федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

На правах рукописи

СТУЛОВ Алексей Вадимович

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Специальность

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (электротехника и энергетика)

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Тихонов Андрей Ильич

Иваново 2015

РЕФЕРАТ

Диссертация 152 стр., 75 рис., 19 табл., 116 библ.

Ключевые слова. Тепловой анализ, параметрическая генерация цепных моделей, электрические схемы замещения, неоднородность магнитного поля, распределительные трансформаторы, системы инженерного анализа (САЕ-системы).

Целью работы является повышение эффективности проектирования распределительных трансформаторов путем разработки и использования комбинированных моделей и методов теплового анализа в САПР трансформаторов.

Объектами исследования являются распределительные трансформаторы сухого и масляного исполнения.

Предметом исследования являются тепловые процессы в активной части распределительных трансформаторов масляного и сухого исполнения.

Приведен анализ моделей и методов теплового расчета активной части распределительных трансформаторов, разработаны математические модели для расчета потерь в обмотках трансформатора с учетом неравномерного распределения тока и модели для теплового расчета на основе разветвленных электрических схем замещения.

Разработан метод параметрической генерации цепных моделей активной части распределительного трансформатора. Приведено описание структуры и функциональных возможностей разработанного программного комплекса, позволяющего производить тепловой расчет активной части распределительного трансформатора с различной степенью точности, быстродействия и визуализации результатов.

Даны практические рекомендации по применению разработанного программного комплекса в процессе автоматизированного проектирования распределительного трансформатора.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	CORPEMENHOE COCTOЯНИЕ ΠΡΟΕ ΙΕΜΗ ΤΕΠ ΙΟΡΗΥ							
	Ο Ο ΕΓΟΥΤΟΡΙΟ ΤΟ Ο ΕΙΟΥΤΟΡΙΑ ΠΡΟΒΙΕΙΜΗ ΤΕΠΙΟΒΗΑ ΡΑCUETOR R CAND PACIDE ΠΕ ΠИΤΕ ΠΑΗΑΙΥ ΤΡΑΗΟ							
	ΦΟΡΜΑΤΟΡΟΒ							
1.1.	Инструментальная база для температурного анализа распре-							
	делительных трансформаторов							
1.2.	Математические методы моделирования тепловых процес-							
	сов в трансформаторах							
1.2.1.	Аналитический и численный методы решения задач сложного							
	теплообмена в трансформаторах							
1.2.2.	Моделирование тепловых процессов в трансформаторах на ос-							
	нове электротепловой аналогии							
1.3.	Обзор эмпирических методик теплового расчета распредели-							
	тельных трансформаторов							
1.3.1.	Методы расчета потерь энергии в трансформаторе							
1.3.2.	Эмпирические методики для теплового расчета трансформаторов							
1.4.	Теоретическое обоснование компонентного состава и струк-							
	туры подсистемы теплового анализа в САПР распредели-							
	тельных трансформаторов							
DIIDC								
RPIRC	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ							
вывс 2.	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА							
вывС 2.	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ							
выв(2.	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА							
выв (2. 2.1.	 ЭДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения 							
выв С 2. 2.1.	 ЭДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора 							
вывс 2. 2.1. 2.2.	 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора. Разработка алгоритмов формирования и решения системы урав- 							
вывс 2. 2.1. 2.2.	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора. Разработка алгоритмов формирования и решения системы уравнений уравния и решения уравния уравний <							
вывс 2. 2.1. 2.2. 2.3.	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора Разработка алгоритмов формирования и решения системы уравнений электрической цепи методом переменных состояния Разработка метода параметрической генерации и численного ис- и численного ис-							
вывс 2. 2.1. 2.2. 2.3.	ОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ РАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения Потерь энергии в обмотках трансформатора. Разработка алгоритмов формирования и решения системы уравнений электрической цепи методом переменных состояния. Разработка метода параметрической генерации и численного исследования цепных моделей.							
вывс 2. 2.1. 2.2. 2.3. 2.4.	РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора							
вывс 2. 2.1. 2.2. 2.3. 2.4.	РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора							

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА ТЕПЛОВОГО РАС-								
ЧЕТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА								
Разработка тепловой модели распределительного трансфор-								
матора на основе разветвленных электрических схем заме-								
щения								
Структура многоуровневой математической модели для теплово-								
го расчета трансформатора								
Разработка уточненной тепловой модели обмоток трансформа-								
тора в среде Simulink								
Разработка уточненной тепловой модели обмоток с использова-								
нием библиотеки моделирования электрических цепей								
Расчет параметров уточненной математической модели для теп-								
лового расчета трансформатора								
Расчет тепловых сопротивлений теплопроводности								
Расчет коэффициента теплоотдачи в сухих трансформаторах с								
учетом нелинейности								
Расчет коэффициента теплоотдачи в масляных трансформаторах								
с учетом нелинейности								
Расчет тепловых сопротивлений теплоотдачи излучением								
Разработка метода теплового расчета на основе уточненной								
математической модели трансформатора								
Основные положения метода теплового расчета на основе уточ-								
ненной математической модели трансформатора на основе раз-								
ветвленных электрических схем замещения								
Параметрическая генерация и расчет цепной модели теплового								
состояния трансформатора								
Параметрическая генерация и численное исследование тепловой								
модели трансформатора в полевой постановке								
Тепловой расчет трансформатора с использованием уточ-								
ненной математической модели трансформатора на основе								
схем замещения								
ЦЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ								
РАЗРАБОТКА И АПРОБАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО								
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО								
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР ТРАНСФОРМАТОРОВ								
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР ТРАНСФОРМАТОРОВ Структура и принцип работы системы теплового анализа в								
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР ТРАНСФОРМАТОРОВ Структура и принцип работы системы теплового анализа в САПР трансформаторов								
РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР ТРАНСФОРМАТОРОВ Структура и принцип работы системы теплового анализа в САПР трансформаторов								
<u>,</u>								

4.3.	Апробация системы теплового анализа в САПР трансформа-	
	торов	113
4.3.1.	Тепловой расчет сухих трансформаторов с литой изоляцией типа	
	ТСЛ 400 – 1600 кВА класса напряжения 10 кВ	113
4.3.2.	Тепловой расчет герметичных масляных трансформаторов типа	
	ТМГ 400 – 1600 кВА класса напряжения 10 кВ	120
вывод	ІЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	124
ЗАКЛЮ	ОЧЕНИЕ	125
БИБЛИ	ОГРАФИЯ	128
ПРИЛС	Эжения	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Для современного проектирования электротехнического оборудования, в частности, распределительных трансформаторов характерно требование постоянного повышения точности и скорости расчетов, а также снижение трудозатрат проектировщиков.

Технологии проектирования трансформаторов в СССР были развиты до уровня, при котором реальный срок службы трансформатора составлял 40-50 лет, при стандартизованном сроке 25 лет. Такого рода результаты были достигнуты благодаря тому, что развитие нормативной базы для промышленного проектирования в трансформаторостроении в советское время носило системный характер. Центрами разработок являлись «Всесоюзный институт трансформаторостроения» (ВИТ) (г. Запорожье), «Всесоюзный научноисследовательский институт электромеханики» (г. Москва), а также специализированные конструкторские бюро (СКБ) трансформаторных заводов. Результаты разработок методик проектирования оформлялись в виде руководящих технических материалов (РТМ), которые после апробации и корректировки на производственных предприятиях по выпуску трансформаторов, переходили в разряд руководящих документов (РД). Методики на основе РД были основным инструментом проектировщика трансформаторов вплоть до конца 1980-х годов.

После образования СНГ и перехода России в рыночную экономику развитие нормативной базы для промышленного проектирования трансформаторов перестало быть системным процессом. Разработка моделей и методов проектирования трансформаторов на государственном уровне прекратилась. Отработка появляющихся новых конструкторско-технологических решений в трансформаторах на эмпирическом уровне стало дорогостоящим затратным мероприятием.

В то же время в условиях мелкосерийного и штучного производства, особенно при проектировании специальных видов трансформаторов, необхо-

димо одновременно повышать точность и скорость проектирования в связи со сжатыми сроками выполнения заказа. С учетом сказанного выше это приводит к необходимости использования при проектировании инструментов инженерного анализа на основе метода конечных элементов (САЕ-систем), таких как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, COSMOS, MARC и др. Такие системы позволяют рассчитать проектируемое устройство с учетом особенностей конструкции, не учтенных в РД. Однако полевые модели отличаются крайне низким быстродействием, что не позволяет использовать их при оптимизации трансформатора.

Следует отметить, что наиболее важную роль при принятии проектных решений играют результаты тепловых расчетов трансформаторов. В связи с этим является актуальной задача разработки универсальных моделей и методов теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов, позволяющих учесть особенности современных конструкций трансформаторов в процессе поиска оптимального решения.

Диссертационная работа выполнялась в Ивановском государственном энергетическом университете.

Цель работы заключается в повышении эффективности проектирования распределительных трансформаторов путем разработки и использования моделей и методов теплового анализа в САПР трансформаторов.

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Разработка универсальной библиотеки моделирования электрических цепей.

2. Разработка уточненной математической модели для расчета потерь в обмотках трансформатора с учетом положения отдельных проводников и их частей в неоднородном магнитном поле.

3. Разработка уточненной математической модели теплового состояния трансформатора в стационарном режиме на основе электротепловой аналогии.

4. Разработка программных средств для параметрической генерации электрических схем замещения физических процессов в трансформаторе.

5. Адаптация разработанных программных средств к использованию в САПР трансформаторов.

 Разработка подсистемы теплового анализа САПР трансформаторов с возможностью проведения оптимизации трансформатора с использованием уточненной тепловой модели.

7. Интеграция подсистемы теплового анализа в САПР трансформаторов.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: в части формулы специальности 05.13.12: «Системы автоматизации проектирования – специальность, занимающаяся проблемами создания и повышения эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа ... интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды. 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 и систем создания проектной ... документации на изготовление, испытание и эксплуатацию сложных технических объектов, образцов новой техники и технологий». В части области исследования специальности 05.13.12 – <u>пункту 1</u>: «Методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР»; <u>пункту 2</u>: «Разработка научных основ создания систем автоматизации проектирования ...»; *пункту 3*: «Разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений»; <u>пункту 4</u>:

«Разработка принципиально новых методов и средств взаимодействия проектировщик-система».

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является распределительный трансформатор. Предметом исследования являются численные модели тепловых процессов, протекающих в активной части распределительного трансформатора в стационарных режимах.

Методы исследования. Поставленные задачи решались с использованием положений теории теплопроводности и теории пограничного слоя, математического аппарата метода конечных элементов для расчета электромагнитного поля, формализованных методов расчета электрических цепей, моделирования на основе положений теории подобия, а также с использованием экспериментальных методов исследования.

Научная новизна:

1. Разработан метод параметрической генерации и численного исследования цепных моделей, *отличающийся* возможностью автоматизации процесса построения разветвленной электрической схемы физических процессов и организации численного эксперимента по заданному алгоритму и позволяющий осуществлять многократную перегенерацию цепных моделей на этапе оптимизации проекта.

2. Разработана модель и метод расчета потерь в обмотках трансформатора на основе комбинации модели магнитного поля и модели электрической цепи, *отличающиеся* возможностью учета положения отдельных проводников и их частей в неоднородном магнитном поле и связанных с этим эффектов неравномерности распределения тока.

3. Разработана модель и метод расчета теплового состояния распределительного трансформатора на основе электротепловой аналогии, *отличающиеся* возможностью автоматического построения и исследования разветвленных электрических схем замещения тепловых процессов с различной степенью детализации расчетной схемы, позволяющей достичь точности

расчета, характерной для полевых задач при большем быстродействии за счет учета характерных симметрий.

Практическая ценность результатов:

1. Разработана версия библиотеки моделирования электрических цепей, функционирующая в среде MatLab.

2. Разработаны алгоритмы и программные средства для создания подсистем расчета потерь распределительных трансформаторов на основе математических процессоров Excel и MatLab.

3. Разработаны алгоритмы и программные средства для создания подсистем теплового расчета САПР распределительных трансформаторов на основе математических процессоров Excel и MatLab.

3.Разработана подсистема теплового анализа распределительных трансформаторов, позволяющая выполнять расчеты с высоким уровнем точности при высоком быстродействии.

4. Разработаны параметрические генераторы цепных моделей физических процессов, значительно снижающие трудоемкость проектирования.

5.Проведены тепловые расчеты распределительных трансформаторов 400-1600 кВА класса напряжения 10 кВ. Получены достоверные результаты теплового расчета, подтвержденные тепловыми испытаниями.

Разработанные программные средства могут быть использованы в производственном проектировании, в научных исследованиях, а также учебных целях.

По результатам работы получен акт внедрения в производственный процесс в ООО «Трансформер» (г. Подольск) и акт внедрения в учебный процесс на кафедре Электромеханики ИГЭУ (г. Иваново).

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в разработке, отладке и адаптации к САПР распределительных трансформаторов универсальной библиотеки моделирования электрических цепей, в разработке параметрически генерируемых математических моделей для расчета распределения потерь в обмотках с учетом эффекта вытеснения тока и теплового расчета активной части распределительного трансформатора; разработке методов параметрической генерации и численного исследования моделей; разработке многоуровневой системы теплового анализа распределительного трансформатора; проведении численных и натурных экспериментов и разработке рекомендаций по совершенствованию моделей распределительных трансформаторов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на конференциях: на международной научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» (Бенардосовские чтения, г. Иваново, ИГЭУ, 2011, 2013, 2015 гг.), на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2012, 2014, 2015 гг.), на региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.).

Публикации. По результатам работы опубликовано 1 научное издание, 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 13 тезисов докладов на конференциях, получено 1 свидетельство на программный продукт.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 116 наименований и 4 приложения. Диссертация изложена на 152 страницах, включая основную часть, список литературы и приложения, а также содержит 75 иллюстраций и 19 таблиц.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ В САПР РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Инструментальная база для температурного анализа распределительных трансформаторов

В современных условиях становится очевидным, что российская промышленность способна перейти в стадию устойчивого роста только в том случае, если предприятия смогут значительно повысить качество выпускаемой продукции. Качество продукции напрямую связано с уровнем технических решений, которые принимаются на этапе создания продукции, а также всестороннего инженерного анализа.

Инженерный анализ включает в себя комплекс вычислений для получения информации по параметрам, которые характеризуют состояние оборудования. Среди таких параметров наиболее ответственным и сложным является температурное поле изделия.

В частности, для распределительных трансформаторов в 1930 г. Монтзингером определена зависимость между сроком службы и температурой изоляционных материалов [21]:

$$L = De^{-m\theta} \tag{1.1}$$

где L – срок службы, годы; θ – температура, °С; D и m – коэффициенты, зависящие от свойств материала.

Точный тепловой расчет трансформатора направлен на создание моделей, имеющих минимальный вес, минимальные энергетические потребности и, как следствие, минимальные стоимость и эксплуатационные затраты.

В России процесс использования инструментов инженерного анализа (Computer Aided Engineering – CAE) характеризуется применением зарубежных САЕ-систем. К таким САЕ-системам относятся системы конечноэлементного (КЭ) анализа ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, COSMOS, MARC и

другие. Компания Siemens предлагает ПО, которые представляет собой комплекс программных средств для проведения инженерного анализа, автоматизированного проектирования, производства и контроля жизненного цикла оборудования Siemens PLM Software. САЕ-система для анализа теплового состояния носит название NX Thermal. NX Thermal моделирует явления теплопроводности, конвекции и излучения в сложных деталях и больших сборках, используя технологию на основе метода конечных объемов.

Существенным препятствием для продвижения этих продуктов на российском рынке является то, что они не локализованы и достаточно дороги. Усугубляет положение перечисленного программного обеспечения (ПО) на российском рынке введение антироссийских санкций со стороны европейских и американского правительств.

Высокая стоимость, характерная для программных продуктов такого уровня, обоснована тем, что разработка ПО в области САЕ-анализа является довольно затратным мероприятием. Такие системы требуют от разработчика знаний и навыков не только в области программирования, но и математического моделирования, численных методов, теплопередачи и т.п.

Примером автономной САЕ-системы отечественного производства служит АРМ WinMachine (разработчик – НТЦ АРМ) [100]. Подсистемой теплового анализа является АРМ ТDА (АРМ Thermic Dynamic Analysis). АРМ TDA позволяет моделировать температурные поля в условиях стационарных и нестационарных режимов теплообмена методом конечных элементов. Стоит сказать, что случаи применения АРМ TDA к тепловому расчету распределительных трансформаторов в литературе не встречаются. Другим примером отечественной САЕ-системы служит популярная разработка ООО «ТОР» (РФ, г. Санкт-Петербург) – ELCUT. Модуль **Теплопередача** позволяет решать задачи теплового исследования в осесимметричном и плоскопараллельной постановке и обладает широким спектром возможностей учета различных свойств: нелинейных и анизотропных; распределенных, линейных и то-

чечных источников тепла; источников тепла, как результата электрических потерь и др.

В ряде организаций РФ (ХК «Электрозавод», г. Москва; ООО «Тольятинский Трансформатор», г. Тольятти и др.) и стран СНГ (ОАО «Запорожский трансформаторный завод», г. Запорожье, Украина; ОАО «Минский электротехнический завод им. Козлова», г. Минск, Республика Беларусь) разрабатываются и постоянно совершенствуются системы автоматизированного проектирования (САПР) и компьютерные программы для выполнения соответствующих расчетов и конструирования новых распределительных и силовых трансформаторов.

В частности, в качестве программно-методического обеспечения для расчета трансформаторов в ПАО «ВИТ» разработана система САПР-ТОН [62]. В состав системы входят 19 пакетов прикладных программ моделирования электромагнитных, электростатических, тепловых и механических полей и процессов в трансформаторах. Пакеты прикладных программ могут функционировать как в комплексном, так и в автономном (без связи с другими программами системы) режиме.

На Минском электротехническом заводе имени В.П. Козлова разработана и внедрена в промышленную эксплуатацию САПР силовых трансформаторов мощностью 25-630 кВА напряжением до 35 кВ, которая предназначена для автоматизации расчетного проектирования силовых масляных трансформаторов общего назначения. Условное название САПР-ПРОТОН [60]. Данная САПР охватывает широкий круг конструктивных решений, применяемых в существующих и перспективных сериях распределительных трансформаторов. Трансформаторы имеют плоскошихтованную или витую пространственную магнитную систему, слоевые цилиндрические обмотки из медного или алюминиевого провода круглого или прямоугольного сечения или фольги и, масляную систему охлаждения с естественной циркуляцией, бак гладкий (с радиаторами или без них) или гофрированный. Гофрирован-

ные баки могут иметь три исполнения: герметичные полным заполнением маслом, герметичные с воздушной подушкой, с расширителем [60].

Разработка эмпирических методик на основе РД – это аккумуляция опыта, проведения серий испытаний физических образцов, широкомасштабная научно-исследовательская работа. Вместе с тем, в 90-е годы прошлого века, когда разработки эмпирических методик на системном уровне были прекращены, получила развитие технология намотки обмоток НН распределительных трансформаторов из алюминиевой и медной ленты, применение при шихтовке магнитной системы технологии Step-Lap, применение изоляционных материалов с классами нагревостойкости F, H и выше, изготовление баков с гофрированными панелями и т.п. Это было простимулировано требованиями к оптимизации конструкции трансформаторов и снижению материальных затрат.

В настоящее время в распоряжении инженеров-проектировщиков трансформаторов конструкторских отделов отдельных трансформаторных заводов нет методик, которые учитывали бы особенности новых конструкций трансформаторов. Надежда на современные САЕ-системы также зачастую себя не оправдывает, так как конечно-элементный расчет физических полей требует значительного расчетного времени, измеряемого часами. Особенно это актуально при решении задач оптимизации, требующих расчета множество вариантов. Кроме того, постановка задачи расчета физических полей без учета особенностей, характерных для современных конструкций трансформаторов, зачастую оказывается некорректной, что приводит к необходимости сложных модификаций математического аппарата расчетных моделей.

В связи с этим разработка быстродействующих математических моделей трансформаторов и методов их исследования, которые будут учитывать особенности современных конструкций трансформаторов, является актуальной задачей.

1.2. Математические методы моделирования тепловых процессов в трансформаторах

1.2.1. Аналитический и численный методы решения задач сложного теплообмена в трансформаторах

Аналитический метод решения задач теплового расчета трансформаторов основывается на решении систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопередачи и конвективного движения охлаждающей среды.

В распределительных трансформаторах масляного и сухого типа, в основном, имеет место теплопередача путем теплопроводности и конвекции. Теплопередача излучением в масляных трансформаторах не учитывается, т.к. масло можно считать непрозрачной средой. В сухих трансформаторах излучение рассчитывается только с поверхности наружных обмоток.

В общем виде теплопередача путем теплопроводности описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье [54, 84]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\Delta T + \frac{q_{\nu}}{c_{\nu}\rho} \tag{1.2}$$

где T = T (x, y, z, τ) – искомая функция температурного поля, которая зависит от координат x,y,z и времени τ ; a – коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость изменения температуры; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; q_v – объемная плотность источников тепловыделения; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; ρ – плотность.

Если температурное поле соответствует стационарному состоянию, т.е. T = T (x, y, z), то дифференциальное уравнение теплопроводности (1.1) превращается в уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0$$
(1.3)

где λ – коэффициент теплопроводности.

Для описания процессов теплопроводности в телах цилиндрической формы, таких как обмотки трансформаторов, широко используется дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda}$$
(1.4)

Для описания процессов теплопередачи путем гравитационной конвекции необходимо связать гидродинамические уравнения движения охлаждающей среды с уравнением теплопроводности. Приведем без вывода уравнения Навье-Стокса для температурного пограничного слоя [102]:

$$\begin{cases} \rho \left(u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x \beta \theta + \mu \left[\Delta u + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} div\omega \right], \\ \rho \left(u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dv}{dz} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y \beta \theta + \mu \left[\Delta v + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial y} div\omega \right], \\ \rho \left(u \frac{dw}{dx} + v \frac{dw}{dy} + w \frac{dw}{dz} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z \beta \theta + \mu \left[\Delta w + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial z} div\omega \right], \end{cases}$$
(1.5)

где ρ – плотность текучей среды; $\vec{\omega} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ – вектор скорости; p = p(x,y,z) – функция давления; $\vec{g} = g_x\vec{i} + g_y\vec{j} + g_z\vec{k}$ – вектор ускорения свободного падения; β – коэффициент объемного расширения текучей среды; Θ – превышение температуры нагретой жидкости над температурой окружающей среды; μ – коэффициент динамической вязкости.

Уравнение неразрывности для стационарного сжимаемого течения:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$
(1.6)

К уравнениям (1.5) и (1.6) следует добавить уравнение энергии, которое при постоянных физических характеристиках с_p, λ и μ принимает вид:

$$\rho c_{p} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^{2} T}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} T}{\partial y^{2}} + \frac{\partial^{2} T}{\partial z^{2}} \right) + u \frac{\partial p}{\partial x} + u \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Phi$$

$$(1.7)$$

где Ф – диссипативная функция, равная:

$$\Phi = 2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2$$
(1.8)

Решение задачи теплообмена в трансформаторах аналитическими методами рассмотрим на примере теплового расчета сухого трансформатора с литой изоляцией ТСЛ-630/10/0,4 Д/У-11. На рис. 1.1. представлен эскиз активной части трансформатора в разрезе.



Рис.1.1. Модель активной части трансформатора сухого типа

Обмотка низшего напряжения (ОНН) – цилиндрическая, слоевая, намотанная из ленты, состоит из двух концентров, разделенных воздушным охлаждающим каналом (рис. 1.2., поз.2). Обмотка высшего напряжения (ОВН) – катушечная, состоит из 4 катушек, намотанных из прямоугольного провода (рис. 1.2., поз. 3). Катушки ОВН залиты трехкомпонентным эпоксидным компаундом (рис. 1.2, поз.4), служащим изоляционным материалом и придающим дополнительные механические свойства ОВН. ОНН и ОВН расположены на стержнях магнитной системы (рис. 1.2., поз. 1).



Рис.1.2. Фрагмент активной части сухого трансформатора: 1 – магнитная система, 2 – обмотка низшего напряжения (ОНН), 3 – катушка обмотки высшего напряжения (ОВН), 4 – изоляция ОВН: трехкомпонентный эпоксидный компаунд



Рис. 1.3. Расчетная схема для решения задачи теплового расчета активной части сухого трансформатора аналитическим методом.

На рис. 1.3. изображена расчетная схема для решения задачи теплового расчета трансформатора аналитическим методом. Схема состоит из областей, которые обозначены цифрами, и границ областей, которые обозначены буквами. Постановка задачи – осесимметричная.

Обозначения и описание областей и границ расчетной схемы приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Обозначения областей и границ расчетной схемы для теплового расчета активной части сухого трансформатора аналитическим методом

№ области	Описание области	Источники тепловыделения	Границы	Условия н	Тип системы уравнения		
Пограничный слой конвективного движения наружного воздуха		Отсутствуют	a-b	а b ГУ 1 рода ГУ 3 рода		. Навье- Стокса	
				(T=T ₀)	$(q_1 = \alpha_1 \Delta T)$		
1	Изоляционный	отсутствуют	b-c	b	c	Лапласа	
	компаунд			1У 3 рода ($q_1 = \alpha_1 \Delta T$)	1У 2 рода ($q_1 = const$)		
2	Область активного	D1	c-d	c	d	Пуассона	
2	проводника катушки ОВН	11		Γ У 2 рода ($q_1 = const$)	Γ У 2 рода ($q_1 = const$)		
	<u> </u>	отсутствуют		d	e	Лапласа	
3	Изоляционныи компаунд		d-e	Γ У 2 рода ($q_1 = const$)	Γ У 3 рода ($q_1 = \alpha_2 \Delta T$)		
	Воздушный	отсутствуют	e-f	e	f	Навье- Стокса	
4	канал между ОВН и ОНН			ГУ 3 рода $(q_1 = \alpha_2 \Delta T)$	ГУ 3 рода $(q_2 = \alpha_3 \Delta T)$		
5	Наружный концентр ОНН	P2	f-g	f ГУ 3 рода $(q_2 = \alpha_3 \Delta T)$	g ГУ 3 рода (q ₂ = α ₄ ΔT)	Пуассона	
6	Воздушный канал между концентрами ОНН	отсутствуют	g-h	\mathbf{g} ГУ 3 рода $(q_2 = \alpha_4 \Delta T)$	h ГУ 3 рода $(q_3 = \alpha_5 \Delta T)$	Навье- Стокса	
7	Внутренний концентр ОНН	Р3	h-i	h ГУ 3 рода $(q_3 = \alpha_5 \Delta T)$	i ГУ 3 рода (q ₃ = α ₆ ΔT)	Пуассона	
8	Воздушный канал между ОНН и магнитной системой	отсутствуют	i-j	і ГУ 3 рода $(q_3 = \alpha_6 \Delta T)$	j ГУ 3 рода ($q_4 = \alpha_7 \Delta T$)	Навье- Стокса	
9	Магнитная система	Р4	j-k	ј ГУ 3 рода $(q_4 = \alpha_7 \Delta T)$	k ГУ 2 рода $(q_4 = const)$	Пуассона	

Аналитическое решение систем уравнений табл. 1.1. для каждой области в пределах расчетной секции дает распределение температуры T (r), указанное на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Распределение температуры в пределах расчетной секции T (r) (в качественном виде): t_0 – температура окружающей среды, °C; t_1 – температура в центре главного канала, °C; t_2 – температура на поверхности обмотки BH, °C; t_3 – температура в центре тепловыделения катушки обмотки BH, °C; t_4 – температура в центре тепловыделения внутреннего концентра обмотки HH, °C.

Уравнение Пуассона (1.4) в осесимметричной постановке принимают вид, где температура изменяется только в радиальном направлении

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = -\frac{q_v}{\lambda}$$
(1.9)

Уравнение (1.9) является неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка и может решаться, например, методом Лагранжа (методом вариации произвольной постоянной).

В части конвективной теплопередачи в пределах расчетной секции движение среды ламинарное и при постоянных коэффициентах λ аналитически получаются зависимости T(r) (рис. 1.4).

Решение задачи исследования теплового состояния обмоток трансформатора в осесимметричной постановке с учетом конечной высоты обмотки требует представления температуры в виде функции двух координат, т.е.

$$T = T(r, z). \tag{1.10}$$

Для нахождения зависимости (1.10) следует использовать численные методы, например метод конечных разностей или конечных элементов.

Для учета влияния обмоток других фаз, расположенных на соседних стержнях необходимо решать задачу в плоскопараллельной постановке в координатах х,у. При этом

$$T = T\left(x, y\right) \tag{1.11}$$

Построение расчетной схемы в плоскопараллельной постановке производится аналогичным образом, и решение также находится численным методом.

Осесимметричная и плоскопараллельная двухмерные модели позволяют решать ограниченный круг задач. Для учета всех особенностей тепловых процессов, протекающих в распределительных трансформаторах необходимо решать задачу теплового расчета в трехмерной полевой постановке. Для решения этой задачи, аналитического решения также не существует и следует использовать численные методы.

Задача исследования теплового состояния трансформаторов в трехмерной постановке достаточно



Рис.1.5. Трехмерная модель сухого трансформатора для теплового расчета



Рис.1.6. Сеточная модель сухого трансформатора для теплового расчета в трехмерной полевой постановке

эффективно решается с использованием приложения Solidworks – Flow simulation [104]. Для дискретизации дифференциальных уравнений (1.2) – (1.8) здесь использован метод конечных объемов. Соответственно дискретизация непрерывной математической модели состоит в том, что значения физических переменных рассчитываются (и хранятся) только в центрах расчетных

ячеек, а на гранях этих ячеек рассчитываются потоки массы, импульса, энер-

гии, необходимые для расчета этих значений [104].

Автором установлено, что время одного расчета полной модели сухого трансформатора (рис. 1.5, рис. 1.6.) занимает до 10 часов, в зависимости от разрежения расчетной сетки, а в случае теплового расчета масляного трансформатора, который имеет две систе-



Рис.1.7. Сеточная модель масляного трансформатора для теплового расчета в трехмерной полевой постановке

мы охлаждения (внутреннюю и внешнюю), задача становится нерешаемой. Это связано с чрезвычайно сложной геометрией масляного трансформатора (рис. 1.7.) и необходимости мелкого дробления сетки в относительно большой области. Например, габаритные размеры трансформатора ТМГ-1000/10 (рис. 1.7.): 1710х1100х1785 мм. Объем расчетной области (с учетом окружающей среды): $2000 \times 1500 \times 2000 = 6 \cdot 10^9 \text{ мм}^3$. Толщина гофрированной панели, образующей стенки масляного бака, составляет 1,2 мм. Соответственно, объем расчетной ячейки 1,728 мм³. Число расчетных ячеек: $N_{pc} = 6.10^9 / 1,728$ $= 3,5^{-}10^{9}$. Число решаемых уравнений определяется произведением количества уравнений в системах (1.2) – (1.8) и имеет порядок 10¹⁰. В оптимизационных расчетах распределительных трансформаторов порядок расчета составляет 10⁵ различных вариантов за время расчета. Использование трехмерных полевых моделей в оптимизационных расчетах трансформаторов приведет к увеличению порядка расчета до 10¹⁵. Поэтому при моделировании тепловых полей численными методами постановку задачи необходимо упрощать, вводя определенные допущения, что требует от проектировщика значительного опыта как в плане технологии работы с системой моделирования, так и в плане понимания особенностей математического аппарата, заложенного в ней.

Таким образом, использование аналитических методов в тепловых расчетах трансформаторов ограничено сложностью постановки задачи, а использование численных методов – сложностью в использовании и большими затратами времени расчета и вычислительных ресурсов.

1.2.2. Моделирование тепловых процессов в трансформаторах на основе электротепловой аналогии

Альтернативой рассмотренным методам исследования сложного теплообмена выступают методы, основанные на использовании электрических схем замещения тепловых процессов. Основанием для использования данных методов являются положения теории подобия и изоморфизм уравнений, описывающих тепловые процессы и процессы в электрической цепи. [90]

Под *изоморфизмом* понимается одинаковая форма уравнений, описывающих различные по природе явления. Явления, описываемые изоморфными уравнениями, могут быть *подобными*. Это значит, что между ними может быть установлено взаимно однозначное соответствие, позволяющее распространять выводы, полученные при изучении одного явления, на другое. [90]

Одним из методов, основанных на электротепловой аналогии, является метод теплового расчета на основе электрических схем замещения. Разновидностью данного метода является *метод эквивалентных тепловых схем*, который традиционно используется в тепловых расчетах электрических машин. Основное отличие метода электрических схем замещения (ЭСЗ) от метода эквивалентных тепловых схем (ЭТС) заключается в том, что для реализации метода ЭСЗ можно использовать формализованные методы построения и расчета электрических цепей. [40, 41, 81, 82, 86]

В основе метода электротепловой аналогии лежат следующие положения. Согласно основному закону теплопроводности поток тепла *Q* через про-

извольную изотермическую поверхность *S* прямо пропорционально градиенту температуры *T* в направлении теплового потока

$$\vec{Q} = -\vec{q}S = -\lambda S \vec{\nabla}T, \qquad (1.12)$$

где *q* – поверхностная плотность теплового потока; λ – удельная тепловодность материала.

При одномерном распространении тепла через стенку толщиной b_c уравнение (1.12) может быть преобразовано к виду [87]:

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx} \approx -\lambda S \frac{T_2 - T_1}{b_c} = \lambda S \frac{\Theta}{b_c} = \frac{\Theta}{R_m}, \qquad (1.13)$$

где *x* – направление распространения тепла; T_1 и T_2 – температуры на границах стенки; $\Theta = T_1 - T_2$ – перепад температур на границах стенки;

$$R_m = \frac{1}{\lambda} \frac{b_c}{S} \tag{1.14}$$

- тепловое сопротивление теплопроводности.

Аналогично конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и охлаждающей средой описывается законом Ньютона–Рихмана:

$$Q = qS = \alpha S \left(T_1 - T_2 \right) = \alpha S \Theta = \frac{\Theta}{R_m}, \qquad (1.15)$$

где *α* – коэффициент теплоотдачи поверхности; *Θ* – превышение температуры охлаждаемой поверхности над температурой охлаждающей среды;

$$R_m = \frac{1}{\alpha S} \tag{1.16}$$

- тепловое сопротивление теплоотдачи.

В обоих случаях получаем закон Ома для участка тепловой цепи

$$Q = \frac{\Theta}{R_m} \,. \tag{1.1}$$

7)

Рис. 1.8. Электрическая схема замещения участка тепловой цепи

Дифференциальное уравнение нагрева однородного тела имеет вид

$$Qd\tau = C_m d\Theta + \alpha S d\tau, \qquad (1.18)$$

где τ – время; C_m – теплоемкость.

Данное уравнение можно представить в виде

$$d\Theta = \frac{1}{C_m} \left(Q - \frac{\Theta}{R_m} \right) d\tau \,. \tag{1.19}$$

Это уравнение изоморфно с уравнением электрической цепи, изображенной на рис. 1.8:

$$dU_{c} = \frac{dq_{c}}{C} = \frac{1}{C}i_{c}dt = \frac{1}{C}\left(I - \frac{U_{c}}{R}\right)dt, \qquad (1.20)$$

где U_c – напряжение на конденсаторе; q_c – заряд конденсатора; C – емкость конденсатора; i_c – ток, протекающей через конденсатор; I – ток в ветви с источником тока; R – электрическое сопротивление.

Таким образом, имеем два процесса, описываемых изоморфными уравнениями. Следовательно, можно построить электрическую схему замещения тепловых процессов с масштабами подобия

$$m_P = \frac{I}{Q}, \ m_\Theta = \frac{U_C}{\Theta}, \ m_R = \frac{R}{R_m}, \ m_C = \frac{C}{C_m}, \ m_t = \frac{t}{\tau}.$$
(1.21)

При использовании современных средств численного моделирования электрических цепей все масштабы подобия могут быть принятыми равными единице.

Учитывая дополнительное положение к теоремам подобия, сформулированного В.А. Вениковым [25], можно разбить тепловую цепь на условно однородные элементы, обменивающиеся теплом, для каждого из которых записывается уравнение (1.19), построить электрическую схему замещения (рис. 1.8),



Рис. 1.9. Упрощенная тепловая цепь масляного трансформатора

получив, таким образом, разветвленную электрическую цепь, подобную исходной тепловой системе.

Упрощенная тепловая цепь масляного трансформатора [25] приведена

на рис. 1.9. Здесь P_0 – потери холостого хода; P_k – потери короткого замыкания; R_{cM} – тепловое сопротивление на пути от стали магнитопровода к маслу; R_{oM} – тепловое сопротивление на пути от обмоток к маслу.

Инертность процессов теплопередачи определяется теплоемкостью элементов тепловой цепи. В частности для расчета тепловой цепи рис. 1.9 должны быть рассчитаны теплоемкость стального магнитопровода C_c , тепло-емкость обмоток C_o , теплоемкость трансформаторного масла C_m .



Рис. 1.10. Электрическая схема замещения тепловой цепи трансформатора



Рис. 1.11. Результаты расчета температуры в элементах трансформатора

ЭСЗ тепловой цепи, изображенной на рис. 1.9 [64], созданная в среде математического пакета Simulink, представлена на рис. 1.10. Результаты расчета электрической цепи в среде Simulink представлены на рис. 1.11.

Использование подобных упрощенных моделей тепловых процессов в трансформаторе целесообразно только в случае приблизительной оценки в предварительных расчетах.

Метод ЭСЗ получил широкое распространение в тепловых расчетах электрических машин [17, 83, 99]. В части применения метода ЭСЗ в тепловых расчетах трансформаторов находят место публикации в иностранных источниках [106, 107, 108, 115, 116]. Общей чертой перечисленных работ является тот факт, что каждый элемент электрической машины или трансформатора представлен одним тепловым сопротивлением, которое не всегда учитывает форму элемента, распределение плотности тока в элементе, анизотропные тепловые свойства элементов активной части трансформатора, многослойную структуру материала (особенно в шихтованных магнитных системах и многослойных обмотках трансформаторов).

Для учета перечисленных особенностей предлагаются *разветвленные* электрические схемы замещения(ЭСЗ). Описание и принцип построения разветвленных ЭСЗ на аналоговых вычислительных машинах приведен в работах [37,38]. В работе [38] описано применение разветвленных ЭСЗ к определению температурных полей в роторах и лопатках газовых турбин, тепловых режимов помещений, промерзающих грунтах и решению дргуих тепловых задач. Стоит отметить, что в литературе случаи применения разветвленных ЭСЗ к тепловым расчетам распределительных трансформаторов до появления публикаций [64-79] не встречаются.

Главная особенность такого рода схем – это то, что каждый элемент представлен не одним сопротивлением, а группой контуров, включающих в себя сопротивления, емкости, источники тока. Использование в тепловых расчетах разветвленных ЭСЗ позволит решить задачу повышения эффективности проектирования распределительных трансформаторов путем разработ-

ки уточненных математических моделей и методов теплового анализа для использования их в подсистемах оптимального проектирования трансформаторов с высоким быстродействием по сравнению с подсистемами полевого расчета. Кроме того повышения эффективности проектирования можно достичь путем повышения точности тепловых расчетов трансформатора по сравнению с точностью эмпирических методик на основе РД.

1.3. Обзор эмпирических методик теплового расчета распределительных трансформаторов

1.3.1. Методы расчета потерь энергии в трансформаторе

Расчет теплового состояния трансформатора базируется на расчете потерь холостого хода и короткого замыкания [10, 85, 91].

Расчет потерь холостого хода осуществляется в соответствии с [10]. Для трехфазных трансформаторов с плоской трехстержневой шихтованной магнитной системой потери холостого хода определяется по формуле

$$P_{0} = \left(k_{p}\left(p_{1} \cdot m_{1} + p_{2} \cdot m_{2} + p_{1} \cdot m_{11} \cdot k_{p11}^{y} + p_{2} \cdot m_{22} \cdot k_{p22}^{y} + 1.25 \cdot \left(\frac{1}{3}p_{1} \cdot m_{21} \cdot k_{p21}^{y} + \frac{2}{3}p_{2} \cdot m_{21} \cdot k_{p21}^{y}\right)\right) + \sum_{i=1}^{n_{n}} p_{ni}^{cm} \cdot S_{ni} + \sum_{i=1}^{n_{k}} p_{ki}^{cm} \cdot S_{ki} \left(1 + k_{p}^{m} \cdot \sigma\right) \cdot k_{p}^{\phi} \cdot k_{p}^{n}$$

$$(1.22)$$

Здесь k_p – коэффициент увеличения потерь в стали за счет термической и механической обработки стали; p_i – удельные потери i-ого участка при амплитуде магнитной индукции B_{mi}; m₁ – масса стержневых участков магнитной системы, кг; m₂ – масса участков торцевых ярм, кг; m₁₁, m₂₂, m₂₁ – массы угловых участков, кг; k_{p11}^{y} – коэффициент увеличения потерь в угловых участках с прямыми стыками пластин; k_{p22}^{y} – коэффициент увеличения потерь в угловых участках с косыми стыками пластин; k_{p21}^{y} – коэффициент увеличения потерь в угловых участках с косыми стыками пластин; k_{p21}^{y} – коэффициент увеличения потерь в угловых участках с косыми стыками пластин; k_{p11}^{y} – коэффициент увеличения потерь в угловых участках с комбинированными стыками пластин; p_{ni}^{cm} – потери на единицу сечения в прямом стыке пластин i-ого участка при

амплитуде магнитной индукции B_{mi} ; p_{ki}^{cm} — потери на единицу сечения в косом стыке пластин i-ого участка при индукциях $\frac{B_{m1} + B_{m2}}{2\sqrt{2}}$, $\frac{B_{m2} + B_{m3}}{2\sqrt{2}}$,..., в зависимости от прилегающих к стыку участков стержней или ярм; S_{ni} — площадь сечения магнитной системы в прямом стыке пластин i-ого участка; S_{ki} площадь сечения магнитной системы в косом стыке пластин i-ого участка; n_{n} – число прямых стыков пластин; n_k – число косых стыков пластин; σ – среднее давление опрессовки; k_p^m , – коэффициент увеличения потерь за счет опрессовки и изгиба пластин; k_p^{ϕ} – коэффициент увеличения потерь за счет несоответствия формы сечения ярма форме сечения стержня; k_p^{n} , – коэффициент увеличения потерь за счет перешихтовки верхнего ярма, транспортировки остова и т.д.

Если магнитопровод изготовлен из неотожженных пластин, то

$$k_{p} = \left(k_{p}^{b} + \frac{0.002}{b_{1}}\right) \cdot k_{p}^{T} \cdot k_{p}^{H}$$

$$(1.23)$$

если пластины отожженные, то

$$k_p = k_p^T \cdot k_p^H \tag{1.24}$$

где b_1 – ширина пластины стержня на расстоянии $0,2 \cdot D_{ct}$ от его центра.

Значения коэффициентов k_p^b , $k_p^{\rm T}$, $k_p^{\rm H}$, k_{p11}^y , k_{p22}^y , k_{p22}^y , σ , k_p^m , k_p^{ϕ} выбираются из таблиц, приведенных в [10]. Массы частей магнитопровода рассиитываются исходя из геометрических размеров магнитной системы. Удельные потери определяются по таблицам или графикам, приведенным в [10].

Следует отметить, что методика расчета потерь холостого хода, изложенная в [10], в настоящее время является одной из наиболее точных, не уступая методикам, основанным на полевых расчетах. Поэтому в разрабатываемой системе теплового анализа трансформаторов данная методика используется без принципиальных изменений. Потери короткого замыкания P_{κ} в трансформаторе могут быть разделены на основные и добавочные потери в обмотках, основные и добавочные потери в отводах, потери в стенках бака и других металлических.

Сумма основных и добавочных потерь в обмотке определяется как [85]

$$P_{och} + P_{\partial} = k_{\partial} P_{och}. \tag{1.25}$$

Для определения основных потерь можно воспользоваться формулой

$$P_{oCH} = I^2 R, \tag{1.26}$$

где *I* – ток в обмотке; *R* – сопротивление обмотки.

Средний коэффициент добавочных потерь для обмотки из прямоугольного провода

$$k_{\partial} = l + 1,73 \left(\frac{bm}{l}k_{p}\right)^{2} \left(\frac{f}{\rho}\right)^{2} a^{4} (n^{2} - 0,2), \qquad (1.27)$$

из круглого провода –

$$k_{o} = l + l, 8 \left(\frac{dm}{l}k_{p}\right)^{2} \left(\frac{f}{\rho}\right)^{2} d^{4}(n^{2} - 0, 2), \qquad (1.28)$$

где n – число проводников обмотки в направлении, перпендикулярном к направлению линий магнитной индукции поля рассеяния; m – число проводников обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния; b – размер проводника в направлении, параллельном линиям магнитной индукции поля рассеяния, м; l – общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния, м; l – общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния, м; l – общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния, м; l – общий размер обмотки в направлении, параллельном направлению линий магнитной индукции поля рассеяния, м; d – диаметр круглого проводника, м; k_p – коэффициент приведения поля рассеяния.

1.3.2. Эмпирические методики для теплового расчета трансформаторов

Для теплового расчета масляных трансформаторов в современных САПР обычно используются инженерные методики [6, 9, 11, 12, 13]. Для теплового расчета сухих трансформаторов используются методика [14]. Основой перечисленных методик являются экспериментально установленные зависимости между искомыми превышениями температур обмоток, тепловыми потоками, геометрией обмоток и температурой масла в баке.

Ядром перечисленных методик является зависимость:

$$\Delta t = f\left(q, b, h, t_m\right) \tag{1.29}$$

где q – поверхностная плотность теплового потока; b – ширина обмотки; h – высота обмотки; t_m – температура масла в баке. Значение температуры масла рассчитывается по методикам для расчета системы охлаждения.

Например, превышение средней температуры поверхности внутренней катушечной обмотки над температурой масла в баке по [13]:

$$\Delta t_n = 1.502q^{0.6} \left(\frac{b}{h}\right)^{0.25} b_{\mathcal{B}}^{-0.26} b_{\mathcal{H}}^{-0.21} t_m^{-0.3}$$
(1.30)

превышение средней температуры цилиндрической обмотки над средней температурой масла в баке

$$\Delta t_n = 1.54q^{0.6}(b_{\theta} + b_{\theta})^{-0.35}t_m^{-0.21}$$
(1.31)

где b_{s} – ширина внутреннего вертикального охлаждающего канала, мм; b_{μ} – ширина наружного вертикального охлаждающего канала, мм

Таким образом, для каждого типа обмоток используется определенная зависимость, полученная в результате экспериментальных исследований.

Для расчета обмоток сухих трансформаторов [14] используются следующие зависимости

$$\Delta t_j = \left(\frac{P_{K3}}{Z}\right)^{0.766} \tag{1.32}$$

где *P*_{к3} – потери КЗ в соответствующих обмотках, Вт.

Тепловое сопротивление обмоток Z определяется [14] по формуле:

$$Z = 1.97 \left(\frac{b_{\theta}^{0.4}}{h_{\theta}^{0.25}} S_B + \frac{b_{H}^{0.4}}{h_{H}^{0.25}} S_H \right) + k_r S_T$$
(1.33)

где h_{g} – осевой размер внутреннего вертикального охлаждающего канала, мм; h_{H} – осевой размер наружного вертикального охлаждающего канала,

мм; S_B – площадь внутренней теплоотдающей поверхности обмоток, м²; S_H – площадь наружной теплоотдающей поверхности обмоток, м²; S_T – площадь торцовой теплоотдающей поверхности обмоток, м²; k_r – коэффициент эффективности отдачи тепла лучеиспусканием и конвекцией с торцовых частей.

Для расчета превышения температур остова используются те же зависимости (1.31, 1.32) без учета различий в геометрии и теплофизических свойствах обмоток и остова, что дает значительные погрешности при сравнении результатов расчета и испытаний.

Использование данных методик при тепловом расчете фольговых обмоток, как будет показано в последующих главах настоящей диссертации, дает существенные погрешности, в некоторых случаях погрешность может составлять десятки градусов, в связи с чем актуальной является разработка уточненной тепловой модели обмоток трансформаторов, которая будет учитывать особенности фольговых обмоток, а также конвективную составляющую процессов теплопередачи в трансформаторе.

Методики, предлагаемые в РД, разрабатывались в конце 80-х годов и позволяют делать некоторую усредненную оценку теплового состояния трансформатора, которая обязательно должна проверяться на физическом образце и корректироваться на каждом предприятии-изготовителе с учетом технологических особенностей. Такие методики не дают картину температурного поля в трансформаторе, не дают также понимания о местонахождении наиболее нагретой точки. Они могут выступать в качестве моделей для использования в подсистемах оптимизации расчетов, но только для предварительного расчета или для определения стартовой точки оптимизации.

1.4. Теоретическое обоснование компонентного состава и структуры подсистемы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов

Формулы (1.27) – (1.28) являются приближенными и не учитывают неоднородного характера магнитного поля рассеяния. Особенно значительные погрешности данная методика дает в случаях, когда неоднородность магнитного поля приводит к неравномерному распределению токов по различным элементам обмотки. Подобные ситуации могут возникать, в частности, в случае обмоток, которые мотаются несколькими параллельными проводниками, особенно в случае винтовых обмоток, где неодинаковость расположения параллельных проводников в магнитном поле при несовершенной транспозиции проводников приводит к неравенству полных сопротивлений параллельных ветвей обмотки. Еще более существенные погрешности возникают при расчете добавочных потерь в фольговых обмотках.

Первые публикации об исследовании эффекта вытеснения тока к торцам в фольговых обмотках в иностранной литературе встречаются, начиная с конца 1960-х годов, например [111], в отечественной литературе этому вопросу посвящены работы, относящиеся к концу 1970-х, началу 1980-х гг. [49, 50]. В настоящее время интерес к исследованию данного эффекта растет [29, 94, 97, 105]. Наиболее эффективным методом расчета добавочных потерь в обмотках из ленты, с точки зрения точности, является метод расчета электромагнитного поля на основе метода конечных элементов в комбинации с расчетом электрической схемы замещения обмотки.

В частности, в работе [29] представлена методика расчета токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты, построенная на основе комбинированной математической модели электромагнитных процессов. Данная модель строится на следующих положениях:

1. Каждый концентр обмотки реактора условно разбивается на параллельно соединенные расчетные секции. При этом электрическая схема замещения каждой катушки обмотки принимает вид рис. 1.12.

$\left[\right]$		\$ i ₈₂		i₃4	is d	i _{so} o	i _®)ů	i _{®®} 0	i _®)	i ₂₀ 0	i ₉₁	9
	1	φ ^{'i} ₇₂)	₫ iŋ3)₫	i ₇₄)	i75)0	i76)₫	in) Ø	i ₇₈) (i79)0	i₀)¢	i ₈₁)	8
		₫ ¹ 62	₫ ⁱ ₅3¢	i ₆₄	i _{s5} 0	i₀o	igo	i ₆₈ 0	i	i700	i71)0	7
		\$ i52	₫ i₅3¢	iza)	i550	i ₅₀ 0	in	i ₅₈ 0	ig Ø	i₀Ŏ	i ₆₁	6
🗇 u(t)		(i42)		, i₄)¢	i450	i460	i₄)Ŏ	i48	i ₄)0	i500	i510	5
		(i32)	₿ i33€	, i34)0	i350	i360	i370	i38	i390	i400	i410	4
ip		(i22)	¢ i23¢	i24	i250	i260	i27)0	i28	i290	i300	i31)	3
	i,)	(i12)		i14	i150	i160	i170	i18	i190	i200	i210	2
		(i_2)	₫ i₃)¢	j i₄)∲	i5)¢	i Ø	i7)	i ₈)∲	i) Ø	i100	i11	1
		1	2 3	4	5	6	7	8	9	10	11	

Рис.1.12. Схема замещения катушки реактора из ленты [рис. по 94] 2. ЭДС, наводимые в расчетных секциях (см. рис. 1.12), представляются в виде

$$e_{sk} = -\frac{d\Psi_{sk}}{dt} = -\frac{\partial\Psi_{sk}}{\partial i_a}\frac{di_q}{dt} = -L_{sk,q}\frac{di_q}{dt},$$
(1.34)

где Ψ_{sk} – потокосцепление секции в *s*-м слое *k*-й колонке с общим магнитным полем катушки; i_q – ток q-го контура; $L_{sk,q}$ – взаимная индуктивность секции с индексами *sk* с током q-го контура.

3. На основе результатов расчета магнитного поля катушки при заданных токах в разных контурах рассчитывается матрица индуктивностей. При этом система уравнений, описывающая схему замещения катушки реактора, принимает вид

$$\begin{cases} \sum_{q=1}^{n} \left(\sum_{s=1}^{ns} L_{s1,q} \right) \frac{di_{q}}{dt} = u(t) - i_{1} \cdot \sum_{s=1}^{ns} R_{s1} + \sum_{s=1}^{ns} \sum_{r=2}^{nk} R_{s1} \cdot i_{fp(s,r)} \\ \sum_{q=1}^{n} \left(L_{sk,q} - L_{s1,q} \right) \frac{di_{q}}{dt} = R_{s1} \cdot i_{1} - R_{sk} \cdot i_{fp(s,k)} - R_{s1} \cdot \sum_{r=2}^{nk} i_{fp(s,r)} \Big|_{k=2}^{k=nk} \Big|_{s=1}^{s=ns} \end{cases}$$
(1.35)

В матричной форме система (1.35) имеет вид

$$\left[\frac{di}{dt}\right] = \left[L\right]^{-1} \cdot \left[U\right] \tag{1.36}$$

где [L] – квадратная матрица индуктивностей; $\left[\frac{di}{dt}\right]$ – вектор производных от контурных токов по времени; [U] – вектор падений напряжений в контурах.

Решение системы (1.36) методом Рунге-Кутта дает кривые изменения контурных токов во времени. По истечении времени переходного процесса определяются действующие значения токов в секциях, по которым находятся распределение добавочных потерь по высоте обмотки

$$[P] = [R] [I^2]$$
(1.37)

где [P] – вектор потерь в секциях обмотки; [I²] – вектор квадратов токов в секциях; [R] – матрица омических сопротивлений секций.

Полные потери в обмотке определяются суммированием элементов вектора [P].

В связи с тем, что токоограничивающий реактор не имеет магнитного сердечника, то потери, выделяемые в секциях, обусловлены магнитным полем рассеяния. Для расчета нагрузочных потерь в трансформаторе необходимо учитывать влияние магнитной системы, а также влияние обмотки высшего напряжения (BH) (обычно обмотки из ленты выполняются для стороны низшего напряжения (HH)). В случаях, когда обмотка BH также выполняется из ленты (фольги), необходимо также учитывать эффект вытеснения тока в этих обмотках. Если обмотки выполняются из нескольких параллельных проводников, необходимо учитывать положение витков каждой параллельной ветви в неоднородном магнитном поле рассеяния трансформатора.

Таким образом, для проведения полного теплового анализа трансформатора с учетом всех эффектов неравномерного распределения источников тепловыделений, имеющих место из-за неоднородности магнитного поля, необходима разработка программного обеспечения, компонентный состав и структура которого представлена на рис. 1.13.


Рис.1.13. Компонентный состав и структура системы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов.

Подсистема параметрической генерации и расчета магнитного поля трансформатора основана на использовании динамически подключаемой библиотеки моделирования магнитного поля методом конечных элементов [87, 92] и предназначена для расчета матрицы собственных и взаимных индуктивностей, которая входит в состав исходных данных для расчета распределения токов в обмотках и потерь энергии в трансформаторе.

Подсистема генерации модели и расчета распределения тока и потерь энергии в трансформаторе основана на использовании динамически подключаемой библиотеки моделирования электрических цепей [86] и предназначена для расчета распределения токов в обмотках и потерь энергии в трансформаторе с учетом неоднородности магнитного поля.

Подсистема параметрической генерации и расчета тепловой модели трансформатора на основе ЭСЗ основана на использовании параметрического генератора тепловой модели трансформатора на основе электротепловой аналогии путем построения электрических схем замещения, формируемых и рассчитываемых с помощью динамически подключаемой библиотеки моделирования электрических цепей [86]. Данная подсистема предназначена для автоматического формирования цепной модели и теплового расчета трансформатора, результатом которого является распределение значений температуры в интересующих сечениях. Подсистема может быть использована как на стадии поиска оптимального решения, так и при сравнении различных вариантов спроектированного трансформатора.

Подсистема теплового расчета трансформатора на основе полевых моделей основана на использовании численных моделей теплового поля

37

трансформатора, формируемых и рассчитываемых с помощью современных САЕ-систем, в целях уточнения информации о тепловом состоянии оптимального варианта спроектированного трансформатора и принятия окончательного решения по соответствию его техническим нормам.

Использование описанного компонентного состава и структуры позволит оптимальным образом организовать рабочее место проектировщика, обеспечив его инструментами, помогающими всесторонне оценить принимаемые технические решения. Данные инструменты даже на стадии оптимизации способны обеспечить высокую точность тепловых расчетов, граничащую с точностью полевых расчетов (погрешность в отдельных точках в пределах 5%), при высоком быстродействием, присущим цепным моделям.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. Методы решения задач теплового расчета распределительных трансформаторов на основе трехмерного полевого моделирования обладают высокой точностью, но низким быстродействием, поэтому не могут быть использованы в процессе оптимизации трансформаторов.

2. Эмпирические методики на основе руководящих документов обладают высоким быстродействием за счет простоты используемых зависимостей между средними превышениями температур обмоток трансформатора над температурой охлаждающей среды и геометрическими параметрами, но не учитывают эффекты в обмотках, связанные с неоднородностью магнитного поля, что позволяет говорить о невысокой точности расчетов.

3. В связи с этим актуальной является задача разработки уточненных тепловых моделей на основе электротепловой аналогии, которые лягут в основу быстродействующих подсистем теплового расчета САПР трансформаторов с высокой точностью расчетов для работы с подсистемами оптимизации конструкции трансформаторов.

4. Необходима разработка методов параметрической генерации и численного исследования уточненных тепловых моделей на основе электротепловой аналогии.

5. Необходима разработка подсистемы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов на основе использования уточненных математических моделей, в которой максимально автоматизированы операции параметрической генерации и численного исследования по заданным типовым программам уточненных цепных моделей трансформатора.

39

2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА

Эмпирические методики расчетов потерь энергии в трансформаторах электромагнитных, приведенные в 1.2.3, были разработаны в 1980-х годах на основе упрощенных моделей и экспериментальных исследований. За это время в трансформаторостроении были внедрены новые технологии и материалы. Так как в современных экономических условиях нет возможности проводить экспериментальные исследования, особенно в рамках предприятий малого и среднего бизнеса, то основной акцент при разработке новых математических моделей для подсистемы поверочных расчетов трансформатора сегодня делается на полевых моделях. В свою очередь, модели, основанные на расчете трехмерных физических полей, как известно, не могут быть использованы в подсистеме оптимизации трансформатора, так как расчет полевых моделей современными средствами требует больших затрат времени и вычислительных ресурсов. Поэтому было решено остановиться на разработке моделей, основанных на результатах расчета двухмерных физических полей, в частности, модели стационарного магнитного поля.

2.1. Разработка математической модели для расчета распределения потерь энергии в обмотках трансформатора

Как известно [30 и др.], для экспериментального определения потерь короткого замыкания (КЗ) трансформатора применяется *опыт КЗ*, который проводится при замкнутых накоротко вторичных обмотках и подаче на концы первичной обмотки пониженного напряжения (напряжения короткого замыкания, U_k, B), при котором по обмоткам протекают номинальные токи. Упрощенная схема замещения трансформатора в опыте КЗ приведена на рис. 2.1.

40



Рис. 2.1. Упрощенная схема замещения трансформатора в опыте КЗ: <u>U</u>₁ – действующее значение напряжения, подаваемого на концы первичной обмотки (напряжение КЗ); <u>Z</u>₁ – полное сопротивление первичной обмотки; <u>Z</u>'₂ – приведенное полное сопротивление вторичной обмотки; <u>Z</u>_{1K} = <u>Z</u>₁ + <u>Z</u>'₂ – полное сопротивление КЗ; <u>I</u>₁ – действующее значение тока первичной обмотки, равное по модулю, но обратное по знаку действующему значению приведенного тока <u>I'</u>₂ вторичной обмотки; <u>E</u>₁ – действующее значение ЭДС взаимной индукции в обмотках трансформатора в режиме КЗ (рис. по [30])

В качестве наиболее сложного для моделирования примера исполнения обмотки трансформатора будем рассматривать фольговую (ленточную) обмотку НН, характер протекания тока в которой определяется эффектом вытеснения тока к торцам обмотки [29, 50, 93].

Так как на вытеснение тока в обмотке НН влияют потоки рассеяния, то эпюру распределения плотности тока в ней удобнее рассчитывать путем моделирования опыта короткого замыкания трансформатора. При этом током в ветви намагничивания, а следовательно, и самой ветвью намагничивания в схеме замещения трансформатора можно пренебречь. ОВН в данной схеме замещения (принимаем, что обмотка ВН является слоевой с числом параллельных проводников $N_{n2} = 1$) представлена приведенным сопротивлением

$$R'_{2} = R_{2} \left(\frac{W_{1}}{W_{2}}\right)^{2}$$
(2.1)

и приведенной ЭДС

$$E'_{2} = E_{2} \frac{W_{1}}{W_{2}}$$
(2.2)

где R_2 и E_2 – реальные значения сопротивления и ЭДС ОВН соответственно (вытеснением тока в ОВН при данной постановке задачи пренебрегаем); W_1 и W_2 – число витков в ОНН и ОВН соответственно.

На рис. 2.2. представлена разветвленная электрическая схема замещения (ЭЗС) первичной и вторичной обмоток трансформатора в опыте КЗ, на которой обмотка НН представлена совокупностью ветвей, включающих в себя набор активных и реактивных сопротивлений по аналогии с [29].



Рис. 2.2. Разветвленная электрическая схема замещения обмоток трансформатора в режиме КЗ: ветви ЭСЗ обмотки НН с номерами в кружках с 1 по 33 – активные сопротивления секций $R_{k,j}$, Ом; ветви с номерами в кружках с 35 по 67 – реактивные (индуктивные) сопротивления секций $X_{Lk,j}$, Ом; ветвь с номером 34 – активное сопротивление обмотки ВН R_2 , Ом; ветвь с номером 68 – реактивное (индуктивное) сопротивление обмотки ВН X_2 , Ом; ветвь с номером 69 в кружке – ЭДС, равная значению приложенного напряжения в опыте КЗ, В; номерами без кружочков обозначены узлы разветвленной схемы замещения.

Здесь ленточный (фольговый) проводник, которым наматывается обмотка НН, условно разбит на расчетные участки определенной конечной длины. Расчетный участок может состоять ИЗ нескольких витков. образующих концентр, или из одного витка или даже части витка. В частности, на рис. 2.2 обмотка НН, состоящая из трех концентров, разбита на три расчетных участка, соответствующих этим концентрам. В пределах расчетного участка лента условно разбивается на N_s элементарных ЭСЗ С параллельных лент, образующих расчетные ветви обмотки. незначительной погрешностью можно считать, что в пределах расчетного участка параллельные ленты электрически не контактируют друг с другом через торцевые поверхности, и контакт осуществляется только на границах расчетных участков. В определенном смысле это соответствует методу сеток.

42

В частности, в модели на рис. 2.2. каждый из $N_c = 3$ концентров ОНН условно разбит на $N_s = 11$ соосных расчетных секций (катушек, галет), соединенных параллельно. Это допущение приемлемо, так как элементарные токи, протекающие по сечению ленты на незначительном участке длины, можно считать параллельными. Протекание тока по нескольким параллельно соединенным лентам тождественно протеканию тока по сплошной ленте.

Обозначим через $N_v = N_s \cdot N_c + 1$ количество расчетных ветвей ЭСЗ, под которыми будем понимать расчетные секции ОНН или обмотку ВН, представленные на ЭСЗ отдельными ветвями электрической цепи.

Активное сопротивление k-й расчетной ветви, образованной расчетной секцией ОНН определяется по формуле

$$R_k = \rho \frac{\pi D_k}{dh W_k} , \qquad (2.3)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника, Ом'м; D_k , W_k – соответственно средний диаметр концентра и число витков в концентре, которому принадлежит k-я расчетная секция, м; d – толщина фольгового проводника, м; h – высота обмотки, равная ширине фольги, м; N_s – число секций, на который разбит каждый концентр.

Кроме того, в каждой расчетной ветви наводится ЭДС

$$e_k = -\frac{d\Psi_k}{dt} = -\mathbf{L}_k \frac{d}{dt} \mathbf{i}, \qquad (2.4)$$

где Ψ_k – потокосцепление *k*-й расчетной ветви ЭСЗ с общим магнитным полем обмотки; **i** – матрица-столбец мгновенных значений токов в расчетных ветвях ЭСЗ обмоток трансформатора в опыте КЗ; **L**_k – матрица-строка индуктивностей *k*-й расчетной ветви ЭСЗ (на рис. 2.2 элементы, соответствующие матрицам **L**_k условно изображены значками индуктивности).

Главная проблема такой модели состоит в необходимости точного расчета полной матрицы взаимных индуктивностей **L**, каждая k-я строка которой является матрицей \mathbf{L}_k . Полная матрица **L** имеет размер $N_v \times N_v$. Данная матрица может быть рассчитана с учетом наличия магнитного сердечника и бака трансформатора с помощью библиотеки численного моделирования магнитного поля MKELib, также разработанной в ИГЭУ [31, 86, 91]. Данная библиотека была использована при решении широкого класса задач расчета магнитного поля, в частности, при расчете динамических режимов асинхронных двигателей, динамических режимов трансформаторов [34], при расчете токоограничивающих реакторов [29] и других прикладных задач.

В связи с тем, что ветвь намагничивания в режиме КЗ отсутствует, то задача сводится к расчету поля рассеяния трансформатора в режиме КЗ. Расчетная область конечно-элементной модели трансформатора представлена на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Эскиз модели трансформатора для конечно-элементного расчета магнитного поля: 1 – крышка бака; 2 – стенка бака; 3 – обмотка BH; 4 – обмотка HH; 5 – дно бака; 6 – стержень магнитной системы; b – расстояние от оси стержня магнитопровода до стенки бака, м; hy – расстояние от верхнего ярма до крышки бака, м; Lc – длина стержня с ярмами, м; hd – расстояние от нижнего ярма до дна бака, м; r1 – наружный радиус обмотки HH, м; r2 – наружный радиус обмотки BH, м.



Рис. 2.4. Фрагмент конечно-элементной модели активной части трансформатора, с расположенными на нем обмотками НН и ВН в системе моделирования магнитного поля MKELib: 1 – обмотка ВН, 2 – обмотка НН, 3 – стержень магнитной системы.

В качестве допущения примем, что магнитное поле полостью вытесняется из железных стенок, дна и крышки бака масляного трансформатора. Поэтому на границах расчетной области, совпадающей с внутренней поверхностью бака, ставятся граничные условия Дирихле. Отличие расчетной области для сухого трансформатора состоит в том, что ее границы с условиями Дирихле отодвигаются на расстояние, в 8 – 10 раз превышающее размер магнитной системы. Фрагмент конечно-элементной модели активной части трансформатора приведен на рис. 2.4. Результат расчета конечно-элементной модели активной части масляного трансформатора при наличии тока в обмотке ВН показан на рис. 2.5.



Рис. 2.5. Результаты расчета магнитного поля конечно-элементной модели активной части масляного трансформатора

Приведенная модель отличается от модели токоограничивающего реактора [29, 93] следующим:

- магнитное поле реактора обусловлено протеканием тока в одной фазной катушке реактора, а магнитное поле активной части трансформатора формируется в результате взаимодействия токов обмоток НН и ВН, которые в опыте КЗ текут практически в противофазе, что существенно ослабляет результирующее поле;
- 2) в модели трансформатора присутствует магнитопровод;
- 3) в модели масляного трансформатора присутствует бак.

Таким образом, для расчета распределения тока нагрузки в активной части сухих и масляных трансформаторах с обмотками из ленты

предлагается использование комбинированной модели, состоящей из двух взаимосвязанных блоков (рис. 2.7):

- конечно-элементная модель для расчета магнитного поля, результатом которого является матрица собственных и взаимных индуктивностей рассматриваемой модели;
- цепная модель (рис. 2.2) для расчета разветвленной электрической схемы замещения, результатом которого является матрица токов в ветвях схемы замещения и матрица соответствующих нагрузочных потерь в обмотках из ленты.



Рис. 2.7. Структура комбинированной модели для расчета нагрузочных потерь в обмотках из ленты

После расчета цепной модели получаем закон изменения во времени токов i_k(t) во всех расчетных ветвях электрической цепи, по которым рассчитывается вектор потерь

$$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \begin{cases} I_1^2 \\ I_1^2 \\ \\ \vdots \\ I_1^2 \\ I_1^2 \end{cases}, \qquad (2.5)$$

где **R** – диагональная матрица сопротивлений электрической цепи; элементы вектора квадратов действующих значений тока в каждой k-й расчетной ветви рассчитывается по формуле

$$I_k^2 = \left(\frac{\max(i_k)}{\sqrt{2}}\right)^2 \bigg|_{t \to \infty},$$
(2.6)

где $\max(i_k)$ – амплитудное значение k-го тока в установившемся режиме.

Так как в опыте КЗ магнитный поток в магнитопроводе пренебрежительно мал и процессы в обмотках определяются главным образом потоками рассеяния, то задачу моделирования данных процессов можно считать линейной. Это позволяет существенно сократить время расчета ЭСЗ, воспользовавшись аппаратом комплексных чисел, что позволяет рассчитать действующие значения токов в расчетных ветвях ЭСЗ за одну итерацию, то есть без интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих ЭСЗ в переходных режимах.

Преимущества использования предлагаемой комбинированной модели:

1. Модель, позволяющая осуществлять расчет обмоток трансформатора с учетом особенностей конструкции, что характерно для полевых моделей, в то же время обладает быстродействием, характерным для цепных моделей.

2. Модель позволяет рассчитывать переходные процессы, то есть решать задачи, аналогичные задачам расчета нестационарных полей.

3. Модель позволяет учитывать влияние взаимных индуктивностей элементов друг на друга.

Следует отметить, что разрабатываемая модель может быть использована не только для анализа процессов в фольговых обмотках, но и для анализа процессов в любых обмотках, отдельные элементы которой находятся в разных электромагнитных условиях. Принципы формирования модели здесь те же, что и в рассмотренной модели фольговой обмотки.

Для нахождения распределения токов в схеме на рис. 2.2 можно использовать *метод контурных токов*, как при расчете токоограничивающего реактора [29,94]. Однако здесь возникает проблема сложности формирования системы уравнений, описывающей ЭСЗ, которая может содержать сотни уравнений. Причем любые изменения в структуре ЭЗС требуют трудоемкой процедуры перестройки данной системы уравнений. Для построения и исследования модели электрической цепи можно также воспользоваться современными пакетами, такими как Simulink, Electronics WorkBench и т.п. Однако при этом возникает проблема построения в интерактивном режиме графиче-

47

ской модели электрической цепи, что при большом количестве однотипных элементов также является весьма трудоемкой процедурой.

Поэтому актуальной является проблема разработки универсальной библиотеки, обеспечивающей возможность автоматизации формирования и исследования моделей электрических цепей по заданным алгоритмам. Такая библиотека, получившая название ECLib (Electrical Circuit Library), была разработана в ИГЭУ при участии автора данной диссертации [40, 41, 42, 64, 93]. Личный вклад автора в создание библиотеки ECLib состоит в разработке алгоритмов и программировании в среде MatLab универсальных процедур построения и решения системы уравнений, описывающей переходные и установившиеся процессы в электрической цепи, адаптации библиотеки к решению задач с использованием аппарата комплексных чисел, разработке методологии параметрической генерации и программируемого исследования цепных моделей [64-69], отладке библиотеки на конкретных моделях трансформаторов [64], а также разработке механизма ввода данных и вывода результатов расчета в табличном и графическом виде [66, 67], удобном для последующего анализа.

2.2. Разработка алгоритмов формирования и решения системы уравнений электрической цепи методом переменных состояния

Наиболее эффективным способом решения задачи расчета электрической цепи является использование формализованных методов, основанных на теории графов, в частности *метода переменных состояния (смешанных величин*). В основе реализованной в библиотеке ECLib версии метода лежит математический аппарат, приведенный в [56], переработанный и адаптированный для компьютерной реализации в [96].



Рис. 2.8. Электрическая цепь (а), ее граф (б) и матрица соединений (в) [рис. по 96]

Математический аппарат библиотеки ECLib рассмотрим на примере электрической цепи, изображенной на рис. 2.8,а, которая может быть представлена в виде графа (рис. 2.8,б), содержащего р ветвей и q узлов, пронумерованных в общем случае в произвольном порядке.

В общем случае каждая ветвь графа соответствует одному из пяти типов элементов: сопротивление (R), емкость (C), индуктивность (L), источник тока (I) и источник ЭДС (E). Ветви R, L, I характеризуется сопротивлениями и называются *z-ветвями*, а ветви C, E – проводимостями и называются *y-ветвями*. Жирными линиями на рис. 2.8,6 выделены верви, входящие в дерево графа, под которым понимается подграф, не имеющий замкнутых контуров. Ветви дерева называются собственно *ветвями*, а ветви графа, не вошедшие в дерево, – связями. В связи с этим можно выделить *z-ветви* и *y-ветви* дерева, а также *z-связи* и *y-связи* графа.

По заданному графу строится *матрица соединений* **A** (рис. 2.8,в) размером $q \times p$. Столбцы матрицы **A** соответствует ветвям графа, строки – узлам. Если ток j-й ветви вытекает из i-го узла, то $A_{ij} = 1$, если втекает, то $A_{ij} = -1$. Для остальных узлов (строк) $A_{ij} = 0$.

Помимо матрицы соединений для электрической цепи строится *матрица номиналов* V размером р × р. При отсутствии взаимных индуктивностей и взаимных емкостей матрица V имеет диагональную структуру с диагональными элементами, равными номиналам соответствующих элементов (ветвей). При наличии взаимных индуктивностей и взаимных емкостей в матрице V появляются ненулевые недиагональные элементы, например $L_{ii} = L_{ii} \neq 0$, если элементы, соответствующие і-й и ј-й ветвям являются контурами с током, индуктивно связанными друг с другом посредством магнитного поля.

При формировании матрицы V все номиналы индуктивностей и взаимных индуктивностей, а также емкостей и взаимных емкостей умножаются на мнимую единицу. Это позволяет в дальнейшем при формировании системы уравнений электрической цепи избежать суммирования номиналов разной природы, например, сопротивлений R и индуктивностей L, так как при сложении получается комплексное число, из которого можно выделить оба номинала в виде вещественной и мнимой части комплексного числа.

Следует отметить, что библиотека ECLib может использоваться как для расчета электрической цепи в динамических режимах, так и для расчета установившихся режимов на переменном токе. При этом расчет ведется с использованием комплексных чисел. При этом все номиналы индуктивностей, взаимных индуктивностей, емкостей и взаимных емкостей умножаются на $j\omega$, где $\omega = 2\pi f - y$ гловая частота; f = 50 Гц – частота тока в цепи.

Кроме того, по графу электрической схемы строится вектор типов элементов **T** размером $p \times 1$. Каждому элементу электрической цепи здесь соответствует номер типа в соответствии с таблицей 2.1.

Тип элемента	Номер, соответствующий типу
Источник ЭДС	1
Электрическая емкость	2
Сопротивление	3
Индуктивность	4
Источник тока	5

Таблица 2.1. Номера, соответствующие типам элементов электрической цепи

Алгоритм построения системы уравнений электрической цепи разбит на два этапа. На первом этапе осуществляются преобразования, которые можно реализовать только один раз перед численным интегрированием системы уравнений. На втором этапе система уравнений окончательно достраивается с учетом значений номиналов элементов, которые могут изменяться во времени по заданным алгоритмам. Поэтому второй этап реализуется многократно на каждом шаге численного интегрирования по времени. Такой прием позволяет решать задачи моделирования электрической цепи с учетом нелинейности характеристик элементов.

Первый этап построения системы уравнений включает в себя ряд преобразований матриц **A**, **V** и **T**:

1.1. Рекурсивный поиск по матрице **A** столбцов, соответствующих элементам, принадлежащим отдельным автономным (не связанным друг с другом) цепям. Перестановка столбцов и строк в целях придания матрице **A** блочной структуры вида

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{2} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}_{N_{c}} \end{bmatrix},$$
(2.7)

где A_k – матрица соединений k-й автономной цепи; **0** – матрица, заполненная нулями; N_c – количество автономных цепей.

При наличии индуктивной связи между контурами с током, входящими в разные автономные цепи, в подматрицах **0** появляются ненулевые элементы, связывающие эти цепи между собой посредством взаимной индукции. Аналогичные элементы появляются при наличии взаимных емкостей.

Следует отметить, что любые перестановки столбцов и строк в матрице А здесь и далее требуют соответствующих перестановок в матрице номиналов V и матрице типов элементов **T**.

1.2. Перестановка столбцов в подматрицах A_k по типам и номиналам элементов. Эта операция соответствует перенумерации ветвей графа в целях оптимизации процедуры построения дерева графа, удовлетворяющего требованиям метода переменных состояния. Сначала нумеруются Е-ветви, затем С-ветви, R-ветви, L-ветви и, наконец, I-ветви. При этом Е-, С- и R-ветви нумеруются в порядке убывания значений соответствующих номиналов, а L- и I-ветви – в порядке возрастания номиналов. Это вызвано тем, что некоторые столбцы в итоговой матрице будут исключены и нужно, чтобы в число исключенных столбцов, по возможности, попали элементы с малыми номиналами (для R-ветвей наоборот), которые вносят большую погрешность в численное интегрирование итоговой системы дифференциальных уравнений.

1.3. Формирование дерева графа для каждой подматрицы A_k . Для этого организуется рекурсивный цикл поиска по ветвям графа, включающий в дерево все ветви по ходу поиска, кроме тех, которые образуют замкнутые контуры с ветвями, уже вошедшими в дерево. При правильной нумерации ветвей, полученной в п. 1.2, в дерево при этом войдут все у-ветви графа, за исключением тех, которые образуют замкнутые контуры (например, в случае трех конденсаторов, соединенных в треугольник, в дерево не включается ветвь с наименьшим номиналом). Кроме того, в дерево могут входить R-ветви. В редких случаях в дерево могут войти некоторые L-ветви.

Перестановка столбцов в подматрицах A_i по результатам формирования деревьев (сначала нумеруются у-ветви дерева, затем у-связи, z-ветви дерева и, наконец, z-связи). В результате каждая подматрица A_i приобретает вид

$$\mathbf{A}_{k} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ky1} \ \mathbf{A}_{ky2} \ \mathbf{A}_{kz1} \ \mathbf{A}_{kz2} \end{bmatrix},$$
(2.8)

где A_{kyl} – подматрица матрицы A с количеством столбцов y_{lk} , соответствующая у-ветвям дерева; A_{ky2} – подматрица матрицы A с количеством столбцов y_{2k} , соответствующая у-связям; A_{kzl} – подматрица матрицы A с количеством столбцов z_{lk} , соответствующая z-ветвям дерева; A_{kz2} – подматрица матрицы A с количеством столбцов z_{lk} , соответствующая z-ветвям дерева; A_{kz2} – подматрица матрицы A с количеством столбцов z_{lk} , соответствующая z-ветвям дерева; A_{kz2} – подматрица матрицы A

1.5. Удаление последние строки из каждой подматрицы **A**_k, в которых хранится избыточная информация.

1.6. Группировка подматриц \mathbf{A}_{kyl} , \mathbf{A}_{ky2} , \mathbf{A}_{kzl} , \mathbf{A}_{kz2} в соответствии с глобальной нумерацией ветвей. В результате получаем

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{y1} \ \mathbf{A}_{y2} \ \mathbf{A}_{z1} \ \mathbf{A}_{z2} \end{bmatrix}, \tag{2.9}$$

где

$$\mathbf{A}_{y1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1y1} \ \mathbf{A}_{2y1} \dots \mathbf{A}_{Ny1} \end{bmatrix}, \tag{2.10}$$

$$\mathbf{A}_{y2} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1y2} \ \mathbf{A}_{2y2} \dots \mathbf{A}_{Ny2} \end{bmatrix}, \tag{2.11}$$

$$\mathbf{A}_{z1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1z1} \ \mathbf{A}_{2z1} \dots \mathbf{A}_{Nz1} \end{bmatrix},$$
(2.12)

$$\mathbf{A}_{z2} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1z2} \ \mathbf{A}_{2z2} \ \dots \ \mathbf{A}_{Nz2} \end{bmatrix}.$$
(2.13)

Количество элементов в каждой их этих подматриц

$$y_1 = \sum_{k=1}^N y_{1k}, \quad y_2 = \sum_{k=1}^N y_{2k}, \quad z_1 = \sum_{k=1}^N z_{1k}, \quad z_2 = \sum_{k=1}^N z_{2k}.$$
 (2.14)

1.7. Формирование вектора типов уравнений. Под типом уравнения понимается тип элемента электрической цепи, для которого записано данное уравнение. Следует отметить, что в методе переменных состояния в итоговой системе уравнений присутствуют только y_1 уравнений для элементов, являющихся у-ветвям дерева, и z_2 уравнений для элементов, являющихся z-связями. Поэтому итоговая система содержит

$$N = y_1 + z_2 \tag{2.15}$$

уравнений. Так как вектор типов элементов Т имеет вид

$$\mathbf{T} = \begin{cases} \mathbf{T}_{y_1} \\ \mathbf{T}_{y_2} \\ \mathbf{T}_{z_1} \\ \mathbf{T}_{z_2} \end{cases},$$
(2.16)

то с учетом сказанного вектор типов уравнений, формируемый из подматриц вектора **T**, содержит *N* строк и имеет вид

$$\mathbf{U} = \begin{cases} \mathbf{T}_{y1} \\ \mathbf{T}_{z2} \end{cases},\tag{2.17}$$

где \mathbf{T}_{yl} – подматрица матрицы-столбца \mathbf{T} с количеством строк y_l , соответствующая у-ветвям дерева; \mathbf{T}_{y2} – подматрица матрицы \mathbf{T} с количеством строк y_2 , соответствующая у-связям; \mathbf{T}_{zl} – подматрица матрицы \mathbf{T} с количеством строк z_l , соответствующая z-ветвям дерева; \mathbf{T}_{z2} – подматрица матрицы \mathbf{T} с количеством строк z_2 , соответствующая z-ветвям дерева.

1.8. Разложение итоговой матрицы А на подматрицы

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2], \tag{2.18}$$

где A_1 – подматрица матрицы A, размером $m \times m$; A_2 – подматрица матрицы A, размером $m \times n$;

$$m = q - 1 \tag{2.19}$$

- количество ветвей деревьев всех автономных цепей;

$$n = p - (q - 1) \tag{2.20}$$

- количество связей графов всех автономных цепей.

1.9. Формирование матрицы сечений

$$\mathbf{D} = [\mathbf{1} \ \mathbf{D}_2], \tag{2.21}$$

где **1** – единичная матрица размером $m \times m$;

$$\mathbf{D}_2 = -\mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{A}_2, \tag{2.22}$$

 – это матрица, размерностью *m* × *n*, характеризующая ориентацию токов в связях по отношению к сечениям.

Матрица \mathbf{D}_2 имеет вид

$$\mathbf{D}_{2} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{2yy} & \mathbf{D}_{2zy} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{2zz} \end{bmatrix},$$
(2.23)

где \mathbf{D}_{2yy} – матрица размерностью $y_1 \times y_2$ – соответствует у-связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими у-ветвям дерева; \mathbf{D}_{2zy} – матрица размерностью $y_1 \times z_2$ – соответствует z-связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими у-ветвям дерева; \mathbf{D}_{2zz} – матрица размерностью $z_1 \times z_2$ – соответствуям, которые пересекаются сечениями, соответствует z-связям, которые пересекаются сечениями, соответст-

1.10. Формирование матрицы \mathbf{D}_{y} и ее транспонирование \mathbf{D}_{y}^{T} . При этом

$$\mathbf{D}_{\mathbf{y}} = [\mathbf{1} \ \mathbf{D}_{2\mathbf{y}\mathbf{y}}], \tag{2.24}$$

где \mathbf{D}_{2yy} находится из (2.23); **1** – единичная матрица размером $y_1 \times y_1$.

1.11. Формирование матрицы контуров

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1 \mathbf{1}], \tag{2.25}$$

где **1** – единичная матрица размером $n \times n$;

$$\mathbf{C}_1 = -\mathbf{D}_2^T, \qquad (2.26)$$

 – это матрица, размерностью *n* × *m*, характеризующая ориентацию токов в ветвях дерева по отношению к контурам.

Матрица С₁ имеет вид

$$\mathbf{C}_{1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{1yy} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{1zy} & \mathbf{C}_{1zz} \end{bmatrix},$$
(2.27)

где C_{1yy} – матрица размерностью $y_2 \times y_1$ – соответствует у-ветвям дерева, которые входят в состав контуров, построенных от у-связей графа; C_{1zy} – матрица размерностью $z_2 \times y_1$ – соответствует у-ветвям дерева, которые входят в контуры, образованные z-сязями; C_{1zz} – матрица размерностью $z_2 \times z_1$ – соответствует z-ветвям дерева, которые входят в контуры, образованные zсвязями.

1.12. Формирование матрицы C_z и ее транспонирование C_z^T . При этом

$$\mathbf{C}_{z} = [\mathbf{C}_{1zz} \quad \mathbf{1}], \tag{2.28}$$

где C_{1zz} находится из (2.27); **1** – единичная матрица размером $z_2 \times z_2$.

Второй этап построения системы уравнений интегрирован в непосредственно процесс ее решения. Следует отметить, что библиотека ECLib может работать в двух режимах:

- 1) расчет динамических режимов электрической цепи;
- расчет установившегося режима на переменном токе с использованием комплексных чисел.

В первом случае реализуются следующие операции:

1.1. Формирование матрицы проводимостей у-ветвей дерева графа \mathbf{Y}_{y} размером $y_1+y_2 \times y_1+y_2$ и матрицы сопротивлений z-ветвей графа \mathbf{Z}_{z} размером $z_1+z_2 \times z_1+z_2$. Данные матрицы входят в качестве подматриц в матрицу номиналов **V**, которая после ряда перестановок столбцов и строк первого этапа формирования систем уравнений электрической цепи имеет вид

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_y & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_z \end{bmatrix}.$$
 (2.29)

Номиналы могут иметь неизменное значение, но некоторые номиналы могут пересчитываться на каждой итерации по заданному алгоритму. Например, для источников переменного напряжения могут быть заданы значения ЭДС в функции времени E(t), для нелинейных сопротивлений или индуктивностей номиналы могут определяться по заданным характеристикам R(i) или L(i), где i – ток соответствующей ветви, и т.п.

1.2. Формирование общей системы уравнений, которая имеет вид

$$\mathbf{G} \mathbf{X} = \mathbf{0},\tag{2.30}$$

где **G** – матрица коэффициентов системы уравнений электрической цепи размером $N \times N$; **X** – вектор неизвестных величин размером $N \times I$.

Матрица коэффициентов строится из ранее сформированных подматриц и имеет вид

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{y} \mathbf{Y}_{y} \mathbf{D}_{y}^{T} & \mathbf{D}_{2zy} \\ \mathbf{C}_{1zy} & \mathbf{C}_{z} \mathbf{Z}_{z} \mathbf{C}_{z}^{T} \end{bmatrix},$$
(2.31)

где \mathbf{D}_{y} находится из (2.24); \mathbf{D}_{2zy} находится из (2.23); \mathbf{C}_{1zy} находится из (2.27); \mathbf{C}_{z} находится из (2.28): \mathbf{Y}_{y} и \mathbf{Z}_{z} находится из (2.29).

Матрица G имеет следующую структуру:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_E \\ \mathbf{G}_C \\ \mathbf{G}_R \\ \mathbf{G}_L \\ \mathbf{G}_I \end{bmatrix}, \qquad (2.32)$$

где G_E – матрица размером $n_E \times N$, соответствующая уравнениям для ветвей с источниками ЭДС; G_C – матрица размером $n_C \times N$, соответствующая уравнениям для ветвей с емкостями; G_R – матрица размером $n_R \times N$, соответствующая уравнениям для ветвей с сопротивлениями; G_L – матрица размером $n_L \times N$, соответствующая уравнениям для ветвей с индуктивностями; G_I – матрица размером $n_I \times N$, соответствующая уравнениям для ветвей с источниками тока; n_E, n_C, n_R, n_L, n_I – соответственно количество уравнений для ветвей с источниками ЭДС, емкостями, сопротивлениями, индуктивностями и источниками тока.

Искомыми величинами в методе переменных состояния являются напряжения на у-связях, сгруппированные в векторе U_y , содержащем y_1 элементов, и токи z-ветвей дерева, сгруппированные в векторе I_y , содержащем z_2 элементов. Поэтому вектор искомых величин имеет структуру

$$\mathbf{X} = \begin{cases} \mathbf{U}_y \\ \mathbf{I}_z \end{cases}.$$
 (2.33)

В свою очередь вектор \mathbf{U}_{y} имеет структуру

$$\mathbf{U}_{y} = \begin{cases} \mathbf{U}_{E} \\ \mathbf{U}_{C} \end{cases}, \tag{2.34}$$

где U_C – вектор напряжений на источниках ЭДС, содержащий n_E элементов по числу источников ЭДС в электрической цепи; U_C – вектор напряжений на емкостях с числом элементов $n_C = y_I - n_E$ по числу емкостей, вошедших в дерево графа электрической цепи.

Вектор I_z имеет структуру

$$\mathbf{I}_{z} = \begin{cases} \mathbf{I}_{R} \\ \mathbf{I}_{L} \\ \mathbf{I}_{I} \end{cases},$$
(2.35)

где I_R – вектор токов в сопротивлениях размером n_R по числу сопротивлений, вошедших в число связей графа электрической цепи; I_L – вектор токов в индуктивностях размером $n_L = z_2 - n_R - n_I$ по числу индуктивностей, вошедших в число связей графа; I_I – вектор токов в источниках тока размером n_I по числу источников тока в электрической цепи.

1.3. Определение элементов вектора U_E . Так как напряжение на источниках ЭДС равно величине этих ЭДС, то элементы вектора U_E рассчитывать не надо, они оказываются изначально определенными и равными диагональным элементах вектора номиналов V, то есть

$$U_{Ei} = V_{ii} \big|_{i=1 \div n_E} \,. \tag{2.36}$$

1.4. Определение элементов вектора I_I . Так как токи в источниках тока равны номиналам этих источников тока, то элементы вектора I_I рассчитывать не надо, они оказываются изначально определенными и равными диагональным элементах вектора номиналов V, то есть

$$I_{i} = V_{jj} \Big|_{\substack{i=1 \div n_{i} \\ j=N-n_{i}+i}}.$$
(2.37)

1.5. Формирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений для ветвей с емкостями. Так как матрица **G**_C имеет структуру

$$\mathbf{G}_{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{CE} & \mathbf{G}_{CC} & \mathbf{G}_{CR} & \mathbf{G}_{CL} & \mathbf{G}_{CI} \end{bmatrix},$$
(2.38)

то формируемая система уравнений имеет вид

$$\frac{d}{dt}\mathbf{U}_{C} = \mathbf{G}_{CC}^{-1} \left(-\mathbf{G}_{CE}\mathbf{U}_{E} - \mathbf{G}_{CC}^{*}\mathbf{U}_{C} - \mathbf{G}_{CR}\mathbf{I}_{R} - \mathbf{G}_{CL}^{*}\mathbf{I}_{L} - \mathbf{G}_{CI}\mathbf{I}_{I}\right), \quad (2.39)$$

где

$$\mathbf{G'}_{CC} = \mathrm{Im}(\mathbf{G}_{CC}); \tag{2.40}$$

$$\mathbf{G}''_{CC} = \operatorname{Re}(\mathbf{G}_{CC}); \qquad (2.41)$$

$$\mathbf{G}''_{CL} = \operatorname{Re}(\mathbf{G}_{CL}); \qquad (2.42)$$

Іт – функция, возвращающая мнимые части элементов матрицы G_{CC} ; Re – функция, возвращающая вещественные части элементов матрицы G_{CC} ; матрицы G_{CC} , G'_{CC} и G''_{CC} имеют размер $n_C \times n_C$; матрица G_{CE} имеет размер $n_C \times n_E$; матрица G_{CR} имеет размер $n_C \times n_R$; матрицы G_{CL} и G''_{CL} имеют размер $n_C \times n_L$; матрица G_{CI} имеет размер $n_C \times n_I$; элементы векторов U_E , U_C , I_R , I_L , I_I численно равны значениям, рассчитанным на предыдущей итерации интегрирования.

1.6. Формирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений для ветвей с индуктивностями. Так как матрица **G**_L имеет структуру

$$\mathbf{G}_{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{LE} & \mathbf{G}_{LC} & \mathbf{G}_{LR} & \mathbf{G}_{LL} & \mathbf{G}_{LI} \end{bmatrix},$$
(2.43)

то формируемая система уравнений имеет вид

$$\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{L} = \mathbf{G}_{LL}^{-1} \left(-\mathbf{G}_{LE}\mathbf{U}_{E} - \mathbf{G}_{LC}^{"}\mathbf{U}_{C} - \mathbf{G}_{LR}\mathbf{I}_{R} - \mathbf{G}_{LL}^{"}\mathbf{I}_{L} - \mathbf{G}_{LI}\mathbf{I}_{I}\right), \quad (2.44)$$

где
$$\mathbf{G}'_{LL} = \mathrm{Im}(\mathbf{G}_{LL});$$
 (2.45)

$$\mathbf{G}''_{LL} = \operatorname{Re}(\mathbf{G}_{LL}); \qquad (2.46)$$

$$\mathbf{G}''_{LC} = \operatorname{Re}(\mathbf{G}_{LC}); \qquad (2.47)$$

матрицы \mathbf{G}_{LL} , \mathbf{G}'_{LL} и \mathbf{G}''_{LL} имеют размер $n_L \times n_L$; матрица \mathbf{G}_{LE} имеет размер $n_L \times n_E$; матрицы \mathbf{G}_{LC} и \mathbf{G}''_{LC} имеют размер $n_L \times n_C$; матрица \mathbf{G}_{LR} имеет размер $n_L \times n_R$; \mathbf{G}_{LI} имеет размер $n_L \times n_I$; элементы векторов \mathbf{U}_E , \mathbf{U}_C , \mathbf{I}_R , \mathbf{I}_L , \mathbf{I}_I численно равны значениям, рассчитанным на предыдущей итерации интегрирования.

1.7. Формирование системы алгебраических уравнений для ветвей с сопротивлениями. Так как матрица **G**_R имеет структуру

$$\mathbf{G}_{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{RE} & \mathbf{G}_{RC} & \mathbf{G}_{RR} & \mathbf{G}_{RL} & \mathbf{G}_{RI} \end{bmatrix},$$
(2.48)

то формируемая система уравнений имеет вид

$$\mathbf{G}_{RR}\mathbf{I}_{R} = -\mathbf{G}_{RE}\mathbf{U}_{E} - \mathbf{G}_{RC}\frac{d}{dt}\mathbf{U}_{C} - \mathbf{G}_{RL}\frac{d}{dt}\mathbf{I}_{L} - \mathbf{G}_{RI}\mathbf{I}_{I}, \qquad (2.49)$$

где матрица \mathbf{G}_{RR} имеет размер $n_R \times n_R$; матрица \mathbf{G}_{RE} имеет размер $n_R \times n_E$; матрица \mathbf{G}_{RC} имеет размер $n_R \times n_L$; \mathbf{G}_{RI} имеет размер $n_R \times n_L$; \mathbf{G}_{RI} имеет размер $n_R \times n_L$; \mathbf{G}_{RI} имеет размер $n_R \times n_I$; элементы векторов \mathbf{U}_E , \mathbf{I}_I численно равны значениям, рассчитанным на предыдущей итерации интегрирования; элементы векторов $\frac{d}{dt}\mathbf{U}_C$, $\frac{d}{dt}\mathbf{I}_L$ численно равны значениям, рассчитанным на текущей итерации интегрирования соответственно по (2.39) и (2.44).

1.8. Расчет сформированных систем уравнений на текущей итерации. Системы уравнений (2.39) и (2.44) решаются методом Эйлера с постоянным шагом интегрирования *dt*

$$\mathbf{U}_{C}^{t+1} = \mathbf{U}_{C}^{t} + \mathbf{G}_{CC}^{t-1} \left(-\mathbf{G}_{CE} \mathbf{U}_{E}^{t} - \mathbf{G}_{CC}^{*} \mathbf{U}_{C}^{t} - \mathbf{G}_{CR} \mathbf{I}_{R}^{t} - \mathbf{G}_{CL}^{*} \mathbf{I}_{L}^{t} - \mathbf{G}_{CI} \mathbf{I}_{I}^{t} \right) dt, \quad (2.50)$$
$$\mathbf{I}_{L}^{t+1} = \mathbf{I}_{L}^{t} + \mathbf{G}_{LL}^{t-1} \left(-\mathbf{G}_{LE} \mathbf{U}_{E}^{t} - \mathbf{G}_{LC}^{*} \mathbf{U}_{C}^{t} - \mathbf{G}_{LR} \mathbf{I}_{R}^{t} - \mathbf{G}_{LL}^{*} \mathbf{I}_{L}^{t} - \mathbf{G}_{LI} \mathbf{I}_{I}^{t} \right) dt. \quad (2.51)$$

Система алгебраических уравнений (2.49) решается инвертированием матрицы коэффициентов





1.9. После расчета вектора неизвестных **X** для t-й итерации результаты распространяются на всю электрическую цепь, то есть рассчитываются токи во всех ветвях и потенциалы во всех узлах электрической цепи.

1.10. Далее процесс интегрирования циклично повторяется с п. 2.1.

Структура библиотеки ECLib и блок-схема типового алгоритма численного эксперимента при расчете динамических режимов электрической цепи представлены на рис. 2.9. Следует отметить, что алгоритм численного исследования электрической цепи может отличаться от типового.

При расчете установившегося режима на переменном токе с использованием комплексных чисел отличия от приведенных операций касаются лишь п.п. 2.5 – 2.8. Процесс интегрирования (п. 2.8) здесь отсутствует, и решение сформированной системы уравнений осуществляется в одну итерацию. Система алгебраических уравнений при этом имеет вид

$$\begin{cases} \mathbf{G}_{CC}\dot{\mathbf{U}}_{C} + \mathbf{G}_{CR}\dot{\mathbf{I}}_{R} + \mathbf{G}_{CL}\dot{\mathbf{I}}_{L} = -\mathbf{G}_{CE}\dot{\mathbf{U}}_{E} - \mathbf{G}_{CI}\dot{\mathbf{I}}_{I} \\ \mathbf{G}_{RC}\dot{\mathbf{U}}_{C} + \mathbf{G}_{RR}\dot{\mathbf{I}}_{R} + \mathbf{G}_{RL}\dot{\mathbf{I}}_{L} = -\mathbf{G}_{RE}\dot{\mathbf{U}}_{E} - \mathbf{G}_{RI}\dot{\mathbf{I}}_{I} , \\ \mathbf{G}_{LC}\dot{\mathbf{U}}_{C} + \mathbf{G}_{LR}\dot{\mathbf{I}}_{R} + \mathbf{G}_{LL}\dot{\mathbf{I}}_{L} = -\mathbf{G}_{LE}\dot{\mathbf{U}}_{E} - \mathbf{G}_{LI}\dot{\mathbf{I}}_{I} \end{cases}$$
(2.53)

ИЛИ

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{CC} & \mathbf{G}_{CR} & \mathbf{G}_{CL} \\ \mathbf{G}_{RC} & \mathbf{G}_{RR} & \mathbf{G}_{RL} \\ \mathbf{G}_{LC} & \mathbf{G}_{LR} & \mathbf{G}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{C} \\ \dot{\mathbf{I}}_{R} \\ \dot{\mathbf{I}}_{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{G}_{CE} & -\mathbf{G}_{CI} \\ -\mathbf{G}_{RE} & -\mathbf{G}_{RI} \\ -\mathbf{G}_{LE} & -\mathbf{G}_{LI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_{E} \\ \dot{\mathbf{I}}_{I} \end{bmatrix}, \qquad (2.54)$$

или в сокращенной форме

$$\tilde{\mathbf{G}}\dot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{F}} \,. \tag{2.55}$$

При этом элементы векторов $\dot{\mathbf{U}}_{E}$ и $\dot{\mathbf{I}}_{I}$ считаются заданными.

Решение системы уравнений (2.55) имеет вид

$$\dot{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{G}}^{-1} \dot{\mathbf{F}} \,. \tag{2.56}$$

2.3. Разработка метода параметрической генерации и численного исследования цепных моделей

Главным недостатком современных систем моделирования электрических цепей является отсутствие удобных средств параметрической генерации моделей, что приводит к проблеме автоматизации построения сложных цепных моделей, состоящих из множества типовых повторяющихся фрагментов. Обычно системы моделирования электрических цепей предоставляют пользователю инструментальные средства для построения модели цепи в интерактивном режиме. Однако зачастую требуется оперативная перестройка модели в пакетном режиме, не допускающем вмешательства человека в расчетный процесс. Так, если цепная модель используется в процессе оптимизации устройства, то изменения конструкции устройства на промежуточных шагах оптимизации требует соответствующих перестроек ЭСЗ, особенно если данная ЭСЗ детально отражает особенности конструкции.

Использование библиотеки моделирования электрических цепей ECLib позволяет по-новому подойти к процессу формирования модели разветвленной электрической цепи, использовав для этого средства программирования базового математического процессора (например, MatLab), позволяющие алгоритмизировать процесс построения типовых фрагментов и всей цепи. Кроме того, средства программирования позволяют организовать численный эксперимент с использованием ЭСЗ в пакетном режиме по заданному программным образом алгоритму исследований.

			37									
		23)	24	25	26)	(27)	28	29	30	31	32	33
68)	*	67)	26 68	27 69	28 60	29 61	30 62	31 63 25	32 64)	33 66	34 66	35 67
	• 38	(12)	13 14	14) 15	(15) 16	(16) 17	(17) 18		<u>(19)</u> 20	20 21	21) 22	22 23
34)	Å	(46)	47	(48)	49	50	(51)	52 13	53	54)	(55)	56)
	• 39	1	2	3	۲	5	6	₪	3	٩	10	1
69		35	2 36	3 37	4 38	5 39	6 40	7 (1)	42	9 (43)	10 (44)	11 (45)



Таким образом, для формирования и численного исследования модели для расчета распределения токов нагрузки автором был разработан метод параметрической генерации цепных моделей и программирования численного эксперимента с использованием разветвленных ЭСЗ, предполагающий использование для этих целей автономной библиотеки ECLib. Для описания разрабатываемого метода рассмотрим ЭСЗ обмоток распределительного трансформатора в опыте КЗ, изображенную на рис. 2.2, расчетный граф которой изображен на рис. 2.10.

В данной ЭСЗ первыми нумеруются сопротивления. Их количество равно количеству расчетных ветвей N_{ν} , то есть (см. 2.1)

$$N_R = N_v = N_c \cdot N_s + 1, (2.57)$$

где N_c – количество концентров обмотки НН; N_s – количество соосных расчетных секций, соединенных параллельно.

Далее нумеруются ветви, содержащие индуктивности. Число таких ветвей равно числу ветвей

$$N_L = N_R = N_\nu. \tag{2.58}$$

Последней нумеруется ветвь, содержащая источник ЭДС. Количество источников ЭДС

$$N_E = 1.$$
 (2.59)

Таким образом, общее число ветвей p схемы замещения в общем случае является функцией числа расчетных секций N_s и числа концентров N_c :

$$p = f(N_c, N_s) = 2 \cdot (N_c \cdot N_s + 1) + 1.$$
(2.60)

Номера ветвей схемы замещения рассчитываются как

$$N_R = 1 + m, \quad m = 0, 1, \dots, N_c N_s,$$
 (2.61)

$$N_L = N_c N_s + m + 1, \quad m = 1, 2, \dots, N_c N_s,$$
 (2.62)

$$N_F = 2N_c N_s + 3. \tag{2.63}$$

Узлы схемы замещения делятся на узлы, которые соединяют концентры, количеством

$$q_c = N_c + 1 \tag{2.64}$$

и узлы, которые соединяют ветви внутри расчетных секций, количеством

$$q_s = N_c N_s. \tag{2.65}$$

Кроме того, к ним добавляется два узла, которые соединяют ветви обмотки ВН.

Таким образом, общее количество узлов q, также как и число ветвей р схемы замещения, является функцией числа концентров и числа секций:

$$q_s = f(N_c, N_s) = q_c + q_s + 2 = N_c(N_s + 1) + 3.$$
(2.66)

Номера узлов схемы замещения рассчитываются как

$$N_{qc} = 1 + m (N_s + 1), \quad m = 0, 1, ..., N_c,$$
 (2.67)

$$N_{qs} = 1 + m + n (N_c + 1), \quad m = 1, 2, ..., N_s, \quad n = 0, 1, ..., N_c,$$
 (2.68)

$$N_{qOBH} = N_c N_s + N_c + 1 + m; \quad m = 1, 2.$$
(2.69)

На основе формул (2.61) – (2.63) и (2.67) – (2.69), а также заданных значений N_s и N_c , программным образом генерируются описанные в 2.2 матрицы, а именно:

1. Матрица номиналов V, имеющая структуру

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix},$$
(2.70)

где **R** – диагональная матрица сопротивлений расчетных ветвей размером $N_v \times N_v$ (см. 2.1), Ом; **L** – квадратная матрица индуктивностей расчетных ветвей размером $N_v \times N_v$, имеющая на главной диагонали значения собственных индуктивностей, а на недиагональных элементах – значения взаимных индуктивностей между ветвями, Гн; E – значение ЭДС, подаваемой на вход схемы, B.

2. Матрица типов элементов Т, имеющая структуру

$$\mathbf{T} = \begin{cases} \{3\}\\ \{4\}\\ 1 \end{cases}, \tag{2.71}$$

где $\{3\}, \{4\}$ – векторы размером $N_v \times I$, заполненный соответственно тройками и четверками в соответствии с типами элементов R и L, представленными в табл. 2.1; 1 – тип элемента E в соответствии с табл. 2.1.

3. Матрица соединений А, имеющая структуру

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{R} & \mathbf{A}_{L} & \mathbf{A}_{E} \end{bmatrix}, \tag{2.72}$$

где \mathbf{A}_{R} , \mathbf{A}_{L} , \mathbf{A}_{E} – соответственно матрицы соединений элементов R, L и E, имеющие соответственно размеры $q \times N_{R}$, $q \times N_{L}$ и $q \times 1$.

Сформированные матрицы передаются в качестве исходных данных в библиотеку ECLib для последующего расчета математическими средствами библиотеки. Результаты расчета выдаются в виде массивов для последующей обработки средствами базовой системы.

В качестве базовой системы для реализации программы генерации и численного исследования цепной модели исследуемого процесса удобнее всего выбрать табличный процессор Excel, предоставляющий проектировщику удобный интерфейс и встроенную систему программирования Visual Basic for Excel, а также способный интегрироваться с системой MatLab посредством интерфейса ExcelLink.

Таким образом, можно сформулировать основные положения метода параметрической генерации и численного исследования цепных моделей:

1. Разрабатывается ЭСЗ исследуемого процесса.

2. В разработанной ЭСЗ выделяются типовые фрагменты.

3. Разрабатывается алгоритм нумерации элементов и узлов ЭСЗ.

4. В среде Excel формируются таблицы для ввода исходных данных для формирования цепной модели и таблицы для вывода результатов численного исследования.

5. В среде Excel формируются таблицы для представления матрицы соединений, матрицы номиналов и матрицы типов элементов ЭСЗ.

6. В среде Visual Basic for Excel разрабатывается программа формирования матрицы соединений, матрицы номиналов и матрицы типов элементов ЭСЗ, которая берет данные из таблиц, сформированных по п. 4, и помещает результирующие матрицы в таблицы, сформированные по п. 5.

7. В среде Visual Basic for Excel разрабатывается программа численного эксперимента, которая берет данные из таблиц, сформированных по п. 5, передает их в библиотеку ECLib, инициирует их обработку средствами библио-

теки ECLib, вызывая соответствующие функции (см. рис. 2.9). Алгоритм численного эксперимента может быть произвольным. Эта же программа возвращает данные в таблицы результатов, сформированные в Excel по п. 4.

8. В среде Excel формируются алгоритм, таблицы, графики и т.п. для обработки полученных результатов.

Предлагаемый метод параметрической генерации и численного исследования цепных моделей является универсальным, т.к. позволяет автоматически перестраивать модель для любой типовой электрической цепи. В данной диссертации этот метод используется для построения ЭСЗ для обмоток с любым количеством концентров и расчетных секций, а также числа витков внутри концентров, ширины охлаждающих каналов, геометрии проводника и других параметров трансформатора.

Главное достоинство предложенного метода состоит в возможности генерирования модели электрической цепи за доли секунды, что позволяет использовать модель электрической цепи в алгоритмах, требующих многократной перестройки модели, например, при оптимизации трансформатора.

2.4. Разработка метода расчета потерь в обмотках трансформатора с использованием комбинированной модели

Разрабатываемый метод расчета потерь в обмотках трансформатора основывается на следующих положениях:

1. Магнитное поле активной части трансформатора рассчитывается в режиме КЗ и обусловлено полем рассеяния обмоток. В этой связи основной поток в магнитной системе не учитывается.

2. Расчет потерь осуществляется исходя из распределения токов в ветвях ЭСЗ, которое рассчитывается методом переменных состояния.

Предлагаемый метод состоит в последовательной реализации следующих этапов:

66

1) разработка ЭСЗ обмоток трансформатора в режиме КЗ;

2) параметрическая генерация конечно-элементной модели магнитного поля рассеяния активной части трансформатора;

 формирование матрицы индуктивностей элементов обмоток трансформатора на основе расчета поля;

 параметрическая генерация и расчет цепной модели на основе разветвленной электрической схемы замещения;

5) расчет потерь в элементах обмоток на основе полученного распределения токов в расчетных ветвях ЭСЗ.

Данный метод может быть использован для уточненного расчета потерь в обмотках трансформатора в случаях, когда в разных элементах обмоток могут протекать различные токи, что вызывается, как правило, неравенством сопротивлений элементов обмоток и неодинаковым расположением этих элементов в неоднородном магнитном поле рассеяния трансформатора. Это касается, в частности, обмоток, которые мотаются несколькими параллельными проводниками, что даже при наличии транспозиции проводников может приводить к возникновению циркуляционных токов в параллельных ветвях обмотки. Наиболее сложным вариантом применения данного метода является расчет потерь в фольговых обмотках. Рассмотрим этот вариант в качестве примера применения разрабатываемого метода.

Система расчета потерь в фольговых обмотках из трансформатора была реализована в среде Excel, связанного с математическим пакетом MatLab посредством интерфейса ExcelLink.

Электрическая схема замещения для расчета потерь в фольговых обмотках трансформатора представлена на рис. 2.2. Для расчета матрицы индуктивностей расчетных ветвей ЭСЗ был разработан параметрический генератор магнитного поля обмоток трансформатора в опыте КЗ. Для этого была использована разработанная в ИГЭУ динамически подключаемая библиотека моделирования магнитного поля MKELib [29, 82, 86, 91].

67

Рассмотрим механизм параметрической генерации КЭ-модели активной части на примере масляного трансформатора ТМГ-630/10. Основные параметры модели приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Параметры трансформатора для генерации конечно-элементной модели масляного трансформатора ТМГ-630/10

№ п/п	Наименование					
1	Число витков обмотки НН	24				
2	Число витков обмотки ВН	623				
3	Ток обмотки НН, А	910				
4	Длина активной обмотки, м	0,470				
5	Диаметр стержня, м	0,210				
6	Длина стержня с ярмами, м	0,940				
7	Расстояние от верхнего ярма до крышки бака, м	0,250				
8	Расстояние от нижнего ярма до дна бака, м	0,020				
9	Расстояние от оси стержня магнитной системы до стенки бака, м	0,236				
10	Радиус аппроксимации, м	0,010				
11	Радиус аппроксимации границ 1, м	0,030				
12	Радиус аппроксимации границ 2, м	0,050				
13	Число секций	11				
14	Число концентров	3				

Кроме того, необходимо рассчитать внутренние и внешние диаметры концентров, образующих обмотки трансформатора (табл. 2.3)

Таблица 2.3. Геометрические параметры обмоток трансформатора ТМГ-630/10

		Внутренний диаметр	Наружный диаметр	Средний диаметр	Число витков
		$\mathrm{D}_{\scriptscriptstyle\mathrm{BH}}$	\mathbf{D}_{Hap}	D_{cp}	W
	Концентр 1	0,192	0,213	0,203	8
ОНН	Концентр 2	0,220	0,240	0,230	8
	Концентр 3	0,246	0,268	0,257	8
OBH		0,292	0,322	0,307	623

По данным табл. 2.2 – 2.3 рассчитываются (рис. 2.11):

- координаты опорных точек исследуемой модели;
- примитивы модели (отрезки и дуги, заданные тремя опорными точками);
- определяются среды (магнитные, немагнитные, области с током и без тока)

• секции (под секциями понимаются элементарные объекты, из которых строятся обмотки).



Рис. 2.11. Подготовка данных для генерации конечно-элементной модели активной части масляного трансформатора ТМГ-630/10

Путем реализации встроенных в MKELib процедур производится построение модели (рис. 2.4)

Для расчета матрицы L ЭСЗ трансформатора в режиме КЗ на конечноэлементной модели (рис. 2.4) организуется серия расчетов магнитного поля. В каждом k-м расчете данной серии задается ток i_k в k-й расчетной ветви ЭСЗ (в секции обмотки HH или в обмотке BH), затем рассчитывается магнитное поле и определяется потокосцепление Ψ_{sk} во всех s-х расчетных ветвях ЭСЗ с магнитным полем, созданным током k-й расчетной ветви. Соответствующий элемент матрицы L рассчитывается как

$$L_{sk} = -\frac{\Psi_{sk}}{i_k}.$$
(2.73)

Визуализация матрицы L представлена на рис. 2.12.



Рис. 2.12. Визуализация матрицы L



Рис. 2.13. Параметрически сгенерированная матрица узловых соединений **A** и матрица типов элементов **T** схемы, изображенной на рис. 2.2

Алгоритм параметрической генерации цепной модели (рис. 2.2) активной части трансформатора с фольговыми обмотками описан в 2.3. Параметрический генератор реализован в среде Excel в виде макроса на языке Visual Basic for Excel. Сформированные матрицы **A**, **V** и **T** выдаются на рабочей лист Excel в виде таблицы (рис. 2.13 – 2.15).



Рис. 2.14. Параметрически сгенерированная подматрица активных сопротивлений постоянному току **R** матрицы номиналов **V** схемы, изображенной на рис. 2.2



Рис. 2.15. Параметрически сгенерированная подматрица индуктивностей L матрицы номиналов V схемы, изображенной на рис. 2.2

Сформированная таким образом модель является основанием для последующего расчета токов в ветвях схемы замещения методом переменных состояния и соответствующего распределения нагрузочных потерь средствами библиотеки ECLib.

Результаты расчета распределения тока нагрузки и потерь в фольговых обмотках НН распределительного трансформатора, полученные с помощью данной модели приведены на рис. 2.16 – 2.19.



Рис. 2.16. Изменение токов расчетных секций и тока всей катушки во времени



Рис. 2.18. Распределение действующих значений токов в расчетных секциях трех концентров обмотки НН



Рис. 2.17. Распределение мгновенных значений токов в расчетных секциях трех концентров обмотки НН в момент времени t = 1c



Рис. 2.19. Распределение потерь в расчетных секциях трех концентров обмотки НН

В работе [65] автором получены результаты расчета нагрузочных потерь (потерь КЗ в обмотках НН) масляных трансформаторов герметичного исполнения с использованием предлагаемых моделей и проведено сравнение с результатами приемосдаточных испытаний (табл. 2.4)

Таблица 2.3. Результаты расчета потерь в ОНН масляных трансформаторов и сравнение с результатами приемосдаточных испытаний [65]

	Потери КЗ в			
Тип	Расчет	Испытания		Отклонение, %
	Ррасч	Росн	P_{dob}	
ТМГ-400/10	854	807	60	-2,84%
ТМГ-630/10	1114	949	121	7,13%
ТМГ-1000/10	1496	1329	170	-0,36%
ТМГ-1600/10	2630	2153	494	-1,09%
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Разработанный метод позволяет рассчитать распределение токов по расчетным ветвям ЭСЗ обмоток трансформатора, что является основой для точного расчета основных и добавочных потерь (отклонение результатов вычислений находится в пределах 5% по сравнению с результатами испытаний). В связи с этим дальнейшая разработка уточненных тепловых моделей на основе предложенных моделей и методов расчета потерь в обмотках трансформаторов является перспективной задачей.

2. Разработанный метод может использоваться для расчета потерь в фольговых обмотках трансформаторов, для которых до сих пор не существует точной инженерной методики.

3.Анализ результатов расчета распределения потерь позволяет формулировать полезные для практики проектирования выводы. Например, в фольговых обмотках НН масляных трансформаторов наиболее нагруженным является наружный концентр обмотки НН, граничащий с главным каналом. Это позволяет сформулировать рекомендацию: предлагается внутренние концентры обмотки НН делать с большим числом витков для повышения индуктивности внутренних концентров и выравнивания магнитного поля.

4. Разработанный метод параметрической генерации и численного исследования цепных моделей, опирающийся на возможности универсальной библиотеки моделирования электрических цепей, может быть реализован для решения широкого класса задач моделирования цепей различной природы, далеко выходящих за пределы проблемы проектирования трансформаторов.

3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.1. Разработка тепловой модели распределительного трансформатора на основе разветвленных электрических схем замещения

3.1.1. Структура многоуровневой математической модели для теплового расчета трансформатора

Теоретическое обоснование компонентного состава и структуры системы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов было дано в 1.4. Разрабатываемая уточненная математическая модель для теплового расчета трансформатора, являющаяся основой данной подсистемы, включает в себя несколько моделей:

1. Модель для расчета потерь холостого хода. Ввиду хорошей проработки модели, приведенной в РД 16 303-86 [10] (см. 1.3.1), содержащей множество проверенных временем эмпирических коэффициентов, данная модель может использоваться в уточненном тепловом расчете практически без изменений (изменения могут касаться лишь значений некоторых коэффициентов для новых технологий шихтовки, которые должны вводиться и проверяться опытным путем).

2. Модель для расчета потерь в опыте короткого замыкания. Если обмотки НН и ВН имеют стандартное исполнение, то для расчета потерь можно воспользоваться традиционной инженерной методикой (см. 1.3.1). Однако для расчета потерь в фольговых и многопараллельных обмотках для учета влияния транспозиции проводников на потери в обмотках и т.п. рекомендуется воспользоваться уточненной методикой расчета потерь в обмотках, приведенной в 2.

3. Модель для теплового расчета магнитной системы. Ввиду хорошей проработки модели, приведенной в РД 16 415-88 [11] (см. 1.3.2), данная модель может использоваться в уточненном тепловом расчете практически без изменений.

4. Модель для теплового расчета обмоток распределительных трансформаторов. Если обмотки НН и ВН имеют стандартное исполнение, то для теплового расчета можно воспользоваться традиционными инженерными методиками, приведенными в РД [6, 9, 12, 13, 14] (см. 1.3.1). Однако для теплового расчета фольговых обмоток и обмоток, выполненных из нескольких параллельных проводников необходимо разработать уточненную методику, учитывающую неравномерность распределения тока в элементах обмотки.

5. Модель для теплового расчета системы охлаждения. Ввиду хорошей проработки моделей, приведенных в РД [15], данная модель может использоваться в уточненном тепловом расчете практически без изменений.

6. Полевая тепловая модель, реализуемая средствами современных САЕ-систем.

Таким образом, для реализации многоуровневой математической модели для теплового расчета трансформатора необходима детальная проработка уточненной тепловой модели обмоток. В качестве теоретической базы для создания такой модели будем использовать электротепловую аналогию, построенную на изоморфизме уравнений тепловых процессов и электрической цепи, рассмотренном в 1.2.2. Основным отличием разрабатываемой модели от известных аналогов является возможность автоматического построения и исследования разветвленных электрических схем замещения тепловых процессов с различной степенью детализации расчетной схемы, позволяющей достичь точности расчета, характерной для полевых задач при большем быстродействии за счет учета характерных симметрий.

В качестве инструментов для моделирования разветвленной электрической схемы замещения можно использовать приложение Simulink пакета MATLAB или библиотеку ECLib, рассмотренную в 2.2.

3.1.2. Разработка уточненной тепловой модели обмоток трансформатора в среде Simulink

Уточненную тепловую модель обмоток трансформатора на основе разветвленных ЭСЗ рассмотрим на примере фольговых обмоток НН распределительного трансформатора ТСЛ-630/10/0,4, потери в которой вычислены по методике, изложенной в 2. При разработке тепловой модели приняты следующие допущения:

1. Теплоотдачей с торцов обмотки можно пренебречь, т.к. торцевая изоляция обмоток выполнена из материала с низкой теплопроводностью (в масляных трансформаторах в качестве материала торцевой изоляции используется электротехнческий картон, в сухих – стеклотекстолит СТЭФ. Коэффициент теплопроводности указанных материалов $\lambda = 0,10 - 0,15$ Вт/м^{.0}С).

2. Тепловыделение происходит равномерно по всему объему расчетной секции обмотки. Как было сказано ранее (см. 2.1.1), это допущение приемлемо, так как элементарные токи, протекающие по сечению ленты на незначительном участке длины, можно считать параллельными.

3. Коэффициенты теплопроводности материалов не являются функциями температуры. Это допущение приемлемо, т.к. диапазон рабочих температур рассматриваемой модели трансформатора составляет от 10 0 C – 200 0 C. В этих пределах коэффициенты теплопроводности λ проводниковых и изоляционных материалов меняются не более чем на 0,1 % [64].

Фрагмент разветвленной электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотке, состоящей из двух концентров, выполненный в среде Simulink, представлен на рис. 3.1. Каждый концентр обмотки представлен прямоугольной областью, являющейся отдельной подсистемой, фрагмент содержимого которой представлен на рис. 3.2. В свою очередь, каждая расчетная секция в схеме замещения концентра представлена подсистемой, фраг-

мент содержимого которой представлен на рис. 3.3. Формулы расчета тепловых сопротивлений ЭЗС приведены в разделе 3.1.4.



Рис. 3.1. Фрагмент разветвленной электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотке трансформатора в среде Simulink

Однонаправленное конвективное движение тепловых потоков в электрической схеме замещения (рис. 3.1) учитывается с помощью диодов и дополнительных сопротивлений теплопроводности воздуха.

В работе [68] автором был проведен тепловой расчет обмотки НН из ленты сухого трансформатора ТСЛ-630/10/0,4 на основе описываемых разветвленных электрических схем замещения. Результаты в приложении Simulink сравнивались с результатами испытаний физического образца об-



замещения концентра

мотки НН ТСЛ-630/10/0,4 (рис. 3.4.) и приведены в табл. 3.1 и на рис. 3.5.



Рис. 3.3. Фрагмент разветвленной электрической схемы замещения расчетной секции обмотки



Рис. 3.4. Тепловые испытания обмотки НН ТСЛ-630/10/0,4



Рис. 3.5. Распределение температуры по высоте обмотки НН ТСЛ-630/10/0,4

Таблица 3.1. Результаты теплового расчета в Simulink и испытаний обмотки НН ТСЛ-630/10/0,4 [68]

№ секции	Расчетные данные, °С	Результаты измерения, °С	Отклонение, %
1	54,11	53,26	1,58 %
2	55,27	53,26	3,70 %
3	56,05	56,92	-1,54 %
4	56,52	58,19	-2,91 %
5	57,06	56,54	0,92 %
6	57,58	56,83	1,31 %
7	58,09	57,03	1,84 %
8	58,67	58,78	-0,19 %
9	58,95	60,29	-2,25 %
10	58,59	52,74	10,51 %

Анализ результатов показывает, что использование пакета Simulink в тепловых расчетах дает достаточно точные результаты.

Главным недостатком использования пакета Simulink в тепловых расчетах трансформаторов на основе разветвленных электрических схем замещения является большая трудоемкость построения и перестроения схем. По сути, построение схем сводится к ручному набору элементов схемы и их соединения. Очевидным становится тот факт, что использование такого инструмента как Simulink в подсистемах оптимизации САПР трансформаторов не представляется возможным, в связи с чем необходима разработка и использование быстродействующих программных средств на основе методологии параметрической генерации цепных моделей.

3.1.3. Разработка уточненной тепловой модели обмоток с использованием библиотеки моделирования электрических цепей

Для решения задачи повышения быстродействия при сохранении точности тепловых расчетов обмоток с учетом эффектов неравномерного распределения тока по элементам обмотки была разработана уточненная тепловая модель обмотки на основе библиотеки моделирования электрических цепей ECLib. Функционал библиотеки ECLib описан во второй главе.

В работе [67] автором представлены результаты разработки метода параметрической генерации цепной модели теплового состояния обмотки НН трансформатора ТСЛ-630/10/0,4 для теплового расчета средствами библиотеки ECLib. Описание метода параметрической генерации цепной модели приведено в разделе 3.2.2 данной диссертации.

Элемент схемы замещения для расчета средствами Eclib представлен на рис. 3.6. Схема замещения обмотки ТСЛ-630/10/0,4 представлена на рис. 3.7.



Рис. 3.6. Структура секции схемы замещения обмотки трансформатора с одним концентром: VD_k – диод, моделирующий движение охлаждающей среды вдоль канала с учетом конвекции и однонаправленности; R_k – сопротивление теплопроводности охлаждающей среды; R_z – сопротивление теплопроводности секции в осевом направлении; R_r – сопротивление теплопроводности секции в осевом направлении; R_r – сопротивление теплопроводности секции в осевом направлении; R_r – сопротивление теплопроводности секции в радиальном направлении; R_{α} – сопротивление тепловодности секции в осевом направлении; R_r – сопротивление теплопроводности секции в осевом направлении; R_r – сопротивление теплопроводности секции в радиальном направлении; R_{α} – сопротивление тепловодие с учетом конвекции и излучения; R_{is} – тепловое сопротивление бортовой изоляции; J – источник тепловыделения.



Рис. 3.7. Схема замещения обмотки НН из ленты ТСЛ-630/0,4.

В работе [67] приведены результаты расчета модели и сравнение с другими программными средствами. Сравнение результатов теплового расчета обмотки ТСЛ-630/0,4 средствами Simulink и ECLib с результатами испытаний приведено на рис. 3.8. Основное достоинство цепных моделей на основе библиотеки ECLib заключается в автоматическом построении на основе методологии параметрической генерации тепловой модели, речь о которой пойдет в разделе 3.2 настоящей диссертации.



Рис. 3.8. Сравнение результатов теплового расчета обмотки ТСЛ-630/10/0,4 средствами Simulink и ECLib с результатами испытаний

№ секции	Расчетные данные, °С	Результаты измерения, °С	Отклонение, %
1	56,10	53,26	5,19 %
2	56,90	53,26	6,61 %
3	57,20	56,92	0,49 %
4	57,70	58,19	-0,85 %
5	58,10	56,54	2,72 %
6	58,10	56,83	2,21 %
7	58,50	57,03	2,54 %
8	58,00	58,78	-1,34 %
9	57,50	60,29	-4,74 %
10	56,10	52,74	6,17 %

Таблица 3.2. Результаты теплового расчета в ECLib и испытаний обмотки НН ТСЛ-630/10/0,4 [67]

Анализ результатов теплового расчета обмотки ТСЛ-630/10/0,4 показывает, что применение в тепловому расчете цепной модели обмотки из ленты распределительного трансформатора на основе использования библиотеки моделирования электрических цепей ECLib дает достаточно точные результаты (табл. 3.2), следовательно, дальнейшая разработка системы теплового анализа распределительного трансформатора на основе предлагаемых моделей является перспективным направлением.

3.1.4. Расчет параметров уточненной математической модели для теплового расчета трансформатора

3.1.4.1. Расчет тепловых сопротивлений теплопроводности

В структуре расчетной секции обмотки (рис. 3.7) имеют место тепловое сопротивление теплопроводности в радиальном направлении и тепловое сопротивление теплопроводности в осевом направлении.

Расчет теплового сопротивления теплопроводности в радиальном направлении ведется по формуле теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку [54, 84]:

$$R_{\lambda_{-r}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{1}} \ln \frac{r_{2}}{r_{1}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{2}} \ln \frac{r_{3}}{r_{2}} + \dots + \frac{1}{2\pi\lambda_{n}} \ln \frac{r_{n}}{r_{n-1}}, \quad (3.1)$$

где λ_1 , λ_2 , ..., λ_n – коэффициенты теплопроводности соответствующего слоя; r_1 , r_2 , ..., r_n – радиусы слоев. Нечетные номера соответствуют внутреннему радиусу слоя, четные – наружным радиусам слоя (рис. 3.9).

Расчет сопротивления теплопроводности в осевом направлении ведется аналогично случаю теплопередачи через плоскую стенку сечением S:

$$R_{\lambda_{z}} = \frac{h_{s}}{\lambda_{1}\pi(r_{2}^{2} - r_{1}^{2})},$$
(3.2)



Рис. 3.9. К расчету тепловых сопротивлений теплопроводности многослойной цилиндрической стенки в радиальном направлении (рис. по [54])

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала проводника, Вт/м⁰С; r_2 и r_1 – наружный и внутренний радиусы рассматриваемого слоя обмотки, м; h_s – высота расчетной секции, м (рис. 3.10).

Особого внимания заслуживает расчет тепловых сопротивлений теплопроводности обмотки ВН трансформа-ТСЛ с торов типа литой изоляцией (рис. 3.11). Элемент схемы замещения секции обмотки ВН ТСЛ для данного случая представлен на рис. 3.12. Литая изоляция представляет собой трехкомпонентный компаунд, состоящий из полимерной смолы, отвердителя и кварцевого песка, смешанных в определенных пропорциях.

Тепловое сопротивление теплопроводности в осевом направлении z для i-й расчетной секции *R*_{zi} определяются по формуле:



Рис. 3.10. К расчету тепловых сопротивлений теплопроводности многослойной цилиндрической стенки в осевом направлении: 1 – материал проводника; 2 – материал изоляции; q – плотность теплового потока (рис. по [64])



Рис. 3.11. Модель трансформатора типа ТСЛ с литой изоляцией в изометрии (рис. по [64])

$$R_{zi} = \frac{h_i}{\lambda_n \pi \sum_{j=1}^{W_i} \left(d_{\mu i j}^2 - d_{\theta i j}^2 \right)},$$

где h_i – высота і-й расчетной секции, м; λ_n – коэффициент теплопроводности материала проводника, Вт/м[•]°С; W_i – количество витков в і-й расчетной секции; d_{nij} , d_{eij} – наружный и внутренний диаметры j-го витка i-й секции, м.

Обмотки НН ТСЛ в радиальном направлении можно представить чередующимися слоями алюминиевой ленты и межслоевой изоляции, поэтому тепловое сопротивление (TC) теплопроводности і-й расчетной секции в радиальном направлении *R_{ri}* определяются по формуле теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку

$$R_{ri} = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^{W_i} \left(\frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{nij}}{d_{sij}} + \frac{1}{\lambda_{u3}} \ln \frac{d_{nij} + 2\delta_{u3}}{d_{nij}} \right),$$
(3.4)

где λ_{из} – коэффициент теплопроводности материала межвитковой изоляции, Вт/м[°]C; δ_{из} – толщина межвитковой изоляции, м.

Фольговые обмотки ВН ТСЛ представляют собой набор катушек, залитых трехкомпонентным компаундом. Для определения ТС в радиальном направлении для катушек можно использовать формулу (3.6). Кроме того, в электрическую схему замещения тепловой цепи (ЭСЗ ТЦ) добавляется ТС компаунда наружу:

$$R_{\kappa hi} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\kappa}} \ln \frac{d_{\kappa hi}}{d_{n hi}}, \qquad (3.5)$$

внутрь концентра:

$$R_{\rm kei} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\rm k}} \ln\frac{d_{\rm nei}}{d_{\rm kei}},\qquad(3.6)$$

и в осевом направлении:

$$R_{\kappa zi} = \frac{b_i}{\lambda_{\kappa} \pi \left(d_{n \mu i}^2 - d_{n \kappa i}^2 \right)}, \qquad (3.7)$$

где λ_{κ} – коэффициент теплопроводности компаунда; b_i – расстояние между катушками обмотки ВН, м; $d_{\kappa n i}$, $d_{\kappa b i}$ – наружный и внутренний диаметры i-го концентра по компаунду, м; $d_{n n i}$, $d_{n b i}$ – наружный и



Рис. 3.12. Эскиз и схема замещения секции обмотки ВН ТСЛ: 1 – изоляционный компаунд; 2 – катушка обмотки; R_{κ} – тепловое сопротивление компаунда; R_r – тепловое сопротивление катушки обмотки ВН ТСЛ в радиальном направлении; R_z – то же в осевом (рис. по [64])

внутренний диаметры і-го концентра по поверхности проводников, м.

Коэффициент теплопроводности компаунда вычисляется из условия

$$\frac{1}{\lambda_{\kappa}} = \frac{\omega_{_{CM}}}{\lambda_{_{CM}}} + \frac{\omega_{_{OMB}}}{\lambda_{_{OMB}}} + \frac{\omega_{_{\kappa_{B}apu}}}{\lambda_{_{\kappa_{B}apu}}},$$
(3.8)

где λ_{cM} , λ_{oms} , $\lambda_{\kappa варц}$ – коэффициенты теплопроводности смолы, отвердителя и кварцевого песка, Вт/м.°С; ω_{cM} , ω_{oms} , $\omega_{\kappa варц}$ – массовые доли смолы, отвердителя и кварцевого песка, о.е.

3.1.4.2. Расчет коэффициента теплоотдачи в сухих трансформаторах с учетом нелинейности

Тепловое сопротивление теплоотдачи для участка цепи рассчитывается по формуле

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha_k S_k},\tag{3.9}$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи (КТО), Вт/(м^{2.0}С); S_k – площадь теплоотдающей поверхности.

Известные трудности представляет определение коэффициента теплоотдачи (КТО) α_k , который является функцией многих параметров охлаждающей среды, в том числе и температуры. В сухих трансформаторах в качестве охлаждающей среды выступает воздух.

В общем случае выражение для определения КТО имеет вид

$$\alpha_k = Nu \frac{\lambda_f(T)}{h}, \qquad (3.10)$$

где Nu – безразмерный критерий Нуссельта; $\lambda_f(T)$ – зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры, Вт/(м^{.0}C); h – высота обмотки.

Критерий Нуссельта в случае естественной конвекции связан с другими безразмерными комплексами – числами Грасгофа *Gr* и Прандтля *Pr*:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^m. \tag{3.11}$$

Коэффициенты *С*, *m* определяются режимом течения охлаждающей среды.

Критерий Грасгофа характеризует режим течения вследствие термогравитационной конвекции и учитывает вязкость среды:

$$Gr = \frac{gH^3}{v^2(T)}\beta\Delta T, \qquad (3.12)$$

где *g* – ускорение свободного падения, м/c²; v(T) – зависимость кинематической вязкости воздуха от температуры, м²/c; β – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/⁰C.

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{c_p(T) \cdot \mu(T)}{\lambda_f(T)},$$
(3.13)

где $c_p(T)$ – зависимость удельной теплоемкости воздуха от температуры, Дж/(кг^{.0}С); $\mu(T)$ – зависимость динамической вязкости воздуха от температуры, Па[.]с.

Кинематическая вязкость v определяется как

$$\nu(T) = \frac{\mu(T)}{\rho(T)},\tag{3.14}$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

С учетом (3.12) – (3.14) и некоторых преобразований можно записать

$$Gr \cdot Pr = \frac{gh^3}{\mu(T)} \rho(T)^2 \cdot \beta \Delta T \cdot \frac{c_p(T)}{\lambda(T)}.$$
(3.15)

Общее выражение для определения КТО имеет вид

$$\alpha_{k} = Nu \frac{\lambda_{f}}{h} = C \left(\frac{gh^{3}}{\mu(T)} \rho(T)^{2} \beta \Delta T \frac{c_{p}}{\lambda(T)} \right)^{m} \frac{\lambda_{f}}{h} .$$
(3.16)

Параметра среды в (3.16), которые зависят от температуры:

1) Теплопроводность воздуха.

Согласно молекулярно-кинетической теории коэффициент теплопроводности газов определяется формулой

$$\lambda_f = \frac{ik}{3\pi^{\frac{3}{2}}d^2} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad , \tag{3.17}$$

где *i* – сумма поступательных и вращательных степеней свободы молекул; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; M = 29 г/моль – молярная масса воздуха; T – абсолютная температура, К; d – эффективный диаметр молекул воздуха, м; R = 8,314 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

2) Динамическая вязкость.

Для определения динамической вязкости газов может быть использована формула Сазерленда [84]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}},\tag{3.18}$$

где μ – динамическая вязкость при заданной температуре T, (Па·с); μ_0 – контрольная вязкость при некоторой контрольной температуре T_0 , (Па·с); T – заданная температура, K; T_0 – контрольная температура, K; C – постоянная Сазерленда для того газа, вязкость которого требуется определить.

Формулу допускается применять для температур в диапазоне 0 < T < 555 К и при давлениях менее 3,45 МПа с ошибкой менее 10 %, обусловленной зависимостью вязкости от давления. Для воздуха постоянная Сазерленда и контрольная вязкость при контрольной температуре соответственно равны: C = 120 K; $T_0 = 291,15$ K; $\mu_0 = 18,27$ мкПа·с.

3) Удельная теплоемкость.

В диапазоне температур 293,15 К – 373,15 К (20 - 100 ^oC) удельная теплоемкость сухого воздуха меняется от 1,005 до 1,009 кДж/(кг·К), то есть в пределах 0,4 %. Поэтому можно принять, что она не зависит от температуры.

4) Плотность воздуха.

Плотность сухого воздуха может быть вычислена с использованием уравнения Менделеева–Клайперона для идеального газа при заданных температуре T(K) и давлении $p(\Pi a)$

$$\rho(T) = \frac{pM}{RT} \quad . \tag{3.19}$$

Следует отметить, что число *Pr* газов, в частности воздуха, не зависит ни от температуры, ни от давления и для данного газа является величиной постоянной, определяемой атомностью газа [84].

В работе [72] автором проведен расчет коэффициента теплоотдачи с поверхности обмоток ВН трансформаторов сухого типа по формуле (3.16) и сравнение с расчетом КТО как результат решения уравнения Навье-Стокса. Результаты приведены в табл.3.3.

Таблица 3.3. Результаты расчета среднего коэффициента теплоотдачи (КТО) по высоте с наружной поверхности обмоток сухого трансформатора с литой изоляцией [72]

	КТО, расс по форму	читанный иле (3.16)	КТО, полученный в результате решения уравнения Навье- Стокса, Вт/м ² К		Отклонение, %	
	OBH	OHH	OBH	OHH	OBH	OHH
ТСЛ-400/10	4,355	6,216	4,033	5,908	7,68%	5,08%
ТСЛ-630/10	3,446	5,217	3,264	4,899	5,42%	6,29%
ТСЛ-1000/10	3,124	4,271	3,001	4,371	4,02%	-2,31%
ТСЛ-1600/20	3,582	3,007	3,292	2,864	8,44%	4,87%

Отклонение в результатах расчета КТО находится в пределах 10 %. Данная точность вполне приемлема в тепловых расчетах распределительных трансформаторов сухого типа в температурном диапазоне 20 – 155 °C.



Рис. 3.13. Пример расчета коэффициента теплоотдачи с обмоток ТСЛ-400/10 во Flow Simulation [рис. по 72]

3.1.4.3. Расчет коэффициента теплоотдачи в масляных

трансформаторах с учетом нелинейности

В отличие от сухих трансформаторов аналогичные процессы в масляных трансформаторах имеют ряд особенностей.

Число *Pr* капельных жидкостей сильно зависит от температуры (рис. 3.14), причем для большинства жидкостей эта зависимость аналогична зависимости вязкости $\mu(t)$, так как теплоемкость c_p и коэффициент теплопровод-

ности λ зависят от температуры более слабо. Как правило, при увеличении температуры число *Pr* резко уменьшается [54].

Общее выражение для определения коэффициента теплоотдачи в трансформаторном масле имеет вид выражения (3.16).

Зависимости основных теплофизических свойств трансформаторного масла от температуры имеют следующий вид:

1) Теплопроводность [52]

$$\lambda_f(T) = \lambda_0 (1 - \beta \Delta T), \qquad (3.20)$$



Рис. 3.14. Изменение числа Прандтля трансформаторного масла в зависимости от температуры [29]

где β – температурный коэффициент трансформаторного масла, 1/град.

2) Кинематическая вязкость.

 $\nu(T) = 41,456e^{-0.029T},\tag{3.21}$

Формула (3.21) является экспоненциальной аппроксимацией табличной зависимости кинематической вязкости от температуры для трансформаторного масла, приведенной в [52]

3) Удельная теплоемкость при постоянном давлении [52]

$$\mathbf{c}_{p} = (0,7072 - 0,318\rho + \mathrm{T}(0,00147 - 0,00055\rho)) \cdot (0,067K + 0,35), \quad (3.22)$$

где $K=1,216\frac{\sqrt[3]{T_c}}{\rho}$ – характеризующий фактор; T_c – температура кипения, К.

4) Плотность трансформаторного масла [52]

$$\rho(T) = \rho_{20} - \alpha_1(T - 20). \tag{3.23}$$

В отличие от сухих трансформаторов теплообмен в масле проходит в среде местных турбулентных течений (имеющих место в торцовых зонах обмоток в замкнутом пространстве бака трансформатора), которые являются причиной крайне неравномерного распределения коэффициента теплоотдачи с поверхности обмоток масляного трансформатора (рис. 3.15.). В зоне каналов и межфазной зоне конвективное движение масла является ламинарным.

	КТО, расс по форму	КТО, рассчитанный в результате решения по формуле (3.16) уравнения Навье- Стокса, Вт/м ² К		Отклонение, %		
	OBH	OHH	OBH	OHH	OBH	OHH
ТСЛ-400/10	119,54	156,12	125,16	160,51	-4,59%	-2,77%
ТСЛ-630/10	124,32	162,57	131,21	163,41	-5,39%	-0,52%
ТСЛ-1000/10	128,98	144,32	137,65	152,32	-6,50%	-5,39%
ТСЛ-1600/20	111,83	136,89	121,02	142,12	-7,89%	-3,75%

Таблица 3.4. Результаты расчета среднего коэффициента теплоотдачи (КТО) по высоте с наружной поверхности обмоток масляного трансформатора ТМГ

3.1.4.4. Расчет тепловых сопротивлений теплоотдачи излучением

Вопрос теплоотдачи излучением касается только обмоток ВН сухих трансформаторов. Масляные трансформаторы во внимание не берутся, так как трансформаторное масло является непрозрачной средой.

Для сухих трансформаторов примем следующие допущения:

• концентры обмоток НН ТСЛ имеют примерно одинаковую температу-

ру, поэтому излучения между концентрами нет;

• обмотки НН и ВН имеют примерно одинаковую температуру, поэтому излучения в главном канале НН-ВН нет;

 излучение имеет место только с наружной поверхности обмоток ВН ТСЛ во внешнюю среду и между внутренней поверхностью обмоток НН и поверхностью сердечника.

Тепловое сопротивление теплоотдачи излучением с обмоток ВН трансформаторов ТСЛ определяется как

$$R_{rad} = \frac{1}{\alpha_{rad}S_k}.$$
(3.24)

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_{rad} = \frac{5.56 \cdot 10^{-8} \varepsilon \left(T_s^4 - T_o^4\right)}{\left(T_s - T_o\right)},\tag{3.25}$$

где ε – степень черноты поверхности обмоток; T_s – температура поверхности, К; T_o – температура окружающей среды, К [54].

3.2. Разработка метода теплового расчета на основе уточненной математической модели трансформатора

3.2.1. Основные положения метода теплового расчета уточненной математической модели трансформатора на основе разветвленных электрических схем замещения

Разрабатываемый метод теплового расчета уточненной математической модели трансформатора на основе разветвленных электрических схем замещения основывается на следующих положениях:

1. Принимается допущение о равномерном распределении потерь по элементам магнитопровода. Потери в магнитопроводе рассчитываются по методике [10]. Теплоотдача от магнитопровода к маслу рассчитывается по методике [11].

2. Осуществляется декомпозиция обмоток трансформатора с выделением элементов, распределение потерь в которых можно считать условно равномерным или отсутствующим, а соответствующий участок тепловой цепи может быть представлен одним тепловым сопротивлением.

3. Рассчитывается распределение потерь в элементах обмоток трансформатора с учетом их расположения в неоднородном магнитном поле трансформатора по методике, изложенной в разделе 2.

4. Рассчитываются тепловые сопротивления цепной модели трансформатора в соответствии с 1.3.4.

5. По результатам декомпозиции обмоток разрабатывается параметрический генератор ЭСЗ тепловой цепи обмоток.

6. С помощью разработанного в п. 5 параметрического генератора цепной модели обмоток и библиотеки моделирования электрических цепей ECLib автоматически строится ЭЗС тепловой модели обмоток. Номиналы электрических сопротивлений ЭСЗ принимаются равными номиналам тепловых сопротивлений участков тепловой цепи. Номиналы источников тока ЭСЗ принимаются численно равными теплопотерям соответствующих участков.

7. ЭСЗ тепловой модели обмоток рассчитывается методом переменных состояния с использованием библиотеки ECLib. Результаты расчета автоматически переводятся в тепловые величины с использованием масштабов подобия равных единице.

8. Теплоотдача от масляного трансформатора в окружающую среду рассчитывается по эмпирическим методикам [15,16].

9. По результатам теплового расчета определяются превышения температуры элементов трансформатора над температурой окружающей среды, которые используются в дальнейших расчетах, например, в оптимизации.

10. Окончательная проверка допустимости перегревов элементов спроектированного трансформатора осуществляется на полевой 3D-модели, созданной и рассчитанной с помощью имеющейся САЕ-системы.

Главное отличие разрабатываемого метода от аналогичных методов теплового расчета трансформаторов состоит в автоматическом построении и расчете разветвленных электрических схем замещения тепловых процессов с различной степенью детализации расчетной схемы, позволяющей достичь точности расчета, характерной для полевых задач при большем быстродействии за счет учета характерных симметрий. Данный метод позволяет учесть вытеснения тока в обмотках из ленты, циркуляционные токи в обмотках, которые мотаются несколькими параллельными проводниками и т.п. Уточненная тепловая модель может быть использована в процессе поиска оптимального решения на основе параметрической генерации модели.

3.2.2. Параметрическая генерация и расчет цепной модели теплового состояния трансформатора

Идею параметрического генератора ЭЗС тепловой цепи рассмотрим на примере фольговой обмотки НН распределительного трансформатора.

Рассматриваемая модель обмотки состоит из N_k концентров, разделенных каналом (воздушным или масляным). Число концентров N_k определяется

в ходе проектного расчета. Каждый концентр условно разбит на N_s расчетных секций. Число N_s выбирается проектировщиком исходя из точности расчета и оптимального времени, требуемого для расчета, а также количества точек по высоте обмотки, в которых ведется расчет температуры.

Каждая секция состоит из lambda-ветвей и alfa-ветвей (электрическая схема замещения секции представлена на рис. 3.7).

Lambda-ветви характеризуют процесс передачи тепла путем теплопроводности и делятся на

• lambda_r-ветви – теплопроводность в радиальном направлении;

• lambda_z-ветви – теплопроводность в осевом направлении.

Alfa-ветви характеризуют процесс отдачи тепла с поверхности концентров путем свободной конвекции и радиационного излучения.

Также в модель входят:

• lambda_k-ветви, которые моделируют перемещение нагретых воздушных масс в канале, со стороны внутренней и наружных поверхностей;

• lambda_is-ветви, которые моделируют торцевую изоляцию;

• alfa_is-ветви, отделяющие объем нагретого воздуха от объема воздуха при температуре окружающей среды;

• Q-ветви, которые содержат источник тепловыделения.

После построения концентра каждая секция дополняется:

- lambda_k-ветви (внутрь модели) – 2 ед.;

- lambda_k-ветви (канал) – 1 ед.;

- lambda_k-ветви (наружу модели) – 2 ед.;

а вся схема дополняется:

- lambda_is-ветвями $2N_k$ +1 ед. сверху и снизу.

Формирование матрицы соединений

Исходными данными (ИД) для формирования матрицы соединений являются число концентров *N_k* и число секций *N_s*.

По ИД рассчитываются число каналов: $N_{can} = N_k - 1$.

Определяем количество ветвей схемы *p*:

1) число lambda-ветвей

$$p_{lmb} = N_k \left(3N_s + 1\right) \tag{3.26}$$

2) число alfa-ветвей

$$p_{alfa} = 2N_k N_s \tag{3.27}$$

3) число lambda_k-ветвей

$$p_{lmbk} = 4 + N_k \tag{3.28}$$

Суммарное число lambda_is-ветвей и alfa_is-ветвей

$$p_{is} = 2 \cdot \left(2N_k + 1\right) \tag{3.29}$$

4) число Q-ветвей

$$p_Q = N_k N_s \tag{3.30}$$

5) общее число ветвей

$$p = 7N_k N_s + 5N_k + 3N_s + 2 \tag{3.31}$$

Определяем количество узлов схемы q:

1) число lambda-узлов – центров тепловыделения (характеристические узлы)

$$q_{lmb} = N_k N_s \tag{3.32}$$

2) число alfa-узлов (центры теплоотдачи с поверхности)

$$q_{alfa} = 2N_s \left(N_k + 1 \right) \tag{3.33}$$

3) число узлов в канале

$$q_{alfa} = N_s \left(N_k - 1 \right) \tag{3.34}$$

4) число із-узлов

$$q_{is} = 3N_k + 1$$
 (3.35)

5) общее число узлов схемы (включая нулевой узел)

$$q = 4N_k N_s + 3N_k + N_s + 2 \tag{3.36}$$

Величина значений параметров схемы, сопротивления, значения источников тепловыделения импортируются из подпрограммы расчета параметров схемы замещения. Матрица соединений **A** имеет размерность $q \times p$.

Каждой j-й ветви электрической схемы замещения соответствует элемент T_j вектора типов элементов, а также элементов V_j вектора номиналов. В генерируемой модели используются три типа элементов: сопротивление *R*, источник тока *I* и источник ЭДС *E*. Численные значения номиналов этих элементов записываются в вектор **V**.

Механизм параметрической генерации состоит в последовательной нумерации элементов и узлов схемы замещения. Первыми нумеруются сопротивления схемы замещения, вторыми – источники тока, третьими – источники ЭДС.

Для хранения номеров элементов и узлов схемы замещения созданы два вектора-строки:

1) P_vet – вектор-строка номеров элементов (ветвей) схемы замещения;

2) Q_uzl – вектор-строка номеров узлов схемы замещения.

В зависимости от количества концентров N_k и количества расчетных секций N_s номера N ветвей схемы замещения определяются с помощью следующих формул:

$$N_{(Rr)} = 3N_k + 4i + j(6N_k + 3)$$
(3.37)

$$N_{(R_z)} = 7N_k + 2i + j(6N_k + 3)$$
(3.38)

$$N_{(Ralfa)} = 3N_k + 4i + j(6N_k + 3) - 1$$
(3.39)

$$N_{(Rk)} = 4N_k + 2i + j(3N_k + 2)$$
(3.40)

где $i \in [1, N_k]; j \in [1, N_s]$

Номера узлов определяются по следующим формулам:

a) номера, соответствующие началам alfa-ветвей и концам радиальных lambda-ветвей

$$N_1 = N_k + i(4N_k + 5) - 1 \tag{3.41}$$

б) номера, соответствующие концам alfa-ветвей и началам air-ветвей

$$N_2 = N_k + i(4N_k + 5) - 2 \tag{3.42}$$

в) номера, соответствующие началам всех lambda-ветвей

$$N_3 = N_k + i(4N_k + 5) \tag{3.43}$$

г) номера, соответствующие концам осевых lambda-ветвей

$$N_4 = 5N_k + i(4N_k + 5) + 1 \tag{3.44}$$

д) номера, соответствующие концам air-ветвей в канале

$$N_4 = N_k + i(4N_k + 9) + 5 \tag{3.45}$$

где $i \in [1, N_k];$

На основе формул (3.37) – (3.45) параметрически генерируются матрица соединений **A**, матрица типов элементов **T** и матрица номиналов **N**. Фрагмент системы генерации и расчета ЭСЗ тепловой цепи распределительного трансформатора в среде Excel представлен на рис. 3.15.

После формирования перечисленных матриц они передаются в процессор библиотеки моделирования электрических цепей ECLib где происходят соответствующие перестановки и преобразования матриц к виду, подходящего для решения системы уравнений (см. 2).



Рис. 3.15. Фрагмент системы генерации и расчета ЭСЗ тепловой цепи трансформатора

Электрические величины (токи в ветвях схемы и распределение потенциалов в узлах), полученные в результате решения системы уравнений ЭСЗ, с помощью масштабных коэффициентов (равных единице) преобразуются в тепловые величины (тепловые потоки в ветвях и распределение температур в узлах рассматриваемой схемы замещения) и выводятся в графическом и табличном виде.

3.2.3. Параметрическая генерация и численное исследование тепловой модели трансформатора в полевой постановке

Тепловые модели в полевой постановке позволяют проектировщику решить целый ряд исследовательских задач, которые не доступны для решения другими средствами. К таким задачам, например, относятся:

1. Анализ движения охлаждающей жидкости в каналах масляного трансформатора (в сухих трансформаторах – воздуха).

2. Распределение температуры на поверхностях элементов.

3. Визуализация результатов в трехмерной постановке.

4. Определение среднего и локального коэффициента теплоотдачи с нагретой поверхности.

5. Определение зон ламинарного и турбулентного течения охлаждающей среды и др.

Решение такого рода исследовательских задач возможно с помощью программных средств Solidworks Flow simulation [104].

Математический аппарат Flow Simulation основывается на решении систем дифференциальных уравнений (1.2) - (1.8).

Для дискретизации дифференциальных уравнений во Flow simulation используется метод конечных объемов.

Параметрическая генерация тепловой модели трансформатора в полевой постановке основывается на взаимодействии нескольких сред программирования и моделирования: MS Excel, Solidworks и Flow simulation.

MS Excel позволяет систематизировать данные, полученные в ходе расчета трансформатора, необходимые для параметрической генерации полевой модели трансформатора для исследования теплового состояния. Это значительно упрощает процесс моделирования, однако возможности пакета SolidWorks [104] дают возможность автоматизировать весь процесс создания трехмерной модели.

Процесс организации автоматизированного визуального моделирования представлен на рис. 3.16.

Процесс автоматизации моделирования трансформатора начинается с формирования таблицы параметров. Таблица параметров служит для подстановки массива значений из документа Microsoft Excel в переменные модели. Эти значения могут быть как численными (например, величины размеров), так и логическими (элемент погашен/не погашен).



Рис. 3.16. Структура организации параметрической генерации и исследования полевой модели трансформатора

Сохраняется таблица параметров в документе 3D-модели, а создаваться может как с помощью инструментов SolidWorks, так и вручную в виде отдельного файла Microsoft Excel.

Импорт таблицы параметров производится возможностями SolidWorks API (SW API). SolidWorks API — это интерфейс, позволяющий разрабатывать пользовательские приложения для системы SolidWorks. API-интерфейс содержит функции, которые можно вызывать из программ Microsoft Visual Basic, VBA (Microsoft Excel, Word, Access и т.д.), Microsoft Visual C++ или из файлов-макросов SolidWorks. Эти функции предоставляют программисту прямой доступ к функциональным возможностям SolidWorks.

Фрагмент таблицы параметров для магнитопровода трансформатора представлен на рис. 3.17.

	A	В	C	D	E	F	G
1		b@Пакет1	h@Пакет1	B1@Пакет1	B2@Пакет2	В3@Пакет3	В4@Пакет4
2	Сердечник	360	1370	270	250	230	210

Рис.3.17. Фрагмент таблицы параметров

SolidWorks API можно использовать для решения различных задач. Наиболее популярными областями применения приложений SolidWorks API являются:

- интеграция SolidWorks с другими Windows CAD/CAM/CAEприложениями, Microsoft Office, Windows API;
- разработка специализированных модулей, добавляющих к базовым возможностям SolidWorks дополнительную функциональность.

В общем случае любая 3D-модель в SolidWorks является параметрической. Понятие параметризации можно понимать в следующем ключе. С точки зрения математики, конструкция изделия описывается геометрическими примитивами (точками, линиями, кривыми и т.д.), которые в свою очередь характеризуются параметрами: координатами, размерами, углами, допусками и т.п. Эти параметры могут быть выражены с помощью обычных переменных, рассчитаны по формулам или выбраны из баз данных. Таким образом, любая конструкция может быть полностью изменена путем изменения значений одной или нескольких управляющих переменных.

Существует несколько вариантов работы с параметрами модели, один их них – создание математических зависимостей, то есть уравнений, под которыми понимаются математические соотношения между геометрическими размерами модели, заданное с помощью имен размеров в качестве переменных. Все зависимости формируются в диалоговом окне «Уравнения» (рис. 3.18), которое вызывается непосредственно из среды SolidWorks.

Уравнения - Сердечник.SLDPRT								
	Акти	в	Уравнение		Равняется 3	аметн	🔺 Добавить	
	1	1	"D5@Пакет1"="B1@Пакет1"	V	270мм			
	1	2	"D2@Пакет1"="B1@Пакет1"	\checkmark	270мм		Редактирова	ть
	1	3	"B1yarma@Пакет1"="B1@Пакет1"	\checkmark	270мм			
	1	4	"D7@Пакет1"="B1yarma@Пакет1"	\checkmark	270мм		Редактировать в	sce
	1	5	"B2yarma@Пакет2"="B2@Пакет2"	\checkmark	250мм		Улалить)
	1	6	"D2@Пакет2"="B2@Пакет2"	\checkmark	250мм		удалито	
	1	7	"D3@Пакет2"="B2@Пакет2"	\checkmark	250мм		Конфигураци	1
	V	8	"b_2@Пакет2"="b@Пакет1" + ("B1@Пакет1"-"B2@Пакет2")	\checkmark	380мм			
	1	9	"h_2@Пакет2"="h@Пакет1" + ("В1@Пакет1"-"В2@Пакет2")	\checkmark	1390мм			
	1	10	"Dubler2@Массив1"=2*"D1@Вытянуть1" + "D2@Вытянуть2"	\checkmark	99мм			
	1	11	"D2@Пакет3"="B3@Пакет3"	\checkmark	230мм			
	V	12	"B3yarma@Пакет3"="B3@Пакет3"	\checkmark	230мм			
	V	13	"b_3@Пакет3"="b@Пакет1" + ("B1@Пакет1"-"B2@Пакет2")+("	\checkmark	400mm			
	1	14	"h_3@Пакет3"="h@Пакет1" + ("B1@Пакет1"-"B2@Пакет2")+("	\checkmark	1410мм			
		15	"Dubler 3@Массия?"=?*"D1@Вытонить1" + ?*"D2@Вытонить?"		144мм		*	
Уг	ловы	е еди	ницы уравнения: 🔹 ОК		Отмена		Справка	

Рис. 3.18. Список уравнений для построения модели магнитопровода трансформатора



Рис. 3.19. Полевая модель трансформатора ТСЛ-630

Результаты построения и расчета 3D-модели могут быть выведены в графическом, табличном виде, а также в виде распределения температурного поля по поверхности исследуемого объекта (рис. 3.19 – 3.20).



Рис.3.20. Результаты теплового расчета полевой модели ТСЛ-1000/10

Данный метод целесообразно применять при разработке и исследовании новых конструкций трансформаторов.

3.3. Тепловой расчет трансформатора с использованием уточненной математической модели на основе схем замещения

На основе результатов расчета потерь, полученных на основе расчета распределения тока в обмотках трансформатора (см. 2) с использованием библиотеки ECLib, получены распределения температур в концентрах фольговых обмоток масляных трансформаторов, приведенные в табл. 3.4 – 3.6 и на рис. 3.21 – 3.22.

Следует отметить, что экспериментальное получение кривых распределения температуры в центрах тепловыделений концентров фольговых обмоток масляных трансформаторов герметичного исполнения является сложной дорогостоящей задачей, т.к. требует использования специальных высокотемпературных сенсоров. Это связано с тем, что в качестве межслоевой изоляции в обмотках НН масляных трансформаторов используется бумага Krempel с запекаемым слоем эпоксидной смолы. Этот слой запекается в специальных печах при температуре 140 - 150 ⁰C.

Кроме того, для экспериментального определения распределения температуры в обмотках НН масляных трансформаторов необходима разработка специальной конструкции бака масляного трансформатора, которая позволит провести измерительные кабели к обмоткам НН из ленты при сохранении герметичности. В связи с этим для верификации расчетных распределений температур в обмотках трансформатора необходимо найти расчетное среднее превышение температуры обмоток НН над температурой охлаждающей среды и сравнивать его с результатами тепловых испытаний, проводимых по [1]. Точность измерений зависит от класса точности измерительных приборов, а также от точности метода измерений сопротивления обмоток [1].

Следует сказать, что в данном разделе в рассмотрение берется обмотка НН, как наиболее нагретая относительно других частей трансформатора, хотя предлагаемый метод может быть применен к тепловому расчету обмоток ВН.

	№ концентра				
№ секции	Концентр №1	Концентр №2	Концентр №3		
1	47,63	44,64	46,79		
2	46,67	43,74	44,28		
3	44,87	41,23	43,49		
4	44,40	39,66	42,71		
5	44,40	38,93	41,98		
6	44,61	38,96	42,01		
7	45,96	39,63	42,68		
8	51,49	47,63	50,68		
9	59,72	55,15	58,20		
10	77,63	71,40	71,51		
11	117,51	102,62	107,51		
Среднее превышение температуры в концентрах	56,81	51,24	53,80		
Сре	Среднее превышение температуры, ⁰ С 53,95				

Таблица 3.5. Результаты расчета распределения температур в центрах тепловыделений обмоток НН трансформатора ТМГ-630/10



Рис. 3.21. Результаты расчета распределения температуры в секциях ОНН трансформатора ТМГ-630/10.

	№ конц	центра
№ секции	Концентр №1	Концентр №2
1	49,24	51,39
2	48,34	48,88
3	45,83	48,09
4	44,26	47,31
5	43,53	46,58
6	43,56	46,61
7	44,23	47,28
8	52,23	55,28
9	59,75 62,80	
10	10 76,00 76,11	
11	107,22	112,11
Среднее превышение температуры в концентрах	55,84	58,40
Средн	нее превышение температуры, ⁰	C 57,12

Таблица 3.6. Результаты расчета распределения температуры в центрах тепловыделений обмоток НН ТМГ-1000/10



Рис.3.22. Результаты расчета распределения температуры в секциях ОНН трансформатора ТМГ-1000/10

Сравнение результатов расчета распределения температуры по высоте концентра ОНН, граничащего с главным каналом с помощью цепных моделей на основе схем замещения и полевых моделей представлено на рис.3.23-3.24. Как было сказано выше, модели на основе эмпирических методик не дают картины распределения температуры по высоте обмоток и других частей трансформатора, а дают только среднее превышение температуры над температурой охлаждающей среды.





Рис. 3.23. Расчет распределения температуры по высоте наружного концентра обмоток НН, граничащего с главным каналом ТМГ-630/10, на основе разработанных цепных и полевых моделей

Рис. 3.24. Расчет распределения температуры по высоте наружного концентра обмоток НН, граничащего с главным каналом ТМГ-1000/10, на основе разработанных цепных и полевых моделей

Особое внимание здесь необходимо уделить оценке времени теплового расчета с использованием предлагаемых моделей для теплового расчета на основе схем замещения и времени теплового расчета с использованием полевых моделей, а также на основе эмпирических методик (см. табл. 3.7)

Таблица 3.7. Оценка времени теплового расчета с использованием различных моделей

Tur	Расчетное время, ч				
ТИП	Модели на основе схем замещения	Полевые модели			
ТМГ-400/10	8,33E-04	17,12			
ТМГ-630/10	9,57E-04	12,34			
ТМГ-1000/10	10,29E-04	15,87			
ТМГ-1600/10	11,12 E-04	16,87			
Среднее время расчета, ч	9,83E-04	15,55			

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. Разработанный метод параметрической генерации и теплового расчета ЭСЗ тепловых процессов позволяют повысить эффективность проектирования трансформаторов путем значительного увеличения скорости вычислений при обеспечении точности, соответствующей полевым моделям. Поэтому дальнейшее создание быстродействующих подсистем теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов с высокой точностью расчетов, которые могут использоваться при оптимизации трансформаторов, является перспективной задачей.

2. Разработанный метод теплового расчета трансформатора с использованием разветвленных ЭСЗ опирается на факт изоморфизма уравнений, описывающие явления различной природы. Это позволяет в дальнейшем распространить разработанный метод, например, на гидродинамические и аэродинамические расчеты системы охлаждения трансформатора.

3. Разработанный метод отличается от известных методов, основанных на электротепловой аналогии, тем, что выводит эти методы на новый уровень автоматизации, осуществляемой путем гибкого программирования численного эксперимента с использованием универсальных средств моделирования электрических цепей.

4. Использование разработанных моделей позволяет не только оценивать численно тепловое состояние обмоток трансформатора, но осуществлять анализ проектных решений и формулировать рекомендации по совершенствованию конструкции трансформатора. В частности, анализ таблиц 3.4 – 3.5 показывает, что распределение температуры в центрах тепловыделений концентров обмоток носит нелинейный характер. Наиболее перегретым является участок, соответствующий верхней секции наружного концентра обмотки НН, граничащего с главным каналом. В качестве рекомендаций предлагается уменьшить число витков наружного концентра обмотки НН.

4. РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР ТРАНСФОРМАТОРОВ 4.1. Структура и принцип работы системы теплового анализа в САПР трансформаторов

Разработанные уточненные модели и методы теплового расчета являются основой для создания многоуровневой системы теплового анализа в САПР трансформаторов, которая была использована в тепловом расчете распределительных трансформаторов типа ТСЛ и ТМГ 2 и 3 габарита мощности, выпускаемых ООО «Трансформер». Рабочее название системы – SHAPT (System Heat transfer Analysis of Power Transformers)

Структура SHAPT базируется на трех расчетных уровнях:

1. Первый уровень – расчет на основе моделей по инженерным методикам. Проводится для определения предварительной температуры масла в системе охлаждения для ускоренного оптимизационного расчета.

2. Второй уровень – тепловой расчет на основе разработанных уточненных тепловых моделей на основе разветвленных электрических схем замещения. Является ядром теплового расчета для использования в системах оптимизации.

3. Третий уровень – тепловой расчет полевой 3D-модели активной части трансформатора. На третьем уровне осуществляется виртуальный эксперимент, призванный заменить тепловые испытания опытного образца. Проводится в случае разработки новых серий трансформаторов в целях снижения затрат на изготовление опытных образцов.

Структура SHAPT и взаимосвязь с другими подсистемами САПР сухих и масляных трансформаторов представлены на рис. 4.1 и рис. 4.2.



Рис. 4.1 Структура подсистемы теплового расчета масляного трансформатора

Алгоритм работы подсистемы теплового расчета масляного трансформатора

В результате поверочного расчета определяется геометрические размеры активной части и бака трансформатора и соответствующие потери. На первом уровне SHAPT на основе инженерных методик проводится предварительный расчет превышений температур обмоток над температурой масла. Так как температура масла заранее неизвестна, то проектировщику следует определить её предварительное значение как результат расчета системы охлаждения по инженерным методикам. Рассчитанные превышения температур обмоток передаются в подсистему расчета системы охлаждения (ПРСО) (как было сказано выше, технология расчета системы охлаждения основана на инженерных методиках) (стрелка 1, рис. 4.1). В ПРСО производится уточненный расчет температуры масла, которая передается в блок 1 уровня SHAPT, где снова проводится расчет превышения температуры обмоток над температурой масла, уже с использованием расчетных значений температуры
масла (стрелка 2, рис. 4.1). Цикл 1-2-1 повторяется до тех пор, пока разница между заданным значением температуры масла и рассчитанным не достигнет 0,5 °C.

После предварительного расчета системы охлаждения данные передаются в подсистему оптимизации конструкции (ПОК) (стрелка 3, рис.4.1). ПОК варьирует параметры конструкции трансформатора в целях поиска оптимального решения и формирует новые параметры конструкции. Эти новые параметры попадают в блок 2 уровня SHAPT, где происходит уточненный тепловой расчет активной части на основе электрических схем замещения (стрелка 4, рис. 4.1). Рассчитанные уточненные превышения температур активной части передаются в ПРСО (стрелка 5, рис. 4.1). Цикл 3-4-5-3 повторяется до тех пор, пока не будут удовлетворены все граничные условия задачи оптимизации, в том числе и ограничения превышения температур.

При исследовании принципиально новых конструкций трансформаторов используется блок 3 уровня SHAPT, в котором решается исследовательская задача теплового расчета активной части в полевой постановке.

После нахождения оптимального решения по рассчитанным оптимальным параметрам (стрелка 6, рис. 4.1) строится тепловая модель активной части в полевой постановке и проводится соответствующий тепловой расчет. Ожидается, что точность расчета 2-го и 3-го уровней достаточно близки и расчет 3-го уровня больше связан с более наглядной визуализацией распределения температурного поля на поверхности активной части трансформатора и учета особенностей новой конструкции.

Алгоритм работы подсистемы теплового расчета сухого трансформатора

Принцип работы SHAPT в части теплового расчета сухого трансформатора аналогичен описанному для масляных трансформаторов. Разница заключается лишь в том, что в данном случае отсутствует ПРСО, так как у сухих трансформаторов одна система охлаждения. Следует отметить, что в бо-

лее общем случае имеет место производство трансформаторов в защищенном исполнении (в металлическом кожухе) и с принудительной вентиляцией воздуха. Для теплового и вентиляционного расчетов таких трансформаторов в основном используются полевые модели. Объектом настоящей диссертации являются трансформаторы с естественным охлаждением.



Рис. 4.2. Структура подсистемы теплового расчета сухого трансформатора

4.2. Интеграция системы теплового анализа в САПР трансформаторов

САПР распределительных трансформаторов представляет собой совокупность программных средств, разработанных на основе методик проектного и поверочного расчета трансформаторов.

Интеграция системы теплового анализа SHAPT в САПР трансформаторов заключается в написании соответствующего программного кода в подсистеме поверочного расчета САПР трансформаторов. Листинг программного кода в файле PPR.m (подпрограмма поверочного расчета) приведен в приложении 1 настоящей диссертации.



Рис. 4.3. Упрощенная блок-схема подсистемы поверочного расчета САПР распределительных трансформаторов

Структура подсистемы поверочного расчета САПР состоит из следующих основных модулей, написанных в среде MATLAB:

1. PPR.m – подпрограмма поверочного расчета.

- 2. InitPPR.m подпрограмма инициализации поверочного расчета.
- 3. Optimum_TMG.m подпрограмма оптимизации.
- 4. BeginOptimumTMG.m подпрограмма оптимизационного расчета.

Упрощенная блок-схема подсистемы поверочного расчета САПР трансформаторов и место SHAPT в ней приведены на рис. 4.3.

Программная реализация

Программная реализация SHAPT проведена с помощью взаимосвязанного комплекса приложений: Microsoft Excel со встроенной средой программирования Visual Basic, Matlab, Solidworks Flow simulation (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Взаимосвязь программных сред, используемых в программной реализации системы теплового анализа SHAPT в САПР распределительных трансформаторов

Диалог SHAPT с пользователем осуществляется через интерфейс, реализованный в файле Excel (рис.4.5). Все исходные данные для расчета передаются из файла Excel с помощью макросов среды Visual Basic в среду Matlab посдедчтво интерфейса ExcelLink. В Matlab осуществляются вычисления, в том числе и тепловые расчеты 1-го и 2-го уровней. Результаты расчетов выводятся в виде графиков в Matlab и передаются обратно в файл Excel. Параметрическая генерация полевой модели активной части и тепловой расчет 3го уровня осуществляются программными средствами Solidworks Flow Simulation.



Рис.4.5. Интерфейс системы теплового анализа SHAPT в САПР трансформаторов

4.3. Апробация системы теплового анализа в САПР трансформаторов

4.3.1 Тепловой расчет сухих трансформаторов с литой изоляцией типа ТСЛ 400-1600 кВА класса напряжения 10 кВ

Разработанная система теплового анализа SHAPT была использована при расчете сухих трансформаторов типа ТСЛ с литой изоляцией, производимых на ООО «Трансформер» (рис. 4.6 – 4.7).



Рис. 4.6. Сухой трансформатор типа ТСЛ



Рис. 4.7. Тепловая модель трансформатора типа ТСЛ в полевой постановке

Допущения, принятые в тепловой модели трансформатора ТСЛ:

1. Ярмовые балки и опоры трансформатора в модели не учитываются.

2. Выводы шин НН и нулевая шина в модели не учитываются.

Результаты расчета и сравнение с результатами тепловых испытаний трансформаторов ТСЛ приведены в табл. 4.1 – 4.2.

Таблица 4.1. Средние превышения температуры обмоток НН трансформатора ТСЛ над температурой окружающего воздуха, °С

Тип трансформа- тора	1 уровень	2 уровень	3 уровень	Тест
ТСЛ-400/10	55,89	71,24	74,83	78,12
ТСЛ-630/10	58,05	72,81	77,45	80,37
ТСЛ-1000/10	65,12	83,12	85,98	89,51
ТСЛ-1600/10	70,87	91,49	93,21	95,16

Таблица 4.2. Отклонения результатов расчета температуры обмоток НН трансформатора ТСЛ над температурой окружающего воздуха от результатов тепловых испытаний, %

Тип трансформа- тора	1 уровень	2 уровень	3 уровень
ТСЛ-400/10	-33,18%	-9,21%	-4,30%
ТСЛ-630/10	-32,25%	-9,87%	-3,70%
ТСЛ-1000/10	-31,55%	-7,40%	-4,02%
ТСЛ-1600/10	-29,26%	-3,93%	-2,07%

Таблица 4.3. Средние превышения температуры обмоток ВН трансформатора ТСЛ над температурой окружающего воздуха, °С

Тип трансформа- тора	1 уровень	2 уровень	3 уровень	Тест
ТСЛ-400/10	51,52	79,83	82,29	85,95
ТСЛ-630/10	50,08	78,25	80,90	83,14
ТСЛ-1000/10	53,26	73,64	75,74	79,21
ТСЛ-1600/10	61,38	82,14	86,67	87,84

Таблица 4.4. Отклонения результатов расчета обмоток ВН трансформатора ТСЛ над температурой окружающего воздуха от результатов тепловых испытаний, %

Тип трансформа- тора	1 уровень	2 уровень	3 уровень
ТСЛ-400/10	-50,09%	-7,38%	-4,35%
ТСЛ-630/10	-49,63%	-6,06%	-2,73%
ТСЛ-1000/10	-39,18%	-7,29%	-4,48%
ТСЛ-1600/10	-35,46%	-6,71%	-1,34%

Испытание на нагрев трансформаторов проводилось в соответствии с ГОСТ 3484.2 [1] п. 2.4 (метод условной нагрузки). В результате испытаний на

нагрев в соответствии с [1] определяются средние превышения температур обмоток трансформатора над температурой охлаждающей среды. В связи с этим для установления достоверности результатов теплового расчета с применением системы теплового анализа SHAPT в табл. 4.1 и 4.3 определены соответствующие средние превышения температур обмоток трансформатора над температурой охлаждающей среды с использованием моделей 1, 2 и 3 уровня.

Сравнение результатов расчета распределения температуры по высоте обмоток ВН ТСЛ с помощью цепных моделей 2 уровня и полевых моделей 3 уровня представлено на рис.4.8-4.9. Стоит отметить, что модели 1 уровня на основе [14] не только не дают картины распределения температуры по высоте обмоток и других частей трансформатора, а также дают большие погрешности (см. табл.4.2. и табл.4.4.) при расчете среднего превышения температуры над температурой охлаждающей среды.



Рис. 4.8. Расчет распределения температуры на поверхности обмоток ВН ТСЛ-630/10 на основе разработанных цепных и полевых моделей



Рис. 4.9. Расчет распределения температуры на поверхности обмоток ВН ТСЛ-1000/10 на основе разработанных цепных и полевых моделей



Рис. 4.10. Результаты тепловых испытаний трансфоматора ТСЛ-1000/10/0,4 D/Y-11: а) Термограмма, снятая с помощью тепловизора; б) распределение температур вдоль обмотки фазы А – линия 1 рис.а; в) распределение температур вдоль обмотки фазы В – линия 2 рис.а; г) распределение температур вдоль обмотки фазы С – линия 3 рис.а;



Рис. 4.11. Гистограмма распределения температур в трансформаторе ТСЛ-1000/10/0,4



Рис. 4.12. Результаты теплового анализа трансформатора ТСЛ-1000/10/0,4 с применением моделей 3 уровня в полевой постановке

Анализ результатов рис. 4.10 - 4.15 показывает, что распределение температурного поля по поверхности корпусов обмоток трансформаторов ТСЛ-с литой изоляцией характеризуется значительной неоднородностью. Области с максимальными температурами реализуются в межкатушечнах зонах, что связано с ухудшенными условиями теплоотдачи. Гистограмма распределения температур (рис. 4.11 и рис. 4.14) имеет несколько экстремумов в области температур 90°C-125 °C, что характеризует тот факт, что на поверхностях катушек реализуется несколько зон с различным уровнем тепловыделения и теплоотдачи. Аналогичные результаты получены с использованием моделей 3 уровня в полевой постановке (рис. 4.12 и рис. 4.15).



Рис. 4.13. Результаты тепловых испытаний трансфоматора ТСЛ-1600/10/0,4 D/Y-11: а) Термограмма, снятая с помощью тепловизора; б) распределение температур вдоль обмотки фазы А – линия 1 рис.а; в) распределение температур вдоль обмотки фазы В – линия 2 рис.а; г) распределение температур вдоль обмотки фазы С – линия 3 рис.а;



Рис. 4.14 Гистограмма распределения температур в трансформаторе ТСЛ-1600/10/0,4



Рис. 4.15. Результаты теплового анализа трансформатора ТСЛ-1600/10/0,4 с применением моделей 3 уровня в полевой постановке

Следует обратить внимание на то, что на высоте равной половине высоты обмоток наблюдается снижение температуры. Это связано с тем, что в центре обмоток расположены катушки с регулировочными витками, и в номинальном режиме задействовано только половина витков, соответственно и тепловыделение в этих катушках в 2 раза меньше, чем в основных катушках.

4.3.2. Тепловой расчет герметичных масляных трансформаторов типа ТМГ 400-1600 кВА класса напряжения 10 кВ

Для теплового расчета масляных трансформаторов также была использована система теплового анализа SHAPT в САПР распределительных трансформаторов.

Особенности использования SHAPT в тепловом расчете масляных трансформаторов:

1. Решение задачи в полевой постановке сводится к решению двух зависимых задач: тепловой расчет системы охлаждения и тепловой расчет обмоток в условиях, моделирующих в качестве окружающей среды трансформаторное масло при температуре, близкой к 60°С.

Приложение Flow simulation обла-



Рис. 4.16. Трансформатор типа ТМГ, производимый ООО «Трансформер»

дает возможностью решения задачи с двумя хладагентами, разделенных твердой стенкой, но в данном случае расчетная модель гофрированного бака значительно усложняется большим количеством гофр, числом концентров обмоток НН и ВН, а также наличием шихтованного магнитопровода, что занимает значительные ресурсы и не позволяет широко применять данный метод.

В связи с этим для проведения теплового расчета активной части масляного трансформатора необходимо провести расчет системы охлаждения, в результате которого рассчитывается температура масла в средних слоях и верхних слоях. Следует отметить особенность полевых моделей активной части трансформатора: в полевых моделях нет возможности задать разную температуру охлаждающей среды по высоте. Это возможно сделать только при наличии твердой границы между жидкостями. Но введение твердой границы между средними и верхними слоями масла вносит сущест-

венное искажение в постановку задачи и, соответственно, приводит к неверным результатам. Поэтому при расчете полевой модели принято допущение о том, что температура масла по всему объему равна температуре масла в средних слоях.

Описанный недостаток полевой модели устраняется путем использования цепных моделей 2-го уровня на основе разветвленных электрических схем замещения.

Разные температуры масла по высоте активной части учитываются путем расчета коэффициента теплоотдачи с элементов секций соответствующих обмоток.

Результаты расчета и сравнение с результатами тепловых испытаний трансформаторов ТМГ приведены в табл. 4.5 – 4.6.

Таблица 4.5. Средние превышения температур обмоток НН ТМГ над температурой окружающей среды, °С

Тип	1 уровень	2 уровень	3 уровень	Тест
ТМГ-400/10	69,90	56,53	50,31	52,04
ТМГ-630/10	67,86	53,95	49,14	50,84
ТМГ-1000/10	75,87	57,12	51,4	53,92
ТМГ-1600/10	76,94	59,34	55,08	56,12

Таблица 4.6. Отклонения результатов расчета температуры обмоток НН трансформатора ТМГ над температурой окружающего воздуха от результатов тепловых испытаний, °С

Тип трансформа- тора	1 уровень	2 уровень	3 уровень
ТМГ-400/10	29,29%	8,27%	-3,38%
ТМГ-630/10	28,68%	5,94%	-3,40%
ТМГ-1000/10	33,82%	5,76%	-4,79%
ТМГ-1600/10	31,29%	5,58%	-1,87%

Таблица 4.7. Средние превышения температур обмоток ВН ТМГ над температурой окружающей среды, °С

Тип	1 уровень	2 уровень	3 уровень	Тест
ТМГ-400/10	71,24	58,12	60,19	61,01
ТМГ-630/10	68,96	54,79	61,14	58,67
ТМГ-1000/10	76,67	58,24	63,28	61,71
ТМГ-1600/10	82,25	64,51	62,18	62,59

Таблица 4.8. Отклонения результатов расчета температуры обмоток ВН трансформатора ТМГ над температурой окружающего воздуха от результатов тепловых испытаний, °С

Тип трансформа- тора	1 уровень	2 уровень	3 уровень
ТМГ-400/10	15,47%	-4,85%	-1,35%
ТМГ-630/10	16,12%	-6,84%	4,12%
ТМГ-1000/10	21,62%	-5,79%	2,51%
ТМГ-1600/10	27,15%	3,02%	-0,66%



Рис. 4.17. Гистограмма распределения температур в трансформаторе ТМГ-630/10/0,4



Рис. 4.18. Результаты теплового анализа трансформатора ТМГ-630/10/0,4 с применением моделей 3 уровня в полевой постановке

Анализ гистограммы на рис.4.17 показывает то, что температурное поле по поверхности баков масляных трансформаторов характеризуется монотонностью без значимых неоднородностей.



Рис. 4.19. Результаты тепловых испытаний трансфоматора ТМГ-630/10/0,4 D/Y-11: а) Термограмма, снятая с помощью тепловизора; б) распределение температур вдоль горизонтальной линии по длине бака – линия 1 рис.а; в) распределение температур вдоль вертикальной линии – линия 2 рис.а; г) распределение температур вдоль вертикальной линии – линия 3 рис.а.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Разработан прикладной программный комплекс, позволяющий проводить всесторонний тепловой анализ распределительных трансформаторов сухого и масляного исполнения.

2. Программный комплекс может быть использован при проектировании новых моделей распределительных трансформаторов. Использование программного комплекса позволяет значительно уменьшить объем натурных испытаний при расчете новых моделей распределительных трансформаторов.

3. Использование разработанного программного комплекса в рамках конструкторского отдела ООО «Трансформер» позволило на 23 % сократить затраты на проведение проектных работ и испытаний опытных образцов распределительных трансформаторов при разработке новых моделей.

4. Результаты тепловых испытаний распределительных трансформаторов и сравнение с ними результатов теплового анализа с применением разработанного программного комплекса говорить о достоверности работы разработанного программного комплекса.

5. Применение программного комплекса в совместной работе с подсистемами оптимизации САПР трансформаторов позволяет рассчитывать оптимальные модели распределительных трансформаторов с высокой точностью и высоким быстродействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании созданных в рамках данной работы моделей и программных средств была создана система теплового анализа распределительного трансформатора, являющаяся элементом САПР трансформаторов. Данная система является приложением, способным работать в связке с существующими САЕ-системами. Сравнение этой системы с существующими программными продуктами показало, что по точности и универсальности моделей она не уступает современным САЕ-системам. Кроме того, для проверки точности работы подсистемы были использованы данные, полученные экспериментальным путем. Сравнение результатов эксперимента с результатами расчета говорит о допустимой для инженерных задач точности.

При разработке моделей, лежащих в основе разработанной системы теплового анализа САПР распределительных трансформаторов, основное внимание уделялось повышению скорости расчета при сохранении точности, характерной для полевых моделей. При этом были предложена модель, которых представляет собой разветвленную электрическую схему замещения, основанную на использовании явления изоморфизма уравнений физических процессов и практически не уступающую по быстродействию традиционным цепным моделям, а по точности и расчета и учету особенностей конструкции распределительного трансформатора – полевым моделям. Для повышения эффективности взаимодействия «проектировщик-система» разработан метод параметрической генерации и численного исследования цепной модели на основе разветвленной электрической схемы замещения, не имеющий аналогов в существующих САПР распределительных трансформаторов и позволяющий осуществлять многократную перегенерацию цепных моделей на этапе оптимизации проекта.

Дальнейшее направление работ состоит в расширении использования библиотеки моделирования цепных моделей на основе разветвленных ЭСЗ в применении к другим процессам, протекающим в трансформаторе, например,

распределение импульсных перенапряжений, электродинамических усилий в режиме КЗ, тем самым создавая единую среду проектирования трансформаторов, обладающую высокой точностью и быстродействием.

Основные результаты работы:

1. Разработана эффективная подсистема теплового анализа САПР распределительных трансформаторов.

2. Разработана универсальная автономная библиотека моделирования электрических цепей.

3. Разработаны цепные модели на основе ЭСЗ физических процессов в обмотках трансформатора, позволяющие решать с высокой точностью исследовательские задачи и задачи инженерных расчетов.

4. Разработаны методы параметрической генерации цепных моделей, позволяющие автоматизировать процесс построения и численного исследования моделей, значительно снижающие трудоемкость проектирования.

5. Разработаны способы интеграции тепловых моделей в рамках единой проектной среды, в частности, на базе математических процессоров.

6. Получены экспериментальные результаты, подтверждающие достоверность работы разработанного программного комплекса.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Параметрически генерируемая комбинированная модель и метод для расчета распределения токов в обмотках распределительного трансформатора с учетом неоднородности магнитного поля.
- Параметрически генерируемая цепная модель на основе разветвленных электрических схем замещения и метод анализа теплового состояния активной части распределительного трансформатора.
- 3. Библиотека моделирования электрических цепей в среде MatLab.
- Программный комплекс, представляющий собой быстродействующую систему теплового анализа САПР распределительного трансформатора, обладающую высокой точностью расчетов и результаты его практиче-

ского использования при тепловом расчете распределительных трансформаторов;

5. Практические рекомендации по совершенствованию моделей трансформаторов, выпускаемых ООО «Трансформер» (г. Подольск)

Личный вклад автора состоит

- в непосредственном участии разработке, отладке и адаптации к САПР распределительных трансформаторов универсальной библиотеки моделирования электрических цепей;
- в разработке параметрически генерируемых цепных моделей для расчета распределения потерь в обмотках с учетом эффекта вытеснения тока и теплового расчета активной части распределительного трансформатора;
- в разработке методов параметрической генерации и численного исследования цепных моделей.
- в разработке многоуровневой системы теплового анализа распределительного трансформатора;
- в проведении численных и натурных экспериментов и разработке рекомендаций по совершенствованию моделей распределительных трансформаторов

БИБЛИОГРАФИЯ

Нормативные документы

- 1. ГОСТ 3484.2-88 Трансформаторы силовые. Испытания на нагрев.
- 2. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения.
- 3. ГОСТ 23501.101-87 Системы автоматизированного проектирования. Основные положения.
- 4. ГОСТ Р 52719-2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
- 5. BS IEC 60076-7:2005 Power transformers. Loading guide for oil-immersed power transformers / Трансформаторы силовые. Часть 7. Руководство по нагрузке масляных силовых трансформаторов.

Руководящие документы

- 6. РД 16 252-85 Расчет температуры обмоток при внешних коротких замыканиях и ударных толчках нагрузки.
- 7. РД 16 253-85 Расчет тепловой постоянной времени.
- 8. РД 16 254-85 Трансформаторы силовые масляные мощностью до 100 МВА. Расчет нагрева масла, обмоток и отводов при перегрузках.
- 9. РД 16 303-86 Трансформаторы силовые масляные. Тепловой расчет обмоток с различными способами интенсификации теплообмена.
- 10. РД 16 317-86 Трансформаторы силовые. Расчет потерь и тока холостого хода.
- 11. РД 16 415-88 Остовы. Методика теплового расчета.
- 12. РД 16 437-88 Трансформаторы силовые. Расчет тепловой постоянной времени обмоток.
- 13. РД 16 452-88 Трансформаторы силовые масляные с системами охлаждения М и Д. Тепловой расчет обмоток.
- 14. РД 16 472-88 Трансформаторы силовые сухие общего назначения. Тепловой расчет.

15. РД 16 476-88 Трансформаторы силовые масляные. Тепловой расчет систем охлаждения М и Д.

Книги, монографии, статьи

- Автоматизированное проектирование электрических машин / Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов, В.П. Шишкин. М.: Высш. шк., 1989. 280 с.
- 17. **Аврух, В.Ю.** Теплогидравлические процессы в турбо- и гидрогенераторах / В.Ю. Аврух, Л.А. Дугинов. М.:Энергоатомиздат, 1991. 208 с.
- Берковский, Б.М. Вычислительный эксперимент в конвекции/
 Б.М. Берковский, В.К. Полевиков. Мн.: Университетское, 1988. 167 с.
- 19. Бики, М.А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчет основных параметров / М.А. Бики. М.: Знак, 2013. 612 с.
- 20. Богданова, Е.В. Программно-методическое обеспечение расчетов трансформаторов / Е.В. Богданова, В.Ф. Иванов, Ю.Н. Шафир // Тезисы докладов XI междунар. науч.-техн. конф. (Трансформаторостроение – 2005). – Запорожье, 2005. – С. 76-77.
- 21. Боднар, В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов / В.В. Боднар. М.: Энергоатомиздат, 1983. 176 с.
- Бородулин, Ю.Б. Автоматизированное проектирование силовых трансформаторов / Ю.Б. Бородулин, В.А. Гусев, Г.В. Попов.– М.:Энергоатомиздат, 1987. 216с.
- 23. Бунин, А.Г. Расчет распределения токов и напряжений в обмотках трансформаторов / А.Г. Бунин, М.Ю. Виногреев, Л.Н. Конторович. – Электротехника, 1977, №4, с.8-11.
- 24. Васютинский, С.В. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С.В. Васютинский. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
- 25. Веников, В.А. Физическое моделирование электрических систем / В.А. Веников, А.В. Иванов-Смоленский. – М.:, Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1956. – 359 с.

- 26. Дулькин, И.Н. Метод расчета максимальных температур обмоток и масла силовых трансформаторов при переменной нагрузке / И.Н. Дулькин, И.Ш. Люблин // Сб. научн. тр. ВЭИ «Высоковольтная и преобразовательная техника» М.: ВЭИ, 2001.
- 27. Егоров, В.И. Точные методы решения задач теплопроводности. Учебное пособие / В.И. Егоров. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. 48 с.
- 28. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. М.: «Энергия», 1975. – 934 с.
- 29. **Иванов, А.В.** Разработка моделей и методики оптимального проектирования токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты: дисс. ... канд. техн. наук. Иваново, 2011. 123 с.
- Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 656 с.
- 31. Казаков, Ю.Б. Конечно-элементное моделирование физических полей в электрических машинах / Ю.Б. Казаков, Ю.Я. Щелыкалов, Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2001. – 100 с.
- 32. Карапетян, Н.В. Применение нейронных сетей в аналитических моделях систем мониторинга трансформаторного оборудования / Н.В. Карапетян, В.А. Туркот, А.А. Филиппов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. Вып. 6. С.15-19.
- Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер, пер. с англ. – М.: Издательство «Наука», 1964. – 488 с.
- 34. Климов, Д.А. Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / Д.А. Климов, Г.В. Попов, А.И. Тихонов // ГОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2006. – 100 с.
- 35. Конвективный тепло- и массоперенос / В. Каст [и др.]; пер. с нем. М.: Энергия, 1980. – 49 с.

- 36. Киш, Л. Нагрев и охлаждения трансформаторов / пер. с венгерского, под ред. Тарле Г.Е. М.: Энергия. 1980. 208 с.
- 37. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. / Л.А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 228 с.
- 38. Коздоба, Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса / Л.А. Коздоба. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
- 39. **Копылов, И.П.** Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
- 40. Корнев, И.А. Параметрическая модель для расчета распределения тока в фольговых обмотках распределительного трансформатора с использованием библиотеки численного моделирования электрических цепей/ И.А. Корнев, А.В. Стулов, А.И. Тихонов //Тезисы докл. междунар. науч.техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – Т.3– С. 177-181
- 41. Корнев, И.А. Расчет физических процессов произвольной природы с использованием библиотеки моделирования электрических цепей/ И.А. Корнев, А.И. Тихонов // (XVII Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. -С.175-178.
- 42. Корнев, И.А. Инвариантная библиотека моделирования электромеханических цепей / И.А. Корнев, А.И. Тихонов // «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тезисы докладов девятнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Том 2 – М: МЭИ, 2013 г. – С.146.
- 43. Коростелев, К.А. Разработка способов упрощения электрической схемы замещения тепловой модели обмоток трансформаторов и токоограничивающих реакторов/К.А. Коростелев, А.И. Тихонов, А.В. Стулов//Тезисы докл. междунар. науч.- техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – Т.3 – С.181-185

- 44. **Корячко, В.П.** Теоретические основы САПР / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
- 45. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. пер. с англ. М.: Мир, 1983. – 512 с.
- 46. **Кутателадзе, С.С.** Основы теории теплообмена. Изд. 5-е перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- 47. Лазарев, Ю.В. Моделирование процессов и систем в МАТLАВ: Учебный курс / Ю.В. Лазарев. СПб.: Питер; Издательская группа BHV, 2005. 512 с.
- 48. Лапин, А.Н. Основы автоматизированного проектирования электромеханических устройств: учеб. пособие / А.Н.Лапин . – Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 1994. – 88 с.
- 49. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес. М.: Энергия, 1981. 392 с.
- 50. Лейтес, Л.В. Оценка добавочных потерь в обмотках трансформаторов, выполненных из фольги. / Л.В. Лейтес, Л.А. Мастрюков, Е.Л. Трухин // Электротехника, 1975. – №4. С. 50-52.
- 51. Ли, К. Основы САПР / К. Ли СПб: Питер, 2004. 560 с.
- 52. Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло. 3-е изд., перераб. и доп. / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
- 53. Лыков, А.В. Теория теплопроводности./ Л.В. Лыков. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
- 54. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева, изд.3-е, репринтное. М.: ИД Бастет, 2010. 344 с.
- 55. Моделирование теплового режима трансформатора в системах управления, мониторинга и диагностики / А.О. Валуйских [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. Вып.1. – С.15-19.

- 56. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники. 3-е изд., перераб. и доп. / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т.1. – 536 с.
- 57. Новгородцев, А.Б. Расчет электрических цепей в MATLAB: учебный курс / А.Б. Новгородцев. СПб.: Питер, 2004. 250 с.
- 58. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов/ И.П. Норенков, 3 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 448 с.
- 59. Патанкар, С. Тепло- и массообмен в пограничных слоях / С. Патанкар, Д. Сполдинг, пер. с англ. М.: Энергия, 1971. 128 с.
- 60. Перспективы и состояние разработок распределительных трансформаторов массовых серий / В.А. Бормосов [и др.] [Электронный ресурс]// <u>http://www.transform.ru/articles/html/03project/a000001.article</u>
- Половинкин, А.И. Методы инженерного творчества: учеб пособие / А.И. Половинкин. – Волгоград, 1984. – 366 с.
- 62. Программное обеспечение проектирования трансформаторов и реакторов / Ю. И. Паук [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2009. Вып. 4. С.26-36.
- 63. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
- 64. Стулов, А.В. Разработка многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР активной части распределительных трансформаторов / А.В. Стулов, А.И. Тихонов, И.А. Корнев/ ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 96 с.
- 65. Стулов, А.В. Подсистема САПР распределительных трансформаторов для расчета нагрузочных потерь в фольговых обмотках с учетом вытеснения тока / А.В. Стулов, А.И. Тихонов, И.А. Корнев // Вестник ИГЭУ. – 2015. Вып.2. – С. 71-74.

- 66. Стулов, А.В. Разработка уточненных математических моделей для создания подсистем САПР распределительных трансформаторов с обмотками из ленты / А.В. Стулов, А.С. Зайцев, И.А. Трофимович, В.И. Печенкин // Вестник ИГЭУ. - 2014. Вып.5. - С. 37-41.
- 67. Стулов, А.В. Параметрическая генерация и расчет электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотках из ленты сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов в стационарных режимах / А.В. Стулов, И.А. Корнев, А.И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 6. С. 47-51.
- Стулов, А.В. Тепловой расчет обмоток из ленты сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием электрических схем замещения / А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 40-43.
- 69. Стулов, А.В. Применение подсистем поверочного и теплового расчетов САПР к проектированию оптимальных моделей силовых масляных трансформаторов/А.В. Стулов, А.И. Тихонов //Тезисы докл. междунар. науч.- техн. конф. (XVIII Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – Т.3 – С.174-177.
- 70. Стулов, А.В. Многоуровневый тепловой расчет масляных трансформаторов в процессе поиска оптимального решения / А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Энергия 2015: тез. докл. региональной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2015. Т.4–С.73-76.
- 71. Стулов, А.В. Расчет уточненной математической модели масляного трансформатора с обмотками из ленты / А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXI междунар. науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / М.: МЭИ, 2015. – Т.2– С.127.
- 72. Стулов, А.В. Учет нелинейности в процессах теплопередачи в цепных моделях силовых трансформаторов сухого типа с обмотками из ленты / А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Энергия 2014: тез. докл. региональной на-

уч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2014. – Т.4. – С. 146-149.

- 73. Стулов, А.В. Использование цепных тепловых моделей в расчетах процессов теплопередачи в обмотках распределительных трансформаторов сухого типа / А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XX междунар. науч.- техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2014. – Т.2. – С.154
- 74. Стулов, А.В. Исследование тепловой модели обмоток силовых трансформаторов на основе электрической схемы замещения/ А.В.Стулов, А.И. Тихонов // Тезисы докл.междунар. науч.- техн. конф. (XVII Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – Т.3. – С. 172-175.
- 75. Стулов, А.В. Метод моделирования тепловых процессов в элементах технических устройств на основе электрических схем замещения/ А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Энергия 2013: тез. докл. региональной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2013. – Т.2. – С. 254-257.
- 76. Стулов, А.В. Уточненная тепловая модель магнитной системы силового трансформатора / А.В. Стулов, А.И. Тихонов, // Энергия 2012: тез. докл. региональной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – Т.4. – С.83-85.
- 77. Стулов, А.В. Уточненная тепловая математическая модель обмоток трансформаторов и реакторов / А.В.Стулов, А.И. Тихонов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVIII междунар. науч.техн. конф. студентов и аспирантов / М.: МЭИ, 2012. Т.2. С. 201
- 78. Стулов, А.В. Разработка разветвленной тепловой цепи обмоток из ленты/ А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Тезисы докл.междунар. науч.- техн. конф. (XVI Бенардосовские чтения) / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – Т.3. – С. 124-127.

- 79. Стулов, А.В. Электрическая схема замещения тепловой цепи обмоток из ленты / А.В. Стулов, А.И. Тихонов // Энергия 2011: тез. докл. региональной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – Т.2. – С. 53-55.
- Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов / В.П. Тарасик. – Мн.: ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
- 81. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян [и др.]. Изд. 4-е. СПб.: Питер, 2003. Т.1. 424 с.
- 82. Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчян [и др.]. Изд. 4-е. СПб.: Питер, 2003. Т.2. 576 с.
- 83. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебник для вузов / Г.А. Сипайлов [и др.]. М.: Высш. шк., 1989. 239 с.
- 84. Теплопередача: учебник для вузов / В.П. Исаченко [и др.]. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
- 85. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов / П.М. Тихомиров. изд. 7-е, стереотип. М.: Ленанд, 2014. 528 с.
- 86. Тихонов, А.И. Библиотека для формирования и исследования моделей электрических цепей в динамических режимах / А.И. Тихонов, И.А. Корнев / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2013610691. Заявка № 2012660143, приоритет от 22.11.2012, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2013.
- 87. **Тихонов, А.И.** Библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / А.И. Тихонов. – М.: ВНТИЦ, 2006. – № 50200600161.
- 88. Тихонов, А.И. Методы анализа и синтеза электромеханических устройств на основе компонентной интеграции моделей / А.И. Тихонов, ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2006. 100 с.

- 89. Тихонов, А.И. Обоснование принципов построения цепных моделей природных процессов / А.И. Тихонов // Системный анализ в техносфере: межвуз. сб. науч. трудов; Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2002. С. 26 31.
- 90. Тихонов, А.И. Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): учебное пособие / А.И. Тихонов, Федеральное агентство образования РФ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2011. 96 с.
- 91. Тихонов, А.И. Проектирование силовых трансформаторов: Учеб. пособие / А.И. Тихонов, А.Н. Лапин / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 160 с.
- 92. Тихонов, А.И. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / А.И. Тихонов, Ю.Б. Казаков // ФГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2008. –80 с.
- 93. Тихонов, А.И. Подсистема тепловых расчетов распределительных трансформаторов на основе электрических схем замещения / А.И. Тихонов, А.В. Стулов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2014619822. Заявка № 2014617873, приоритет от 07.09.2014, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.09.2014.
- 94. Тихонов, А.И. Расчет и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / А.И. Тихонов, А.В. Иванов// Федеральное агентство образования РФ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 116 с.

- 95. Тихонов, А.И. Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов / А.И. Тихонов, А.С. Зайцев, А.В. Стулов, И.А. Трофимович // Вестник ИГЭУ. - 2014. Вып.6. – С. 87-91.
- 96. Тихонов, А.И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений решений в автоматизированном проектировании электромеханических устройств: дисс... докт.техн.наук по специальности 05.13.12. Системы автоматизации проектирования (электротехника и энергетика) Иваново, 2007. 262 с.
- 97. Тихонов, А.И. Система автоматизированного проектирования токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты / А.И. Тихонов, Г.В. Попов, А.В. Иванов // Вестник ИГЭУ. – 2010. Вып.4. – С.55-58.
- 98. Ушаков, Д.М. Введение в математические основы САПР: курс лекций/ Д.М. Ушаков. – М.: ДМК Пресс, 2011 – 208 с.
- 99. **Филиппов, И.Ф.** Теплообмен в электрических машинах: учебное пособие для вузов / И.Ф. Филиппов. Л.: Энергоатомиздат, 1986 256 с.
- 100. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005.–550 с.
- 101. Шелофаст, В. Использование систем инженерного анализа для повышения качества проектирования / В. Шелофаст, Е. Стайнова // НМ – оборудование. – 2005. – Вып. 1. – С.34-37.
- 102. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг; пер. с нем. М.: Наука, 1974. – 713 с.
- 103. Шмелев, А.С. Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечноэлементного моделирования магнитного поля / А.С. Шмелев, И.А. Пайков, Л.Н. Булатов // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 55-61.
- 104. Solidworks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский [и др.]. СПб.: БХВ-Петербург, 2005 800 с.

Иностранные источники

- 105. Arslan, S. Investigation of current density, magnetic flux density and ohmic losses for single-veined, litz and foil structured conductors at different frequences / S. Arslan, İ. Tarimer, M. Emin Güven // Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, Vol.19, 2013. pp.195-200.
- 106. Different Approach to Thermal Modeling of Transformers a comparison of methods / V. Madžarević [and others] // International Journal of Energy and Environment, Issue 5, Volume 5, 2011
- 107. Ghareh, M. Thermal Modeling of Dry-Transformers and Estimating Temperature Rise / M. Ghareh, L. Sepahi // World Academy of Science, Engineering and Technology, 21, 2008
- 108. **Holtshausen, C.B** Transformer thermal modeling, load curve development and life estimation / R & D Journal of the South Africa institution of mechanical engineering, 2015, Volume 31, pp. 12-16.
- 109. Hot spot studies for sheet wound transformers windings / S. Kennedy [and others] // Doble Engineering Company 80th International Conference of Doble Clients, 2013
- 110. Mamizadech, A. Analyzing and Comparing the Hot-spot Thermal Models of HV/LV Prefabricated and Outdoor Oil-Immersed Power Transformers / A. Mamizadech, I. Iskander // International Journal of Electronics and Electrical Engineering 6, 2012
- 111. Mullineux, N. Current distribution in sheet- and foil-wound transformers / N. Mullineux, J.R. Reed, I.J. Whyte // The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1969. Vol. 116, Issue 1, p. 127 129.
- 112. Nigam, M. Multilayer Barrel-wound Foil Winding Design / M. Nigam, C.R. Sullivan // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 2008.

- 113. Reddy, A. Hottest spot and life evaluation of power transformer design using finite element method / A. Reddy, M. Vijaykumar // Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2008.
- 114. **Reducing losses** in distribution transformers / Juan C. Olivares [and others] // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.18, No.7, 2003.
- 115. Susa, D. Dynamic thermal modelling of power transformers / Doctoral Dissertation. – Helsinki University of Technology, Espoo. – 2005.
- 116. Swift, G. A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling Part
 I: Theory and Equivalent Circuit / G. Swift, T. Molinski, W. Lehn // IEEE
 Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No.2, April 2001.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРОГРАММНЫЙ КОД ПОДСИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА SHAPT В СРЕДЕ МАТLAB

% Подсистема теплового расчета распределительного трансформатора на основе электрических схем замещения//

% %*****

% Этап 1. Подготовка схемы (расчет числа ветвей и узлов соответсвтующих типов) NconL = evalin ('base', 'NconL');

NsecL = evalin ('base','NsecL');

[p,q,p_lmb,p_alfa,p_air,p_is,p_power,q_0,q_lmb,q_alfa,q_can,... q is,p gor,p lmb down,p z,p sector] = PrepareNet (NconL,NsecL);

% р - число ветвей схемы замещения

% q - число узлов схемы замещения

% p_lmb - число ветвей схемы замещения, характеризующих теплопередачу путем теплопроводности в обмотке

% p_alfa - число ветвей схемы замещения, характеризующих теплопередачу путем теплоотдачи с поверхности

% p_air - число ветвей схемы замещения, характеризующих теплопередачу в канале охлаждения % p_is - число ветвей схемы замещения, характеризующих теплопередачу в бортовой изоляции путем совместного действия теплопроводности и теплоотдачи

% p_power - число ветвей схемы замещения, характеризующих источники тепловыделения % q_0 - нулевой узел

% q_lmb - число узлов, характеризующих начало ветвей теплопроводности

% q_alfa - число узлов, характеризующих начало ветвей теплоотдачи

% q_can - число узлов, характеризующих начало ветвей теплопередачи в канале охлаждения

% q_is - число узлов, характеризующих начало ветвей бортовой изоляции

% p_gor - число горизонтальных ветвей в одной секции

% p_lmb_down - число вертикальных ветвей теплопроводности в обмотке снизу первой секции

% p_z - число вертикальных ветвей теплопроводности в обмотке

% p_sector - число ветвей в секторе (сектор - совокупность ветвей, охватывающих все концентры в пределах одной секции)

% NconL - число концентров обмотки НН

% NsecL - число секций обмотки НН

function [p,q,p_lmb,p_alfa,p_air,p_is,p_power,q_0,q_lmb,q_alfa,q_can,...

q_is,p_gor,p_lmb_down,p_z,p_sector] = PrepareNet (NconL,NsecL)

p_lmb = NconL*(3*NsecL+1); p_alfa = 2*NconL*NsecL; p_air = NsecL*(NconL+3); p_is = 2*(2*NconL+1); p = p_lmb+p_alfa+p_air+p_is;

```
p_power = NconL*NsecL;
```

 $\begin{array}{l} q_0 = 1; \\ q_1 m b = N conL^* N secL; \\ q_a l f a = 2^* (p_a l f a - N secL^* (N conL-1)); \\ q_c can = N secL^* (N conL-1); \\ q_i s = 3^* N conL+1; \\ q = q_0 + q_1 m b + q_a l f a + q_c can + q_i s; \end{array}$

p_gor = 4*NconL+2; p_lmb_down = NconL;

```
p z = 2^*NconL + 1;
     p\_sector = p\_gor + p\_z;
%-----
assignin ('base','q',q);
assignin ('base','p',p);
assignin ('base','p_lmb',p_lmb);
assignin ('base','p_alfa',p_alfa);
assignin ('base','p air',p air);
assignin ('base','p is',p is);
assignin ('base','p power',p power);
assignin ('base', 'g 0', g 0);
assignin ('base','g lmb',g lmb);
assignin ('base','q_alfa',q_alfa);
assignin ('base','q_can',q_can);
assignin ('base','q_is',q_is);
assignin ('base','p_gor',p_gor);
assignin ('base','p_lmb_down',p_lmb_down);
assignin ('base','p_z',p_z);
assignin ('base','p_sector',p_sector);
% Этап 2. Расчет тепловых сопротивлений схемы замещения
```

NsLt = evalin ('base', 'NsLt'); bpL = evalin ('base', 'bpL'); apL = evalin ('base', 'apL'); DvLt = evalin ('base', 'DvLt'); DnLt = evalin ('base', 'DnLt'); BcLt = evalin ('base', 'BcLt');

 $alfa_rad = 0.0000001;$

%ek_oil = 19; %19;

[R_lmb_r_in, R_lmb_r_out, R_lmb_z,R_alfa_conv_in,R_alfa_conv_out, R_alfa_rad_in, R_alfa_rad_out, R_oil_can, Rbort] = ... ResistanceCalcTMG (NconL,NsLt,bpL,apL,DvLt,DnLt,alfa_rad,

NsecL,dTms,BcLt,Ts,P1,P2,P1dob,P2dob);

% Входные параметры %NconL - число концентров обмотки НН %NsLt - число слоев концентров обмотки HH %bpL - осевой размер неизолированного проводника НН %apL - радиальный размер неизолированного проводника НН %DvLt - внутренний диаметр концентра обмотки НН %DnLt - наружный диаметр концентра обмотки НН %alfa_rad - коэффициент радиационной теплоотдачи %NsecL - число секций обмотки НН %dTms - превышение температуры средних слоев масла над температурой окружающей среды %BcLt - ширина канала охлаждения %Тѕ - температура поверхности концентра %Р1 - потери в обмотке ВН %Р2 - потери в обмотке НН %P1dob - добавочные потери ВН %P2dob - добавочные потери НН

% Выходные параметры

% R_lmb_r_in - тепловое сопротивление теплопроводности обмотки в радиальном направлении в сторону внутренней поверхности концентра

% R_lmb_r_out - тепловое сопротивление теплопроводности обмотки в радиальном направлении в сторону наружной поверхности концентра

% R_lmb_z - тепловое сопротивление теплопроводности обмотки в осевом направлении

% R_alfa_conv_in - тепловое сопротивление конвективной теплоотдачи с поверхности обмотки в сторону внутренней поверхности концентра

% R_alfa_conv_out - тепловое сопротивление конвективной теплоотдачи с поверхности обмотки в сторону наружной поверхности концентра

% R_alfa_rad_in - тепловое сопротивление радиационной теплоотдачи с поверхности обмотки в сторону внутренней поверхности концентра

% R_alfa_rad_out - тепловое сопротивление радиационной теплоотдачи с поверхности обмотки в сторону наружной поверхности концентра

% R_oil_can - тепловое сопротивление теплопередачи в канале охлаждения

% Rbort - тепловое сопротивление теплопередачи в бортовой изоляции

function [R_lmb_r_in, R_lmb_r_out, R_lmb_z,R_alfa_conv_in,R_alfa_conv_out, R_alfa_rad_in, R_alfa_rad_out, R_oil_can, Rbort] = ...

ResistanceCalcTMG (NconL,NsLt,bpL,apL,DvLt,DnLt,alfa_rad, NsecL,dTms,BcLt,Ts,P1,P2,P1dob,P2dob)

R_lmb_r_in = zeros (1,NconL); % сопротивления теплопроводности в радиальном направлении внутрь обмотки

R_lmb_r_out = zeros (1,NconL); % сопротивления теплопроводности в радиальном направлении наружу из обмотки

R_lmb_z = zeros (1,NconL); % сопротивления теплопроводности в осевом направлении

R_alfa_conv_in = zeros (1,NconL); % сопротивления теплоотдачи конвекцией с поверхности в канал внутри обмотки

R_alfa_conv_out = zeros (1,NconL); % сопротивления теплоотдачи конвекцией с поверхности в канал снаружи обмотки

R_alfa_rad_in = zeros (1,NconL); % сопротивления теплоотдачи излучением с поверхности в канал внутри обмотки

R_alfa_rad_out = zeros (1,NconL); % сопротивления теплоотдачи излучением с поверхности в канал снаружи обмотки

R_oil_can = zeros (1,NconL-1); % тепловое сопротивление масляного канала с учетом конвекции масла

DavLt = zeros(1,NconL); S_in = zeros (1,NconL); S_out = zeros (1,NconL); Scan = zeros (1,NconL-1);

```
Imb_al = 230;
Imb_oil = 0.15;
Imb_eq = Imb_al*Imb_oil/(Imb_al+Imb_oil);
```

```
%Pp=P1+P2+P1dob+P2dob;
% Rbort = 10^-9*Pp^2-3*10^-5*Pp+0.2595;
% Rkretnn = 2*10^-7*Pp^2+0.0036*Pp-20.71;
```

```
Rbort = 0.085;
Rkretnn=10;
```

g=9.81;%T = 65; %Ts = 60; ro_20 = 860; alfa1 = 0.000686; Imb_0 = 0.15; h_con = 0.47; beta=0.0006; Co=0.75; %Tcoil=473; nu = 41.456*exp(-0.029*dTms)*10^-6; ro = ro_20*(1-alfa1*(dTms-20))/1000; cp = 4.1868*(1/sqrt(ro))*(0.403+0.00081*dTms)*1000; Imb = Imb_0*(1-(0.018/200)*dTms);

% кинематическая вязкость
 % плотность
 % удельная теплоемкость
 % теплопроводность

```
Pr = nu*ro*cp*1000/lmb:
Gr =((g*h con^3)/nu^2)*beta*(Ts-dTms);
Ra = Gr*Pr;
Nu = Co*Ra^0.25;
alfa_TMG = Nu*Imb/h_con;
if Ra > 10^3
  if Ra < 10^6
     ek oil = 0.105*Ra^0.3;
  end
end
if Ra > 10^6
  if Ra < 10^12
    ek oil = 0.4*Ra^0.2;
  end
end
for i =1:1:NconL
  DavLt(i) = 0.5*(DvLt(i)+DnLt(i));
  S_i(i) = pi^*DvLt(i)^*bpL^*10^{-3};
  S out(i) = pi*DnLt(i)*bpL*10^{-3};
  % 1. В радиальном направлении внутрь теплопроводность
  R_lmb_r_in (i) =NsLt(i)*(1/(2*pi*lmb_eq))*log(DavLt(i)/DvLt(i));
  % 2. В радиальном направлении наружу теплопроводность
  R_lmb_r_out (i) =NsLt(i)*(1/(2*pi*lmb_eq))*log(DnLt(i)/DavLt(i));
  % 3. В осевом направлении
  R_lmb_z(i) = (bpL^{10^{-3}/NsecL})/(lmb_al^{(pi/4)^{(DvLt(i)+apL^{10^{-3}/NsLt(i))^2-DvLt(i)^2)});
  % 4. Конвекция
  R_alfa_conv_in (i) = 1/(2*alfa_TMG*S_in(i));
  R_alfa_conv_out (i) = 1/(alfa_TMG*S_out(i));
  % 5. Излучение
  R_alfa_rad_in = 1/(alfa_rad*S_in(i));
  R_alfa_rad_out = 1/(alfa_rad*S_out(i));
end
% 6. Теплопроводность с конвекцией в масле
for i =1:1:NconL - 1
  Scan(i) = (pi/4)^{*}(DvLt(i+1)^{2}-DnLt(i)^{2});
  R oil can(i) = ((bpL*10^-3)/NsecL)/(Imb oil*ek oil*Scan(i))/(BcLt(i)*1000*Rkretnn);
end
assignin ('base','R_lmb_r_in',R_lmb_r_in);
assignin ('base','R_lmb_r_out',R_lmb_r_out);
assignin ('base','R_lmb_z',R_lmb_z);
assignin ('base','R_alfa_conv_in',R_alfa_conv_in);
```

assignin ('base','R_alfa_conv_out',R_alfa_conv_out);

assignin ('base','R_alfa_rad_in',R_alfa_rad_in);

assignin ('base','R_alfa_rad_out',R_alfa_rad_out);

assignin ('base','R_oil_can',R_oil_can);

% Этап 3. Построение матрицы соединений А, заполнение векторов Т00 и N00

[A00,N00,T00] = Matrix-ANet(p,q,p_is,p_gor,p_sector,NconL,NsecL,R_lmb_r_in,R_lmb_r_out,R_lmb_z,R_alfa_conv_in,...
```
P2dob);
assignin ('base','A00',A00);
assignin ('base','N00',N00);
assignin ('base','T00',T00);
```

```
% АОО - матрица соединений тепловой цепи электрической схемы замещения
% N00 - матрица номиналов элементов тепловой цепи электрической схемы замещения
% Т00 - матрица типов элементов тепловой цепи электрической схемы замещения
function [A00M,N00,T00] = Matrix-
ANet(p,q,p_is,p_gor,p_sector,NconL,NsecL,R_Imb_r_in,R_Imb_r_out,R_Imb_z,R_alfa_conv_in,...
                            R_alfa_conv_out,R_alfa_rad_in,R_alfa_rad_out,R_oil_can,Rbort, P2,
P2dob)
A00M = zeros(q,p);
T00 = zeros(1,p+NsecL*NconL);
N00 = zeros(1,p+NsecL*NconL);
%A00 = zeros(q,p);
% заполняем матрицу типов
for i=1:1:p
  T00(i) = 3;
end
for i = p + 1:1: p + NconL * NsecL
T00(i) = 5;
end
P_vet = zeros (1,p+NconL+NsecL*NconL);
Q_uzl = zeros(1,q+1);
for i =1:1:p+NsecL*NconL
  P_vet(i) = i;
end
for j=1:1:q+1
  Q_uzl(j) = j;
end
%начала источников тока
for i = p + 1:1:p + NconL^* NsecL
A00M(Q_uzl(1), P_vet(i)) = 1;
end
% определяем начала и концы is-ветвей снизу - готово
j =1;
for i = 1 :1: 2 * NconL + 1
  if mod (i,2) == 0
    A00M(Q_uzl(0.5 * i + 1), P_vet(i)) = 1;
    N00(P_vet(i))=Rbort;
  else
     A00M( Q_uzl(NconL + 2 * i), P_vet(i) ) = 1;
    N00(P vet(i))=R oil can(i); % проверить индексы (учесть канал между сердечником, канал
ОНН и главный канал)
  end
     A00M(Q_uzl(1), P_vet(i)) = -1;
     A00M(Q_uzl(1), P_vet(i)) = -1;
end
%определяем начала и концы is-ветвей сверху
for i = 1:1: p_is / 2
  A00M(Q_uzl(q - p_is / 2 + i), P_vet(p - p_is / 2 + i)) = 1;
  A00M(Q_uzl(1), P_vet(p - p_is / 2 + i)) = -1;
  if mod(NconL,2) == 0
       if mod(i,2) == 0
         N00(P_vet(p - p_is / 2 + i)) = Rbort;
```

```
else
         N00(P vet(p - p is / 2 + i)) = R oil can(j);% проверить индексы
       end
       else
       if mod(i,2) == 0
         N00(P_vet(p - p_is / 2 + i)) = Rbort;
       else
         N00(P_vet(p - p_is / 2 + i)) = R_oil_can(j);% проверить индексы
       end
  end
end
%определяем начала и концы нижних lambda-ветвей (их число равно числу концентров)
j = 1;
for i = 2 * NconL + 2:1:3 * NconL + 1
     A00M(Q_uzl(NconL + 4 * j), P_vet(i)) = 1;
     A00M(Q_uzl(j + 1), P_vet(i)) = -1;
    N00( P_vet(i)) = R_lmb_z(j) / 2;
    i = i + 1;
end
% определяем начала и концы air-ветвей слева и справа
v =1; % временно для запуска программы
i = 3 * NconL + 2;
k = NconL + 2;
k1 = 5 * NconL + 2;
for i = 1:1: NsecL
    A00M( Q_uzl(1), P_vet(j) ) = -1; %конец air ветви слева
     A00M(Q_uzl(k), P_vet(j)) = 1; %начало горизонтальной air ветви слева
     A00M(Q uzl(k), P vet(j + 4 * NconL + 2)) = 1; %начало вертикальной air ветви слева
    A00M(Q_uzl(k + 4 * NconL + 1), P_vet(j + 4 * NconL + 2)) = -1; %'конец вертикальной air ветви
слева
     A00M(Q_uzl(1), P_vet(j + p_gor - 1)) = -1; %' конец air ветви справа
     A00M(Q_uzl(k1), P_vet(j + p_gor - 1)) = 1; %' начало air ветви справа
    A00M(Q_uzl(k1), P_vet(j + p_gor - 1 + 2 * NconL + 1)) = 1; %' начало вертикальной air ветви
справа
    N00(P_vet(j)) = R_oil_can(v);
     N00(P_vet(j + 4 * NconL + 2)) = R_oil_can(v);
    N00(P_vet(j + p_gor - 1)) = R_oil_can(v);
     N00(P_vet(j + p_gor - 1 + 2 * NconL + 1)) = R_oil_can(v);
if k1 + 4 * NconL + 1 < a
     A00M(Q_uzl(k1 + 4 * NconL + 1), P_vet(j + p_gor - 1 + 2 * NconL + 1)) = -1; % ' конец вертикаль-
ной ветви справа
  else
     A00M(Q_uzl(k1 + 2 * NconL + 1), P_vet(j + p_gor - 1 + 2 * NconL + 1)) = -1; %' конец вертикаль-
ной ветви справа
end
i = i + p_sector;
k = k + 4 * NconL + 1;
k1 = k1 + 4 * NconL + 1;
end
%Определяем характеристические узлы
k = 0;
k1 = 0;
num = 1;
for j = 1:1:NsecL
  for i = 1:1:NconL
    h = 5 * NconL + 4 * i + 1 + k;
    A00M(Q uzl(NconL + 4 * i + k - 1), P vet(3 * NconL + 4 * i + k1 - 1)) = 1;
                                                                                %alfa ветвь слева
начало
    A00M(Q uzl(NconL + 4 * i + k - 1 - 1), P vet(3 * NconL + 4 * i + k1 - 1)) = -1; %alfa ветвь слева
конец
    A00M(Q_uzl(NconL + 4 * i + k), P_vet(3 * NconL + 4 * i + k1)) = 1;
                                                                               %lambda ветвь слева
начало
```

```
A00M(Q uzl(NconL + 4 * i + k), P vet(p + num)) = -1;
                                                                             %источника тока ветвь ко-
нец
     A00M(Q_uzl(NconL + 4 * i + k - 1), P_vet(3 * NconL + 4 * i + k1)) = -1;
                                                                               %' lambda ветвь слева
конец
     A00M(Q_uzl(NconL + 4 * i + k), P_vet(7 * NconL + 3 + 2 * i + k1)) = 1;
                                                                              % ' lambda ветвь вверх
начало
     N00(P vet(3 * NconL + 4 * i + k1 - 1)) =
R alfa conv in(i)*R alfa rad in(v)/(R alfa rad in(v)+R alfa conv in(i)); % !!!!!!!!!!!
     N00(P_vet(3 * NconL + 4 * i + k1)) = R_lmb_r_in(i) / 2;
     N00(P vet(7 * NconL + 3 + 2 * i + k1)) = R lmb z(i) / 2;
     N00(P_vet(3 * NconL + 4 * i + 1 + k1)) = R_lmb_r_out(i) / 2;
     N00(P_vet(3 * NconL + 4 * i + 1 + k1 + 1)) =
R_alfa_conv_out(i)*R_alfa_rad_out(v)/(R_alfa_rad_out(v)+R_alfa_conv_out(i)); % !!!!!!!!!!!
    if h < q - (p_i s / 2 - 1)
        A00M(Q_uzl(NconL + 4 * i + 4 * NconL + 1 + k), P_vet(7 * NconL + 3 + 2 * i + k1)) = -1; %' lamb-
da ветвь вверх конец
     else
        A00M(Q uzl(NconL + 4 * NconL + 2 * (i - 1) + 4 + k), P vet(7 * NconL + 3 + 2 * i + k1)) = -1; \% '
lambda ветвь вверх конец
     end
     A00M(Q uzl(NconL + 4 * i + k), P vet(3 * NconL + 4 * i + 1 + k1)) = 1; %' lambda ветвь справа на-
чапо
     A00M(Q_uzl(NconL + 4 * i + k + 1), P_vet(3 * NconL + 4 * i + 1 + k1)) = -1; %' lambda ветвь справа
конец
     A00M(Q uzl(NconL + 4 * i + k + 1), P vet(3 * NconL + 4 * i + 1 + k1 + 1)) = 1; %' alfa ветвь справа
начало
     A00M(Q uzl(NconL + 4 * i + k + 1 + 1), P vet(3 * NconL + 4 * i + 1 + k1 + 1)) = -1; %' alfa ветвь
справа конец
     num = num + 1;
  end
k = k + 4 * NconL + 1;
k1 = k1 + 6 * NconL + 3;
end
% 'Строим ветви в канале
nk = NconL - 1;
if nk > 0
k = 0;
k1 = 0;
for j = 1:1:NsecL
   for i = 1:1:nk
     h = 5 * nk + 4 * i + k + 8;
    A00M(Q uzl(nk + 4 * i + 3 + k), P vet(7 * nk + 13 + 2 * (i - 1) + k1)) = 1;
    T00(P_vet(7 * nk + 13 + 2 * (i - 1) + k1)) = 6;
    N00(P_vet(7 * nk + 13 + 2 * (i - 1) + k1)) = R_oil_can(v);
     if h < q - (p_i s / 2 - 2)
       A00M(Q_uzl(nk + 4 * i + 3 + k + 4 * nk + 5), P_vet(7 * nk + 13 + 2 * (i - 1) + k1)) = -1;
     else
       A00M(Q_uzl(nk + 4 * i + 3 + k + 4 * nk + 3 - 2 * (i - 1)), P_vet(7 * nk + 13 + 2 * (i - 1) + k1)) = -1;
     end
  end
  k = k + 4 * nk + 5;
  k1 = k1 + 6 * nk + 9:
end
end
for i = p + 1:1: p + NconL*NsecL
N00(i) = (P2+P2dob)/NsecL;
end
[m,n] = size(N00);
T0 = T00';
TN0 = zeros(n,1);
for i=1:1:n
```

```
switch T0(i)
     case 6
       T0(i) = 3;
       TNO(i) = 10000000;
  end
end
N0 = zeros(n,n);
for i=1:1:n
  NO(i,i) = NOO(i);
end
A0 = A00:
     [A,T,N,Tur,p,q,nx,y1,y2,z1,z2,NCepi,NPrBase,NPrOld] = AnalisNet(A0,T0,N0);
assignin ('base','A',A);
assignin ('base','T',T);
assignin ('base','N', N);
assignin ('base','Tur', Tur);
assignin ('base','p', p);
assignin ('base','q', q);
assignin ('base','nx', nx);
assignin ('base','y1',y1);
assignin ('base','y2',y2);
assignin ('base','z1',z1);
assignin ('base','z2',z2);
assignin ('base', 'NCepi', NCepi);
assignin ('base', 'NPrBase', NPrBase);
assignin ('base','NPrOld', NPrOld);
[G12,G21,Dy,Dyt,Cz,Czt] = GetPrewMatrix(A,p,q,y1,y2,z1,z2,NCepi);
[ni,nr,np,Gr,Grp,Gp,Xp,Xr] = InitCalcNet(T,Tur,p,nx);
I = zeros(p, 1);
[G,Y,Z] = GetPostMatrix(Dy,Dyt,Cz,Czt,G12,G21,NPrOld,T0,TN0,N0,N,I,p,y1,y2);
tn = 0;
tk = 0.03;
dt = 0.01;
nt = (tk - tn) / dt + 1;
X = zeros(nx, 1);
%Xt = zeros(nx,nt); %содержит результаты расчета во все моменты времени
Ut = zeros(p,nt); %содержит результаты расчета во все моменты времени
It = zeros(p,nt); %содержит результаты расчета во все моменты времени
Fit = zeros(p,nt); %содержит результаты расчета во все моменты времени
t = tn:
iter = 0:
while t < tk
  X0 = X;
  [Fi,U,I] = GetUI(A0,X,p,q,nx,y1,NPrBase,N0,T0);
  X = BuildX(Tur, Y, Z, Xp, Xr, nx, ni);
  iter = iter + 1;
  %Xt(:,iter) = X(:);
  Fit(:,iter) = Fi(:);
  Ut(:,iter) = U(:);
  It(:,iter) = I(:);
  %for i=2:1:nx
  %line([tn,t],[X0(i),X(i)],'EraseMode','none', 'color','blue','LineWidth',1);
  %end
  [G,Y,Z] = GetPostMatrix(Dy,Dyt,Cz,Czt,G12,G21,NPrOld,T0,TN0,N0,N,I,p,y1,y2);
  [Xp,Xr] = StepCalcNet(G,Gr,Grp,Gp,Xp,X,Tur,nx,nr,np,dt);
  tn = t;
  t = t + dt:
end
X = BuildX(Tur, Y, Z, Xp, Xr, nx, ni);
[Fi,U,I] = GetUI(A0,X,p,q,nx,y1,NPrBase,N0,T0);
iter = iter + 1:
Fit(:,iter) = Fi(:);
```

Ut(:,iter) = U(:);It(:,iter) = I(:);T_uzl_c = zeros(NsecL,NconL); T uzl int = zeros(NsecL,NconL); T_uzl_ext = zeros(NsecL,NconL); T_uzl_air = zeros(NsecL,NconL); for j = 1:1:NconLfor i = 1:1:NsecL $T_uzl_c(i, j) = Fi(NconL + 4 * j + (4 * NconL + 1) * (i - 1));$ $T_uzl_int(i, j) = Fi(NconL + 4 * j + (4 * NconL + 1) * (i - 1) - 1);$ $T_uzl_ext(i, j) = Fi(NconL + 4 * j + (4 * NconL + 1) * (i - 1) + 1);$ $T_uzl_air(i, j) = Fi(NconL + 4 * j + (4 * NconL + 1) * (i - 1) + 2);$ end end subplot(2,3,1); plot(T_uzl_c,'Color','r'); hold on; title('Центр тепловыделения'); xlabel('Homep секции'); ylabel('Превышение температуры'); grid on; subplot(2,3,2); plot(T_uzl_int,'Color','g'); hold on; title('Внутренние поверхности'); xlabel('Homep секции'); ylabel('Превышение температуры'); grid on; subplot(2,3,3);plot(T_uzl_ext,'Color','b'); hold on; title('Наружные поверхности'); xlabel('Homep секции'); ylabel('Превышение температуры'); grid on; subplot(2,3,4); plot(T uzl air, 'Color', 'k'); title('Канал'); xlabel('Номер секции'); ylabel('Превышение температуры'); grid on; tc1 = mean (T_uzl_c); tc = mean(tc1);ti1 = mean (T_uzl_int); ti = mean (ti1);te1= mean (T_uzl_ext); te=mean(te1);tair1= mean (T_uzl_air); tair= mean(tair1); err = ti - Ts; if err < 0Ts = Ts - dterr; else Ts = Ts + dterr; end %end assignin ('base','tc',tc); assignin ('base','ti',ti); assignin ('base','te',te); assignin ('base','tair',tair);

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

их наук Tree 2015 г. esould

Акт

внедрения подсистемы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов

Подсистема теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов, позволяющая проводить всесторонний анализ теплового состояния распределительных трансформаторов в процессе производственного проектирования с использованием электрических схем замещения и полевых моделей, внедрена в процесс производственного проектирования и используется конструкторском отделе ООО «Трансформер» (г. Подольск).

Внедряемая технология проектирования и программный комплекс являются результатом диссертационной работы Стулова А.В. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

1. Разработана промышленная версия библиотеки моделирования электрических цепей, функционирующая в среде Matlab и позволяющая моделировать тепловые процессы в трансформаторе на основе электротепловой аналогии.

2. Разработана технология моделирования физических процессов в трансформаторе, позволяющая:

- автоматизировать процесс создания моделей трансформаторов в процессе проектирования для численного исследования;
- осуществлять многократную перегенерацию моделей в процессе поиска оптимального решения;
- осуществлять виртуальный эксперимент, заменяющий тепловые испытания опытного образца.

Руководитель отдела инноваций и НИОКР, кандидат технических наук

В.И. Печенкин

А.В. Стулов

Заместитель генерального директора по общим вопросам ООО «Трансформер»______



внедрения системы автоматизированного проектирования трансформаторов

Система автоматизированного проектирования распределительных и силовых трансформаторов сухого и масляного исполнения внедрена в учебный процесс по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника» при изучении дисциплин: электрические машины и электромеханика, а также в курсовом проектировании по курсу «Проектирование трансформаторов».

Система автоматизированного проектирования распределительных и силовых трансформаторов позволяет осуществить проектный и поверочный расчет трансформаторов различного исполнения в интерактивном режиме.

Внедряемая система проектирования является результатом диссертационной работы Стулова А.В. Научная и практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

 Разработана учебная версия библиотеки моделирования электрических цепей, функционирующая в среде Matlab и позволяющая моделировать тепловые процессы в трансформаторе на основе электротепловой аналогии.

 Разработана технология моделирования физических процессов в трансформаторе, позволяющая:

- организовать процесс проектирования и исследования устройств в интерактивном режиме;
- осуществлять многократную перегенерацию расчетных моделей в процессе поиска оптимального решения;
- осуществлять параметрическое построение 3D-моделей трансформаторов с высокой степенью визуализации и детализации.

Профессор кафедры электромеханики, кандидат технических наук, профессор

В.П. Шишкин

Заместитель генерального директора по общим вопросам ООО «Трансформер»

А.В. Стулов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



斑

密

斑

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

弦弦

密

密

密

密

密

路路

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

密

敬敬

密

密

密

密

密

路路路路路路路

密

斑

密

密

密

路路

密

密

密

路路

斑

密

密

斑

密

斑

敬敬

斑

密

斑

密

密

密

密

密

斑

斑

密

密

密

密

密

斑

密

密

斑

密

斑

密

斑

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014619822

Подсистема тепловых расчетов распределительных трансформаторов на основе электрических схем замещения

Правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)

Авторы: Тихонов Андрей Ильич (RU), Стулов Алексей Вадимович (RU)



Заявка № 2014617873 Дата поступления 07 августа 2014 г.

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23 сентября 2014 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий