

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)**

Автореферат

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

Иваново – 2015

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тихонов Андрей Ильич

Официальные оппоненты:

Лунин Валерий Павлович, доктор технических наук, профессор, институт автоматики и вычислительной техники национального исследовательского университета «МЭИ», директор;

Дулькин Игорь Николаевич, кандидат технических наук, ФГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Акционерное общество «Корпорация ВНИИЭМ», г. Москва

Защита состоится «25» декабря 2015 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Диссертация размещена http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Stulov_A.V..pdf
Автореферат диссертации размещён на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.02



Сидоров
Сергей Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 научно-исследовательский 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, необходимо 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 (CAE-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.

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 распределительных трансформаторов, позволяющих учесть особенности современных конструкций.

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, апробация и интеграция в подсистему теплового анализа САПР трансформаторов программных средств для параметрической генерации и исследования электрических схем замещения физических процессов в трансформаторе.

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 – пункте 1:* «Методология автоматизированного проектирования в техни-

ке, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР»; пункту 2: «Разработка научных основ создания систем автоматизации проектирования ...»; пункту 3: «Разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений»; пункту 4: «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 регенерацию 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.

Результатам работы внедрены в производственный процесс в ООО «Трансформер» (г. Подольск) и 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 3 приложений. Основная часть работы изложена на 140 страницах, содержит 75 иллюстраций и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведены анализ современного состояния проблемы тепловых расчетов в САПР распределительных трансформаторов, обзор аналитических и численных методов, а также обзор инженерных методик теплового расчета трансформаторов. Теоретически обоснован компонентный состав и структура подсистемы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов.

В частности, дан обзор САЕ-систем, используемых в настоящее время в качестве инструментальной базы для температурного анализа распределительных трансформаторов. Отмечено, что в ряде организаций РФ и стран СНГ разрабатываются и постоянно совершенствуются САПР и компьютерные программы для выполнения соответствующих расчетов и конструирования распределительных и силовых трансформаторов. Так, в качестве программно-методического обеспечения для расчета трансформаторов в ПАО «ВИТ» разработана система САПР-ТОН. На Минском электротехническом заводе имени В.П. Козлова разработана и внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию САПР силовых масляных трансформаторов общего назначения мощностью 25-630 кВА напряжением до 35 кВ (условное название САПР-ПРОТОН). Подчеркнута актуальность задачи разработки математических моделей трансформаторов, в которых учитываются особенности современных конструкций и технологий производства.

Анализ методов решения задач сложного теплообмена в трансформаторах показывает, что использование аналитических методов ограничено требованиями симметрии задачи, а использование численных методов – сложностью в использовании и большим временем расчета. В частности

тепловой расчет распределительных трансформаторов на основе трехмерного полевого моделирования обладают высокой точностью, но время расчета оценивается часами, что не позволяет использовать эти модели в процессе оптимизации трансформаторов. Эмпирические модели, приведенные в РД, обладают высоким быстродействием, но дают большие погрешности в случаях, когда конструкция трансформатора выходит за пределы типовых решений. В частности, не учитывается неравномерный нагрев фольговых обмоток, вызванный эффектом вытеснения тока. В то же время эмпирические модели могут успешно использоваться при расчете узлов трансформатора, имеющих типовое исполнение.

Альтернативой полевым методам расчета 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. Так, дифференциальное уравнение нагрева однородного тела (стенки) можно представить в виде

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

где Θ – перепад температур на границах стенки; C_m – теплоемкость; Q – тепловой поток; R_m – тепловое сопротивление; τ – время.

Это уравнение изоморфно с уравнением электрической цепи, изображенной на рис. 1,

$$dU_c = \frac{1}{C} \left(I - \frac{U_c}{R} \right) dt, \quad (2)$$

где U_c – напряжение на конденсаторе; C – емкость конденсатора; I – ток в ветви с источником тока; R – сопротивление.

Изоморфизм уравнений (1) и (2) позволяет строить электрические схемы замещения (ЭСЗ) тепловых процессов. В частности, на рис. 2,а изображена упрощенная тепловая цепь масляного трансформатора, а на рис. 2,б – электрическая схема замещения данной цепи, выполненная в среде Simulink.

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

Для учета особенностей конструкции, неравномерного распределения токов в обмотках и др. предлагается использование разветвленных ЭСЗ.

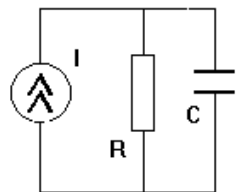


Рис. 1. Электрическая схема замещения участка тепловой цепи

Использование в тепловых расчетах разветвленных ЭСЗ позволяет учесть в рамках одной модели разные симметрии, упростив тем самым модель без потери точности. При этом может быть получен результат, сопоставимый по точности с точностью полевых расчетов при высоком быстродействии, характерном для цепных моделей.

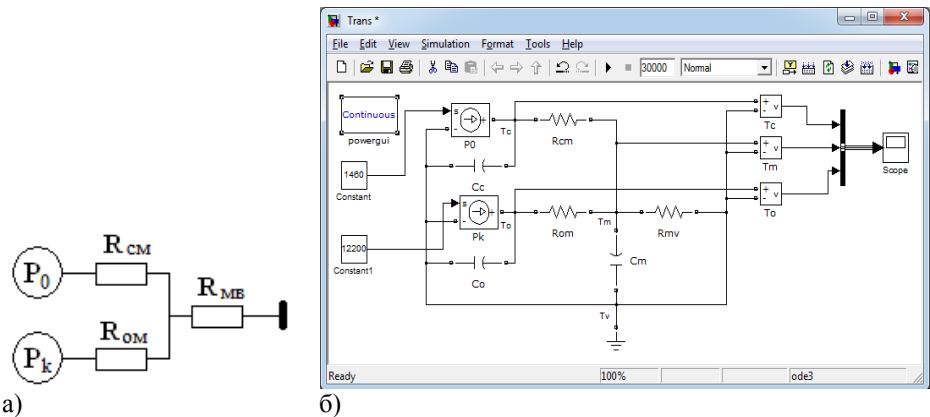


Рис. 2. Упрощенная тепловая цепь масляного трансформатора (а) и ее электрическая схема замещения в среде Simulink (б)

Для проведения адекватного теплового расчета трансформатора с учетом возможных эффектов неравномерного распределения источников тепловыделений, имеющих место из-за неоднородности магнитного поля, необходима разработка программного обеспечения, компонентный состав и структура которого представлена на рис. 3.



Рис. 3. Компонентный состав и структура подсистемы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторов.

Использование описанного компонентного состава и структуры позволяет оптимальным образом организовать рабочее место проектировщика, обеспечив его инструментами, помогающими всесторонне оценить принимаемые технические решения.

Во второй главе приведены результаты разработки модели и метода расчета потерь энергии в обмотках трансформатора на основе комбинации полевых и цепных моделей (рис. 4.). В качестве наиболее сложного для моделирования примера рассмотрен трансформатор с фольговой обмоткой низшего напряжения (ОНН), характер протекания тока в которой определяется эффектом вытеснения тока к торцам обмотки. Расчет потерь осуществляется путем моделирования опыта короткого замыкания трансформатора. ЭСЗ для данного опыта представлена на рис. 4. В связи с тем, что ветвь намагничивания в опыте КЗ отсутствует, то задача сводится к расчету поля рассеяния трансформатора в режиме КЗ.

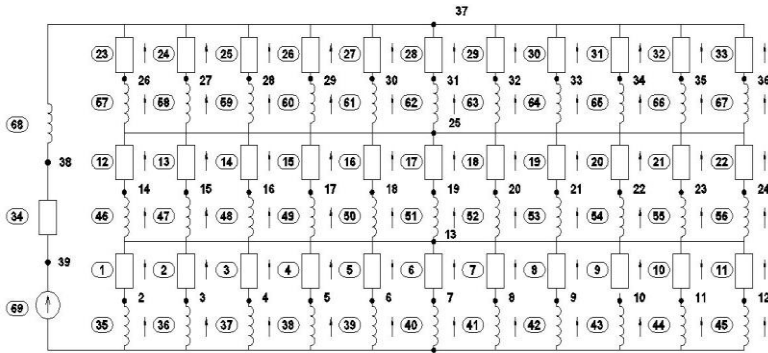


Рис. 4. Разветвленная ЭСЗ обмоток трансформатора в опыте КЗ

Здесь фольговый проводник условно разбит на расчетные секции, представленные сопротивлениями и источниками ЭДС

$$e_k = -\frac{d\Psi_k}{dt} = -\mathbf{L}_k \frac{d\mathbf{i}}{dt}, \quad (3)$$

где Ψ_k – потокосцепление k -й расчетной ветви; $\mathbf{i}$ – матрица-столбец мгновенных значений токов в расчетных ветвях ЭСЗ; $\mathbf{L}_k$ – матрица-строка индуктивностей k -й расчетной ветви ЭСЗ (на рис. 4 элементы, соответствующие матрицам $\mathbf{L}_k$ условно изображены значками индуктивности).

Полная матрица индуктивностей $\mathbf{L}$ рассчитывается с учетом наличия магнитопровода и бака трансформатора с помощью библиотеки численного моделирования магнитного поля MKELib (рис. 5).

После расчета цепной модели рассчитывается вектор потерь

$$\mathbf{p} = \mathbf{R} \cdot \begin{bmatrix} I_1^2 & I_2^2 & \dots & I_n^2 \end{bmatrix}^T, \quad (4)$$

где $\mathbf{R}$ – диагональная матрица сопротивлений; I_k – действующее значение тока в k -й расчетной ветви.

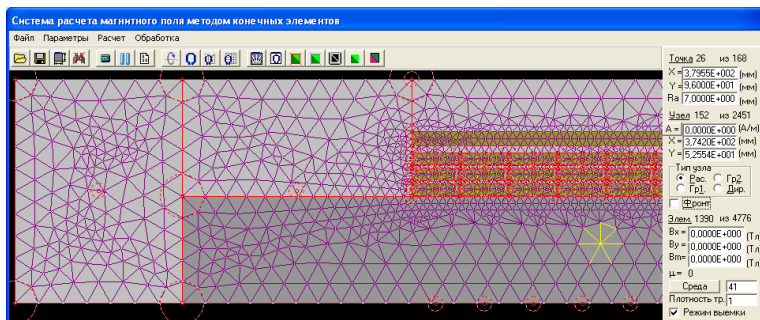


Рис. 5. Фрагмент конечно-элементной модели активной части трансформатора

Для автоматизации процесса построения и расчета ЭСЗ при непосредственном участии автора диссертации была разработана библиотека численного моделирования электрических цепей ECLib. Данная библиотека позволяет автоматически сформировать по методу переменных состояния и интегрировать по времени систему уравнений, описывающую процессы в электрической цепи. Система уравнений имеет вид

$$\mathbf{GX} = \mathbf{0}, \quad (5)$$

где $\mathbf{G}$ – матрица коэффициентов системы уравнений вида

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_y \mathbf{Y}_y \mathbf{D}_y^T & \mathbf{D}_{2zy} \\ \mathbf{C}_{1zy} & \mathbf{C}_z \mathbf{Z}_z \mathbf{C}_z^T \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$\mathbf{X}$ – вектор неизвестных величин вида

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_y \\ \mathbf{I}_z \end{Bmatrix}; \quad (7)$$

$\mathbf{D}_y$, $\mathbf{D}_{2y}$, $\mathbf{C}_z$, $\mathbf{C}_{1z}$ – матрицы, сформированные по заданной матрице соединений графа электрической цепи; $\mathbf{Y}_y$, $\mathbf{Z}_z$ – матрицы, сформированные по заданной матрице номиналов электрической цепи; $\mathbf{U}_y$ – вектор напряжений на у-ветвях (ЭДС, емкости); $\mathbf{I}_z$ – вектор токов в z-ветвях (сопротивления, индуктивности, источники тока).

Система уравнений (5) распадается на три системы уравнений

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_C = \mathbf{G}_{CC}^{-1} (-\mathbf{G}_{CE} \mathbf{U}_E - \mathbf{G}_{CC}'' \mathbf{U}_C - \mathbf{G}_{CR} \mathbf{I}_R - \mathbf{G}_{CL} \mathbf{I}_L - \mathbf{G}_{CI} \mathbf{I}_I), \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_L = \mathbf{G}_{LL}^{-1} (-\mathbf{G}_{LE} \mathbf{U}_E - \mathbf{G}_{LC}'' \mathbf{U}_C - \mathbf{G}_{LR} \mathbf{I}_R - \mathbf{G}_{LL}'' \mathbf{I}_L - \mathbf{G}_{LI} \mathbf{I}_I), \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_{RR} \mathbf{I}_R = -\mathbf{G}_{RE} \mathbf{U}_E - \mathbf{G}_{RC} \frac{d}{dt} \mathbf{U}_C - \mathbf{G}_{RL} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_L - \mathbf{G}_{RI} \mathbf{I}_I, \quad (10)$$

где $\mathbf{U}_C$ – вектор напряжений на емкостях; $\mathbf{I}_L$, $\mathbf{I}_R$ – векторы токов в индуктивностях и сопротивлениях; остальные матрицы являются соответствующими подматрицами матрицы $\mathbf{G}$.

Системы уравнений (8) и (9) решаются методом Эйлера с постоянным шагом интегрирования dt . Система алгебраических уравнений (10) решается на каждом шаге интегрирования по времени. Номиналы элементов электрической цепи пересчитываются на каждом шаге интегрирования, что позволяет учесть нелинейности.

При расчете установившегося режима на переменном токе с использованием комплексных чисел процесс интегрирования отсутствует. Система уравнений (5) при этом принимает вид

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{CC} & \mathbf{G}_{CR} & \mathbf{G}_{CL} \\ \mathbf{G}_{RC} & \mathbf{G}_{RR} & \mathbf{G}_{RL} \\ \mathbf{G}_{LC} & \mathbf{G}_{LR} & \mathbf{G}_{LL} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_C \\ \dot{\mathbf{I}}_R \\ \dot{\mathbf{I}}_L \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{G}_{CE} & -\mathbf{G}_{CI} \\ -\mathbf{G}_{RE} & -\mathbf{G}_{RI} \\ -\mathbf{G}_{LE} & -\mathbf{G}_{LI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}}_E \\ \dot{\mathbf{I}}_I \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Для генерации и многократной перегенерации цепной модели разработан метод параметрической генерации цепной модели, представляющий собой программный код, осуществляющий формирование в автоматическом режиме матрицы соединений электрической цепи $\mathbf{A}$, матрицы номиналов $\mathbf{V}$ и матрицы типов элементов $\mathbf{T}$. Данные матрицы имеют вид

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_R \quad \mathbf{A}_L \quad \mathbf{A}_E], \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{Bmatrix} \{3\} \\ \{4\} \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (12)$$

где $\mathbf{A}_R$, $\mathbf{A}_L$, $\mathbf{A}_E$ – соответственно матрицы соединений элементов R , L и E ; $\mathbf{R}$ – диагональная матрица сопротивлений расчетных ветвей; $\mathbf{L}$ – квадратная матрица индуктивностей расчетных ветвей, имеющая на главной диагонали значения собственных индуктивностей, а на недиагональных элементах – значения взаимных индуктивностей между ветвями; $\mathbf{E}$ – значение ЭДС, подаваемой на вход схемы; $\{3\}$, $\{4\}$ – векторы, заполненные соответственно тройками и четверками в соответствии с типами элементов R и L ; 1 – тип элемента E .

Результаты расчета библиотека ECLib выдает в виде матриц для следующей графической обработки (рис. 6).

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 концентроров и расчетных секций,

а также числа витков внутри концентрв, ширины охлаждающих каналов, геометрии проводника и других параметров трансформатора.

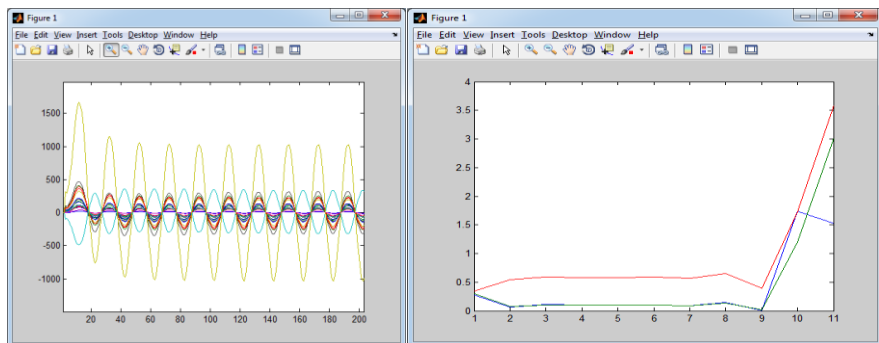


Рис. 6. Изменение токов расчетных секций и распределение потерь в расчетных секциях по высоте концентрв ОНН

В третьей главе приведены результаты разработки модели и метода теплового расчета распределительного трансформатора на основе разветвленных ЭСЗ.

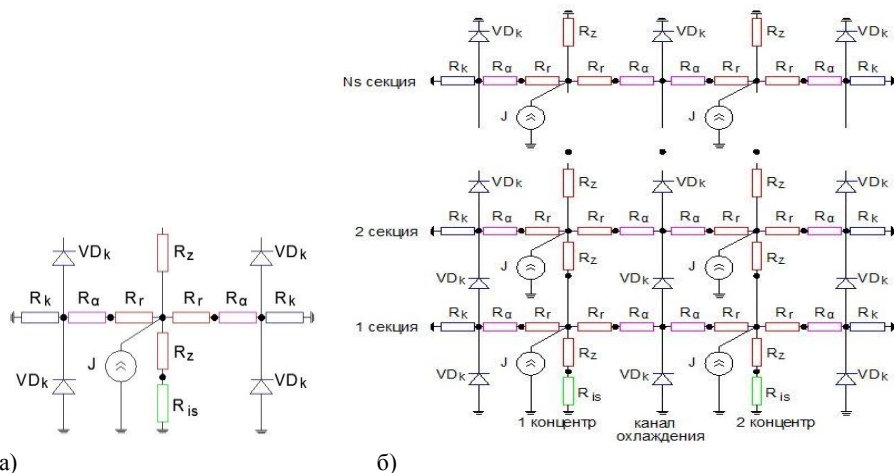


Рис. 7. Структура секции ЭСЗ тепловой цепи обмотки трансформатора (а) и ЭСЗ обмотки НН трансформатора ТСЛ-630/0,4 (б)

Известным инструментом для построения моделей электрических цепей является пакет Simulink. Основным недостатком использования Simulink для теплового расчета трансформаторов является большая трудоемкость автоматизации построения ЭСЗ тепловой цепи. Поэтому для этих целей была использована библиотека ECLib. Структура типового

элемента ЭСЗ обмотки трансформатора и разветвленная ЭСЗ обмотки НН ТСЛ-630/0,4 представлены на рис. 7,а и рис. 7,б соответственно.

Параметрическая генерация системы уравнений, описывающих процессы в ЭСЗ тепловых процессов, осуществляется аналогично ЭСЗ для расчета потерь, приведенной во второй главе.

Тепловые сопротивления теплопроводности и теплоотдачи для каждого участка цепи вычисляются соответственно по формулам

$$R_{\lambda} = \frac{b}{\lambda S}, \quad R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha S}, \quad (13)$$

где b , S – соответственно длина и сечение участка тепловой цепи; λ , α – коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи.

Для вычисления коэффициентов теплоотдачи используется формула

$$\alpha_k = Nu \frac{\lambda_f}{h} = C \left(\frac{gh^3}{\mu(T)} \rho(T)^2 \beta \Delta T \frac{c_p}{\lambda(T)} \right)^m \frac{\lambda_f(T)}{h}. \quad (14)$$

где Nu – критерий Нуссельта; $\lambda_f(T)$ – коэффициент охлаждающей среды (ОС); g – ускорение свободного падения; h – высота расчетной секции обмотки; $\nu(T)$ – кинематическая вязкость воздуха; β – коэффициент температурного расширения ОС; $c_p(T)$ – удельная теплоемкость ОС; $\mu(T)$ – динамическая вязкость ОС; коэффициенты C , m определяются режимом течения охлаждающей среды.

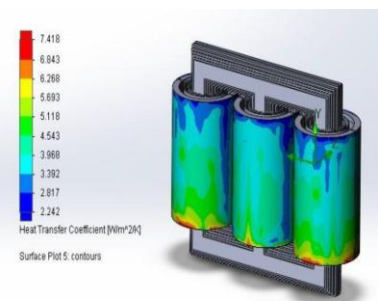


Рис. 8. Пример расчета коэффициента теплоотдачи с обмоток ТСЛ-400/10 во Flow Simulation.

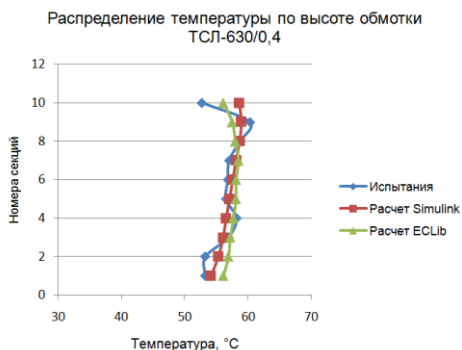


Рис. 9. Сравнение результатов теплового расчета обмотки ТСЛ-630/0,4 средствами Simulink и ECLib с результатами испытаний

Сравнение результатов расчета коэффициента теплоотдачи с поверхности обмоток трансформаторов с результатами, полученными при расчете трехмерной полевой модели в среде FlowSimulation (рис. 8) показана

ло, что отклонения не превышают 10%, что допустимо в температурном диапазоне 20 – 155 °С.

Результаты теплового расчета обмоток ТСЛ-630/0,4 с использованием библиотеки ECLib и сравнение с расчетами средствами Simulink и результатами тепловых испытаний (рис. 9, 10, 11).

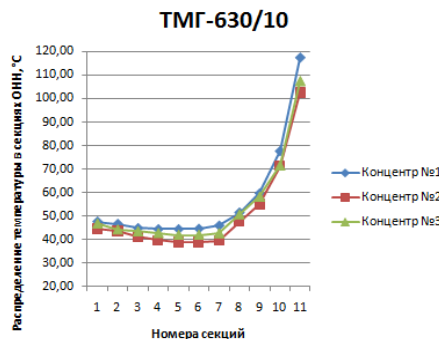


Рис. 10. Результаты расчета распределения температуры в секциях ОНН трансформатора ТМГ-630/10.

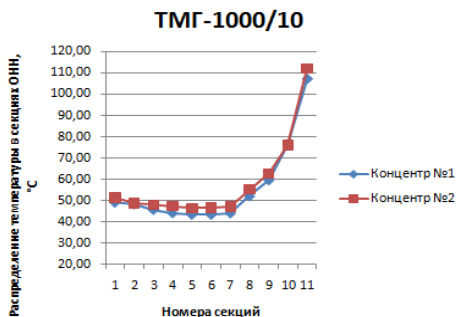


Рис. 11. Результаты расчета распределения температуры в секциях ОНН трансформатора ТМГ-1000/10

Модели на основе ЭСЗ отличаются высоким быстродействием по сравнению с полевыми моделями и могут быть использованы в алгоритмах поиска оптимального решения. В то же время они обладают достаточной для инженерных задач точностью, что видно из рис. 9. В частности, с их помощью можно определить температуру наиболее нагретой точки. В то же время в плане точности результатов они занимают промежуточное место между упрощенными эмпирическими и точными полевыми моделями. Поэтому при необходимости для готового проекта можно осуществить точный тепловой расчет на полевой модели.

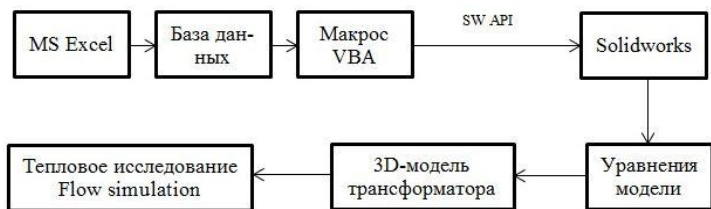


Рис. 10. Структура организации параметрической генерации и исследования полевой модели трансформатора

Параметрическая генерация полевых тепловых моделей трансформатора реализуется путем имплементации алгоритма на рис. 10.

В четвертой главе представлены результаты разработки и апробации подсистемы теплового анализа в САПР трансформаторов. Структура подсистемы теплового анализа приведена на рис. 11. Программная реализация проведена с помощью взаимосвязанного комплекса приложений: Microsoft Excel со встроенной средой программирования Visual Basic, Matlab, Solidworks FlowSimulation.

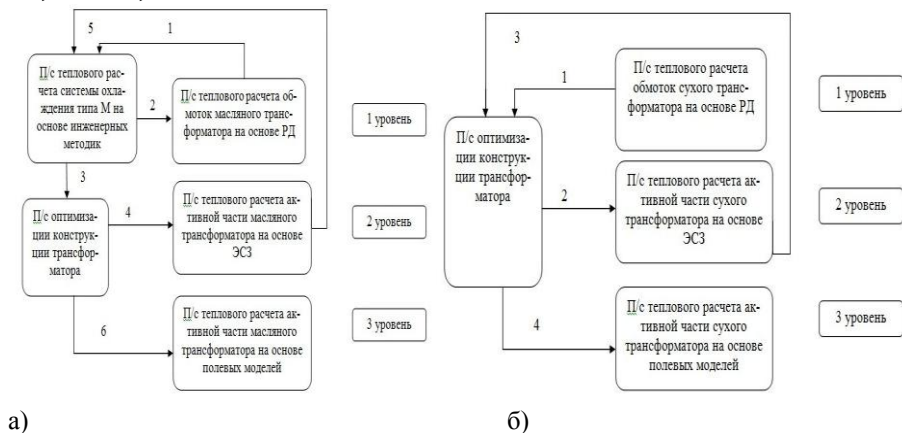


Рис. 11. Структура подсистемы теплового расчета масляного (а) и сухого (б) трансформаторов

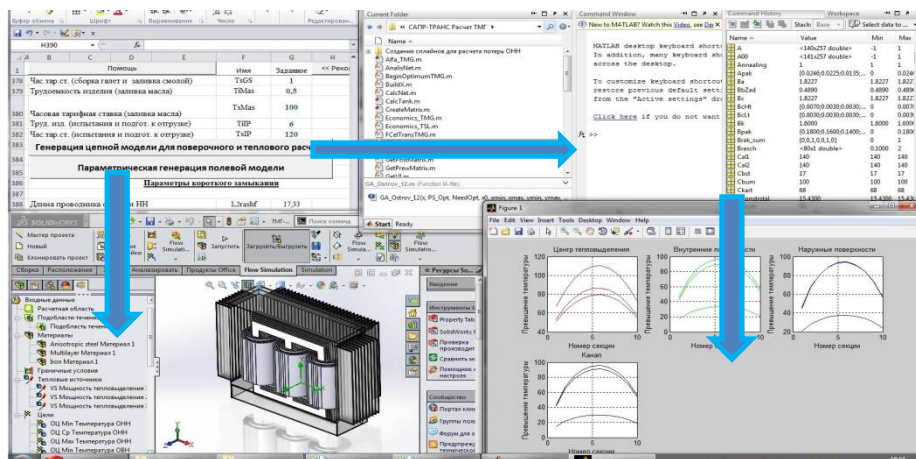


Рис. 12. Интерфейс подсистемы теплового анализа в САПР трансформаторов

Диалог системы с пользователем осуществляется через интерфейс, реализованный в файле Excel. Все исходные данные для расчета передаются из файла Excel с помощью макросов среды Visual Basic в среду

Matlab путем использования встроенных процедур VBA MIPutMatrix. В Matlab происходят все вычисления, в том числе и тепловые расчеты 1-го и 2-го уровней. Результаты расчетов передаются обратно в файл Excel посредством вызова процедур MIGetMatrix. Параметрическая генерация полевой модели активной части и тепловой расчет 3-го уровня осуществляются программными средствами Solidworks Flow Simulation.

Разработанная подсистема теплового анализа была использована при расчете сухих трансформаторов типа ТСЛ с литой изоляцией, а также масляных трансформаторов типа ТМГ с гофробаком. Результаты расчета и сравнение с результатами тепловых испытаний. Отклонения результатов расчета на эмпирических моделях 1-го уровня в некоторых случаях достигали 50%, на полевых моделях 3-го уровня – не превышали 7%. На разработанных в диссертации цепных моделях 2-го уровня отклонения не превысили 10%, что говорит о достаточной для инженерных задач точности теплового расчета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана универсальная автономная библиотека моделирования электрических цепей, позволяющая автоматизировать процесс генерации и исследования электрических схем замещения физических процессов.

2. Разработан метод параметрической генерации цепных моделей физических процессов, позволяющий автоматизировать процесс построения и численного исследования уточненных моделей, значительно снижающий трудоемкость проектирования.

3. Разработаны цепные модели на основе электрических схем замещения физических процессов в обмотках трансформатора, позволяющие при высоком быстродействии решать с высокой точностью исследовательские и инженерные задачи, в частности, задачи расчета потерь и перегревов отдельных элементов обмоток трансформатора с учетом неравномерного распределения тока в элементах.

4. Разработаны параметрические генераторы цепных моделей для расчета потерь и теплового состояния обмоток трансформатора из ленты.

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

6. Разработаны алгоритмы и программные средства для создания подсистем расчета потерь и теплового состояния элементов распределительных трансформаторов на основе математических процессоров Excel и MatLab.

7. Разработана эффективная подсистема теплового анализа САПР распределительных трансформаторов, позволяющая осуществлять тепловой расчет трансформатора с использованием моделей разного уровня сложности и точности, в том числе на основе электротепловой аналогии.

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

9. Результаты работы внедрены в практику производственного проектирования распределительных трансформаторов и в учебный процесс в вузе.

Публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Стулов, А. В.** Тепловой расчет обмоток сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием электрических схем замещения / А. В. Стулов, А. И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 40-43.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.

Научные издания

1. **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 им. Ленина». – Иваново, 2014 – 96 с.

Публикации в других изданиях

1. **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.

2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. **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 науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2014. – Т.4. – С. -146-149.
9. **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
10. **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
11. **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

12. **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
13. **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

***Свидетельства о государственной регистрации
программы для ЭВМ***

1. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ. Подсистема тепловых расчетов распределительных трансформаторов на основе электрических схем замещения / Тихонов А. И., **Стулов А.В.** – № 2014619822; 23.09.2014. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

СТУЛОВ Алексей Вадимович
**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ
ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА В САПР РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ**
АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 21.10.2015г. Формат 60х84¹/₁₆

Печать плоская. Усл.печ.л.1.13.

Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И.Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34