмоток СТ.

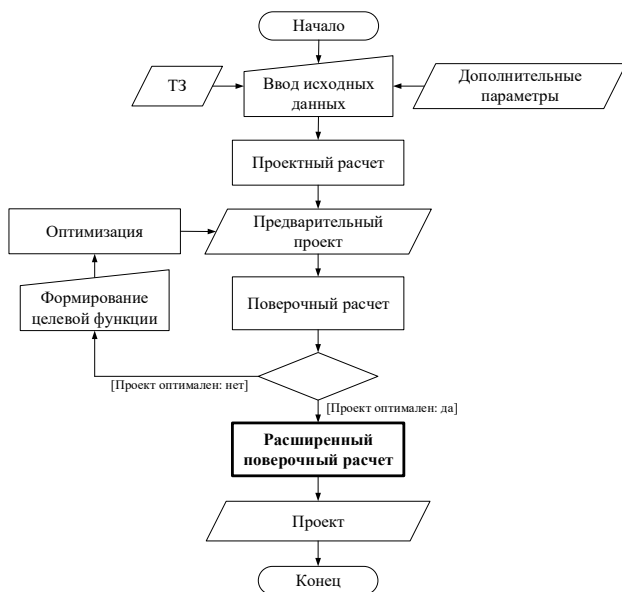


Рис. 10. Структура САПР СТ с подсистемой расширенного поверочного расчета

Рис. 10), построенной с использованием описанных выше имитационных моделей СТ. Подсистема расширенного поверочного расчета организована в форме автономного листа рабочей книги Microsoft Excel и управляется с использованием виртуальных кнопок. Результатами расчета являются численные данные о кривых токов обмоток СТ.

Разработанные в данной диссертации модели позволяют с высокой точностью и быстродействием имитировать установившиеся и переходные режимы работы с учетом возможной несимметрии не только СТ, но и участков сетей, содержащих СТ. Данные модели предлагается использовать в качестве цифровых двойников СТ как на этапе проектирования трансформаторов, так и при их эксплуатации в составе электросетей, что позволит повысить точность производимых расчетов, а также снизить затраты при производстве СТ.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Осуществлен анализ существующих методик определения параметров КЗ СТ и методов анализа режимов работы СТ и участков электрических сетей, содержащих СТ.

2. Разработана методика расчета параметров КЗ СТ, в том числе и взаимных индуктивностей обмоток по полям вне магнитной системы. Расхождение результатов с апробированными методиками не превышает 1,8 %. Разработана методика аналитического расчета взаимных индуктивностей обмоток, находящихся на разных стержнях. Это позволило повысить точность расчета переходных и аварийных режимов работы СТ.

3. Созданы имитационные модели, позволяющие анализировать различные режимы работы СТ, в том числе и переходные аварийные с учетом возможной несимметрии. Полученные модели в установившемся режиме трехфазного КЗ дают результаты, на 2% отличающиеся от результатов испытаний реальных трансформаторов. В некоторых переходных режимах работы получены результаты на 95% точнее существующих методик.

4. На основании вышеназванных моделей сформулирована методика построения цифрового двойника СТ с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы СТ, позволяющая производить как уточненные поверочные расчеты в составе САПР СТ, так и эксплуатационные расчеты с целью анализа влияния параметров СТ на электрическую сеть.

5. Предложена методика анализа участков электрических сетей, содержащих СТ, позволяющая исследовать эксплуатационные режимы работы в «реальном времени», а также «на перспективу» с целью определения наиболее тяжелых режимов работы как СТ, так и ЭС в целом и последующим выбором и верной настройкой оборудования и защитной аппаратуры.

6. Разработана подсистема расширенного поверочного расчета в составе САПР СТ с использованием имитационных моделей с учетом взаимного влияния полей вне магнитной системы. Данная подсистема прошла стадию апробации на ООО «Трансформер» (г. Подольск) и ООО «НПК «АВТОПРИБОР» (г. Владимир).

7. Описанные модели апробированы при анализе работы реальных устройств и показывают высокие точность и быстродействие.

#### **Публикации по теме диссертации по списку ВАК**

1. **Снитко И.С.**, Тихонов А.И., Стулов А.В., Мизонов В.Е. Разработка модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47-56. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.047-056.

2. Вихарев Д.Ю., **Снитко И.С.**, Тихонов А.И. Аналитический расчет индуктивностей рассеяния на основе применения векторного потенциала магнитного поля // Моделирование систем и процессов: журнал.— Воронеж: ФГБОУ ВО "Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова . – 2021. – №1. – Т.14. – С.4 – 10.

3. Тихонов А.И., Стулов А.В., **Снитко И.С.**, Подобный А.В. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов. – Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2020. – Вып. 3, с. 32 – 43.

4. Мартынов В.А., **Снитко И.С.** Математическая модель несимметричных режимов силовых трансформаторов с использованием понятия комплексной магнитной проницаемости // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 24-31. DOI: 10.17588/2072-2672.2018.6.024-031.

#### **Публикации по теме диссертации в других изданиях**

5. Stulov A., Tikhonov A., Snitko I. Generative design methodology for electrical machines design based on equivalent circuit and field models of physical processes // В сборнике: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Серия: Lecture notes in mechanical engineering. Chelyabinsk, 2021. С. 234-243.

6. Тихонов А.И., Стулов А.В., Еремин И.В., **Снитко И.С.**, Подобный А.В., Каржевин А.А., Плаксин А.В. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля // Южно-сибирский научный вестник: журнал. – Бийск: ООО МИП Политех. – 2020. – №1 (29). – С.76 – 82.

7. Еремин И.В., Подобный А.В., Каржевин А.А., Плаксин А.В., **Снитко И.С.**, Тихонов А.И. Разработка моделей для системы автоматизированного проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфной стали // Молодой учёный: журнал. – Казань: ООО "Издательство "Молодой учёный". – 2020. – №5 (295). – С.14 – 22.

8. Stulov A., Tikhonov A.I., **Snitko I.S.** Fundamentals of Artificial Intelligence in Power Transformers Smart Design / // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2020: материалы конференции, 22-24 сентября, г. Челябинск. – Челябинск: ЮУрГУ. – 2020. – С.34 – 38.

9. **Снитко И.С.**, Тихонов А.И. Моделирование режимов работы трехфазных многообмоточных трансформаторов с учетом взаимного влияния полей

рассеяния // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: {XXI Бенардосовские чтения): мат. междунар. науч.-техн. конф., 2-4 июня 2021 г., г. Иваново. — Иваново: ФГБОУВО ИГЭУ им. В.И. Ленина". – 2021. – Т.1. – С.22 – 25.

10. Норин В.А., **Снитъко И.С.** Решение полевой задачи для определения характеристик сварочного трансформатора с увеличенным рассеянием // Энергия-2020. Том 3. Электроэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых; г. Иваново, 7 - 10 апреля 2020 года: материалы конференции. – Иваново: ФГБОУВО ИГЭУ им. В.И. Ленина". – 2020. – Т.3. – С.76.

11. Семенова К.В., Тихонов А.И., **Снитъко И.С.**, Подобный А.В., Каржевин А.А. Разработка цифровых двойников силовых трансформаторов // Надежность и долговечность машин и механизмов. 2020: сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 16 апреля 2020 г., г. Иваново. — Иваново: ФГБОУ ВО "Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России".— 2020. – С.307 – 311.

12. **Снитъко И.С.**, Норин В.А., Дыдыкина Н.Н. Определение потоков рассеяния силового трехфазного трансформатора // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): сборник научных трудов по материалам Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции, 29-31 мая 2019 г., г. Иваново. — Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина".— 2019.— Т.1. – С.9 – 12.

### Тезисы докладов на конференциях

13. Норин В.А., **Снитъко И.С.** Методика определения индуктивностей рассеяния сварочных трансформаторов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2020: тезисы докладов, 12-13 марта 2020 г., г. Москва.— Москва: ООО «Центр полиграфических услуг "Радуга".— 2020. – С.361.

14. **Снитъко И.С.**, Мартынов В.А. Применение символического метода для анализа режимов работы многообмоточных силовых трансформаторов // Энергия-2020. Том 3. Электроэнергетика: тринадцатая Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 3-5 апреля 2018 г., г. Иваново. — Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина".— 2018.— Т.3. – С.99.

---

СНИТЬКО Ирина Сергеевна

### РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСШИРЕННОГО ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА В САПР СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ г. Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Печать плоская. Усл. Печ. л 1,16

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34