

ИВАНОВ Александр Валерьевич

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ
И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ
ИЗ ЛЕНТЫ**

Специальности:

05.13.12. – Системы автоматизации проектирования
(электротехника и энергетика);

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново – 2011

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

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор Попов Геннадий Васильевич

Научный консультант

доктор технических наук, доцент Тихонов Андрей Ильич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор Пантелеев Евгений Рафаилович.
кандидат технических наук, доцент Кроль Татьяна Яковлевна.

Ведущая организация

ОАО "ЗАРУБЕЖЭНЕРГОПРОЕКТ", г. Иваново.

Защита состоится 31 мая 2011 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при ИГЭУ по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ауд. Б-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ, автореферат размещён на сайте www.ispu.ru.

Автореферат разослан « 30 » апреля 2011г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

В.В. Тютиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с развитием энергосистем, старением электротехнического оборудования, потребность в оборудовании, в том числе и реакторном, возрастает. В настоящее время наиболее технологичными можно считать реакторы из алюминиевой ленты.

В России реакторное оборудование получило распространение в начале 30-х годов в качестве токоограничивающих реакторов, что было вызвано увеличением мощности электроустановок и ростом токов короткого замыкания. В настоящее время в России выпускаются реакторы на токи от 50 до 5000 А, на классы напряжения 6, 10, 15 и 20 кВ, номинальным индуктивным сопротивлением от 0,01 до 2 Ом. Конструктивно такие реакторы представляют собой катушки индуктивности с обмоткой из многожильного (иногда транспонированного) провода круглого сечения или из алюминиевой или медной ленты.

Наиболее прогрессивной и технологичной считается конструкция реакторов из ленты. В настоящее время реакторы из ленты изготавливает фирма Nokian (Финляндия), Trench (Австрия), Coilinnovation (Австрия), Ageva (Франция), Hilkar (Турция), F.d.u.e.G. (Италия) и др. В России такие реакторы производит компания «Электрозавод» (г. Москва), осваивается выпуск реакторов из ленты на ЗАО Трансформер (г. Подольск, Московская обл.).

Основной недостаток реакторов из ленты состоит в наличии мощного эффекта вытеснения тока, что предъявляет повышенные требования как к методикам их расчета, так и к технологии производства. Разнообразие конструкций и широта мощностных линейек реакторов обуславливает необходимость автоматизированного проектирования. Таким образом, актуальной является задача разработки системы проектирования реакторов, опирающейся на современные возможности математического моделирования физических процессов, позволяющей снизить затраты на создание опытных образцов.

Работа выполнялась в Ивановском государственном энергетическом университете. Изготовление опытного реактора и экспериментальные исследования выполнялись на базе ЗАО «Трансформер» (г. Подольск, Московская обл.), специализирующемся на выпуске силовых трансформаторов и трансформаторных подстанций.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (по отраслям)», так как содержит результаты разработки научных основ построения средств

САПР», в частности, разработки методики оптимального проектирования токоограничивающего реактора из ленты и моделей для анализа и синтеза проектных решений. Диссертационная работа соответствует также паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», так как содержит результаты разработки и реализации эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента при проектировании токоограничивающего реактора из ленты.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектных работ при производстве токоограничивающих реакторов из ленты путем разработки уточненных математических моделей и технологии проектирования, позволяющих учитывать особенности физических процессов, протекающих в этих устройствах.

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Разработка математических моделей, позволяющих рассчитывать индуктивность, потери, механические усилия и перегревы обмоток реактора с учетом эффекта вытеснения тока.
2. Создание системы автоматизированного проектирования реактора из ленты.
3. Экспериментальная проверка результатов расчета и технологическая подготовка процесса производства реактора.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы численного моделирования физических полей и цепей, в частности, метод конечных элементов для расчета магнитного и теплового полей, метод контурных токов для расчета электрических цепей с индуктивностями и взаимными индуктивностями, а также методы нелинейного программирования для поиска оптимального решения.

Научная новизна.

1. Разработана и обоснована методика оптимального проектирования и структура САПР реактора из ленты, отличающаяся использованием быстродействующей математической модели устройства, основанной на теории поля и теории цепей.
2. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать индуктивность реактора из ленты, тепловое состояние и механические усилия в его обмотках с учетом эффекта вытеснения тока, основанная на формировании и расчете электрической схемы замещения, в которой об-

мотки дробятся на расчетные секции, а матрица индуктивностей строится путем серии расчетов магнитного поля методом конечных элементов.

3. Разработана комбинированная динамическая модель реактора из ленты, позволяющая рассчитывать распределение теплотерь и механических усилий с учетом вытеснения тока в переходных режимах, в том числе и аварийных.

Практическая значимость результатов;

1. Разработаны алгоритмы и программные средства для создания САПР реактора из ленты на основе популярных математических процессоров Excel и MatLab.

2. Разработана САПР реактора из ленты.

3. Рассчитаны оптимальные варианты реакторов разных типоразмеров, отличающиеся пониженным весом активных материалов.

4. На основе оптимизационных расчетов и численных исследований предложен новый вариант конструкции реактора из ленты с сегментированными чередующимися обмотками.

5. Разработана технология изготовления реактора, в которой реализованы оригинальные технические решения, в частности, технология изготовления крестовин реактора и изоляторов из электротехнической смолы, конструкция креплений обмоток реактора.

6. Разработана технологическая оснастка для производства реакторов из ленты.

7. Изготовлен и испытан опытный образец реактора.

Результаты диссертации внедрены на ЗАО «Трансформер», что позволило разработать и создать опытный образец реактора со сборной конструкцией и обмоткой из ленты и синтетической арамидной изоляцией, имеющей уменьшенные габариты, массу и потери. Кроме того, методы электромагнитного расчета обмоток реакторов и трансформаторов из ленты, а также система моделирования электромагнитных процессов в обмотках из ленты внедрены в учебный процесс на кафедре электромеханики Ивановского государственного энергетического университета.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов «Энергия» в 2008 и 2009 г.г., на международной научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» (Бенардосовские чтения, Иваново, ИГЭУ) в 2009 г., на научно-технической конференции студентов и аспирантов вузов России «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ) в 2010 и 2011 г.г.

Список публикаций. По результатам работы опубликовано 1 монография, 3 статьи в издании, рекомендованном ВАК, 1 статья в техническом журнале, 3 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (102 наименования) и приложений, содержит 123 стр. основного текста, 67 рисунков и 6 таблиц. В приложении приведено три акта внедрения результатов диссертационной работы в производство на ЗАО «Трансформер» (г. Подольск Московской области) и учебный процесс Ивановского государственного энергетического университета.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведён анализ проблем проектирования и производства токоограничивающих реакторов. Токоограничивающие реакторы служат для защиты электротехнического оборудования от повреждений и надежного отключения при коротком замыкании путем ограничения тока. Применение реакторов также позволяет поддерживать в момент КЗ уровень напряжения неповрежденных соединений.

В отечественной практике реакторостроения наибольшее распространение получили бетонные токоограничивающие реакторы и реакторы сборной конструкции, обмотки которых мотаются кабельным проводником. За рубежом токоограничивающие реакторы производятся фирмами Trench, Coil Innovation, ABB, Nokian Capacitors и др. При этом используются прогрессивные электротехнические материалы, что в совокупности с передовым подходом к проектированию позволяет создавать реакторы с высокими технико-экономическими характеристиками. Благодаря линейным характеристикам и простоте конструкции наибольшее распространение получили реакторы без сердечника.

Одним из перспективных направлений производства токоограничивающих реакторов является использование в качестве проводника медной или алюминиевой ленты. Такие обмотки более технологичны, механически более жесткие и устойчивые к электродинамическим усилиям.

Главный недостаток реакторов из ленты состоит в наличии мощного эффекта вытеснения тока, приводящего к увеличению добавочных потерь и перегревам торцевых частей обмоток. Это повышает требования к точности моделей, заложенных в основу систем проектирования.

Работы отечественных и зарубежных исследователей, посвящённые электромагнитным расчётам реакторов изложены в основном в периодической литературе. Анализ литературы позволяет сделать вывод о том, что вопросы проектирования реакторов из ленты изучены недостаточно. Особые проблемы возникают при расчете индуктивности реактора и теплотеря с учетом вытеснения тока. Предложенные в литературе методики в случае реактора из ленты дают существенную погрешность.

Таким образом, актуальной является задача создания системы проектирования реактора из ленты, опирающейся на быстродействующие численные модели, основанные на теории поля и цепей. Наиболее перспективным выглядит способ построения САПР путем интеграции на базе единой расчетной среды ограниченного набора относительно дешевых или же разработанных собственными силами компонентов, поддерживающих необходимый набор математических моделей.

Вторая глава посвящена разработке методики оптимального проектирования и структуры САПР токоограничивающего реактора из ленты. В качестве объекта проектирования выбран реактор класса напряжения 10 кВ, с номинальным током 1600 А, с индуктивным сопротивлением 0,35 Ом (рис. 1).

Сформулированы основные требования к системе проектирования реактора, среди которых основным является требование точности результатов расчета индуктивности и добавочных потерь на номинальном токе. Показано, что традиционные формулы расчета индуктивности дают большую погрешность в случае использования ленточного проводника. Попытка использовать для расчета индуктивности современные системы расчета магнитных полей с учетом вихревой составляющей, в частности EICut, показала, что точный расчет возможен, только если в модели поля представлен каждый виток обмотки, что существенно усложняет модель. Попытка заменить сечение обмотки массивными подобластями дала погрешность порядка 10%.



Рис. 1. 3-D модель реактора с вертикальным расположением фаз

Учитывая также, что полевые модели отличаются малой скоростью расчета, недопустимой в задачах оптимизации, решено разработать специальную модель, позволяющую рассчитать распределение тока по высоте ленты, индуктивное сопротивление реактора, механические усилия и перегревы обмоток с учетом этого распределения. Модель строится на основе мысленного разбиения обмотки реактора на расчетные секции (рис. 2), после чего строится и рассчитывается электрическая схема замещения (рис. 3). В результате расчета определяется распределение тока по расчетным секциям с учетом эффекта вытеснения тока, что позволяет более точно рассчитать индуктивность реактора, теплототери и механические усилия.

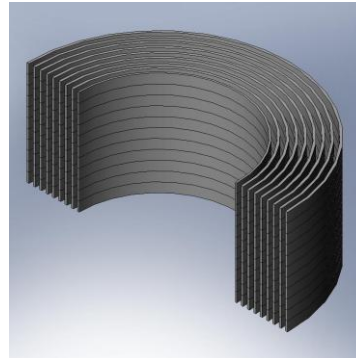


Рис. 2. Модель катушки реактора с разбиением на секции

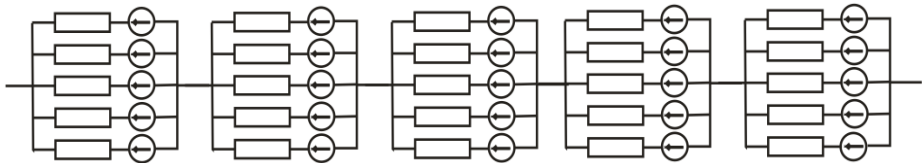


Рис. 3. Схема замещения реактора из алюминиевой ленты

Участок ленты в пределах концентратора образует расчетную секцию, представленную на рис. 3 активным сопротивлением и ЭДС, наведенной совокупным магнитным полем реактора. Главная проблема состоит в необходимости расчета всех взаимных индуктивностей. Для этого предлагается использовать библиотеку конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib, разработанную в ИГЭУ, способную интегрироваться с открытыми приложениями, адаптируя их к решению задач с использованием результатов расчета магнитного поля.

Методика оптимального проектирования реактора из ленты может быть представлена следующей типовой последовательностью действий:

- 1) параметрическая генерация конечно-элементной модели (рис. 4), на которой осуществляется серия расчетов магнитного поля; на этом этапе путем сплайновой аппроксимации полученных матриц результатов формируются зависимости

$$\vec{B}_{ij}(D_i, D_j, X_{ij}), L_{ij}(D_i, D_j, X_{ij}), \quad (1)$$

где \vec{B}_{ij} – индукция магнитного поля, созданного единичным током j -го контура диаметром D_j в точках расположения i -го контура диаметром D_i ; X_{ij} – расстояние между центрами соосных контуров; L_{ij} – взаимная индуктивность двух соосных контуров;

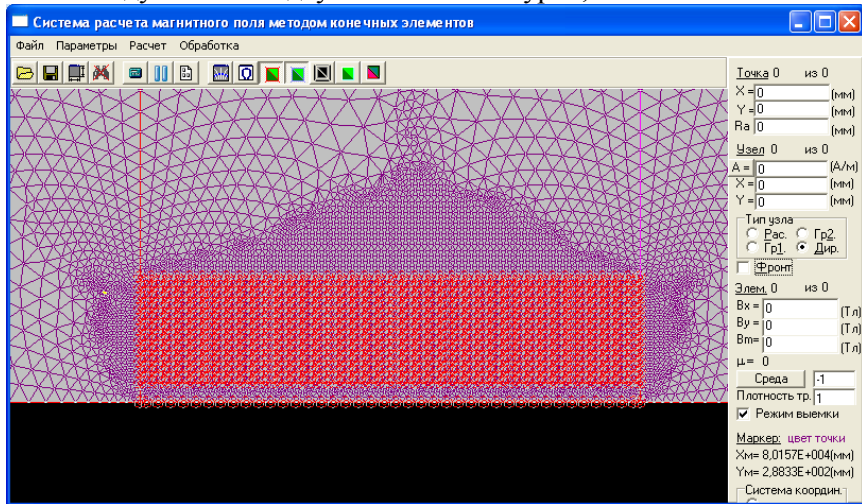


Рис. 4. Фрагмент конечно-элементной модели, созданной параметрическим генератором для расчета влияния контуров с током друг на друга

- 2) формирование систем алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих установившиеся и динамические процессы в схеме замещения рис. 3, решение которых позволяет получить распределение тока и теплотерьер по расчетным секциям, механические усилия в обмотках, индуктивность и перегревы обмоток реактора;
- 3) поиск оптимального варианта, осуществляемый в трех вложенных циклах: во внутреннем цикле методом переменной метрики ищется локальный экстремум целевой функции

$$f(\mathbf{X}) = K_G G + K_P P_S, \quad (2)$$

путем варьирования аргументов

$$\mathbf{X} = (H, W, b, b^k) \quad (3)$$

из стартовой точки, которая выбирается случайным образом во втором цикле; внешний цикл реализует перебор по дискретно изменяющемуся аргументу N_k ; здесь G – вес реактора; P – потери; K_G и K_P – весовые коэффициенты; H – высота фазной обмотки; b – толщина

ленты проводника; W – число витков в фазной обмотке; b_k – ширина охлаждающего канала; N_k – количество концентроров обмотки; оптимизация осуществляется с учетом функциональных ограничений:

$$0.99L_n \leq L \leq 1.01L_n, \quad D_n \leq [D], \quad t_{max} \leq [t], \quad \sigma_{max} \leq [\sigma], \quad (4)$$

где L_n – заданная по техническому заданию индуктивность обмотки реактора; D_n – наружный диаметр обмотки; $[D]$ – предельное значение наружного диаметра; t_{max} , σ_{max} – максимальные значения температуры и механических напряжений; $[t]$, $[\sigma]$ – допустимые значения температуры и механических напряжений;

- 4) уточненный расчет оптимального варианта, подготовка конструкторской и технологической документации.

Структура СПР реактора представлена на рис. 5.

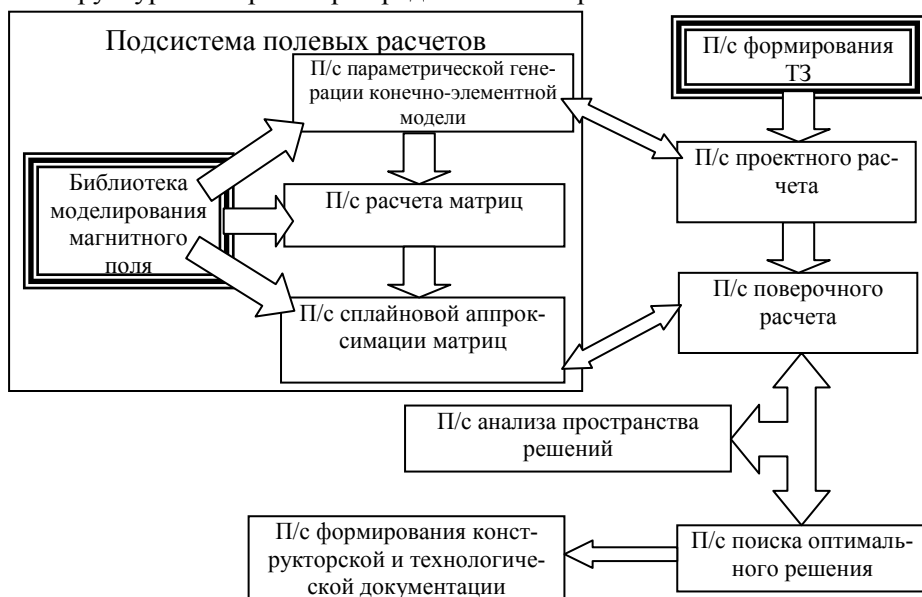


Рис. 5. Структура САИР реактора из ленты

Система реализована на базе MS Excel. Подсистемы, требующие сложных математических функций, реализованы в среде MatLab. Ядром подсистема полевых расчетов является динамически подключаемая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib. Подсистема формирования конструкторской и технологической документации задействует средства MS Office и выбранную пользователем систему автоматизированного конструирования.

Третья глава посвящена разработке математического обеспечения САПР токоограничивающего реактора, включающего четыре модели:

- 1) комбинированную модель, построенную на основе системы уравнений в символьном виде по методу контурных токов, описывающих установившиеся режимы в схеме замещения рис. 3, и результатов расчета магнитного поля, представленных в виде зависимостей (1);
- 2) аналогичную комбинированную модель, построенную на основе системы дифференциальных уравнений, описывающих динамические режимы в обмотках реактора с учетом эффекта вытеснения тока;
- 3) математическую модель для расчета механических усилий, действующих на обмотки реактора в установившихся и динамических режимах, функционирующую на основе результатов расчета схемы замещения рис. 3 и зависимостей (1);
- 4) математическую модель тепловых процессов в обмотках реактора.

Комбинированная динамическая модель фазной катушки реактора из ленты строится на основе схемы замещения рис. 6.

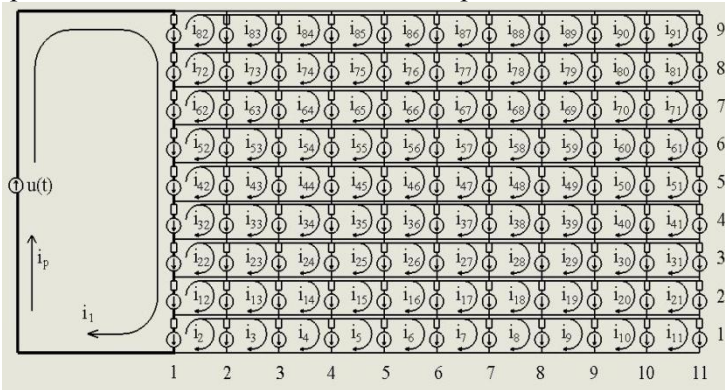


Рис. 6. Уточненная схема замещения фазной обмотки реактора из алюминиевой ленты

Данная схема замещения описывается системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{q=1}^n \left(\sum_{s=1}^{ns} \frac{\partial \Psi_{s1}}{\partial i_q} \right) \frac{di_q}{dt} = u(t) - i_l \cdot \sum_{s=1}^{ns} R_{s1} + \sum_{s=1}^{ns} \sum_{r=2}^{nk} R_{s1} \cdot i_{fp(s,r)} \\ \sum_{q=1}^n \left(\frac{\partial \Psi_{sk}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{s1}}{\partial i_q} \right) \frac{di_q}{dt} = R_{s1} \cdot i_l - R_{sk} \cdot i_{fp(s,k)} - R_{s1} \cdot \sum_{r=2}^{nk} i_{fp(s,r)} \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} k=2 \\ s=1 \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} k=nk \\ s=ns \end{array} \right. \cdot \quad (5)$$

Здесь n – количество контуров; ns – количество концентроров обмотки; nk – количество расчетных секций в концентре; s – номер концентрора; k –

номер секции в концентре; i – ток контура; Ψ – потокосцепление секции; R – сопротивление секции; $u(t)$ – напряжение, поданное на обмотку; $fp(s,r)$ – функция, пересчета двойного индекса секции в одинарный индекс тока; частные производные потокосцеплений секции по токам контуров вычисляются по зависимостям (1).

Данная система уравнений имеет вид

$$[L] \cdot \left[\frac{di}{dt} \right] = [U], \quad (6)$$

где $[L]$ – квадратная матрица индуктивностей; $[di/dt]$ – вектор производных от контурных токов по времени; $[U]$ – вектор напряжений.

Многофазная обмотка реактора, соединенная в треугольник, в сим-вольном виде описывается системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{q=1}^n \sum_{s=1}^{ns} \left(\frac{\partial \Psi_{m,s,l}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{nf,s,l}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q + j\omega L_{nm} i_m + j\omega L_{unf} \sum_{r=1}^{nf-1} i_r + \\ + i_m \cdot \sum_{s=1}^{ns} R_{m,s,l} + i_m \cdot R_{nm} + R_{unf} \sum_{r=1}^{nf-1} i_r + \sum_{r=1}^{nf-1} \sum_{s=1}^{ns} R_{nf,s,l} \cdot i_r + \\ + \sum_{s=1}^{ns} \sum_{r=2}^{nk} (R_{nf,s,l} \cdot i_{fp(nf,s,r)} - R_{m,s,l} \cdot i_{fp(m,s,r)}) = \dot{U}_m - \dot{U}_{nf} \\ \sum_{q=1}^n \left(\frac{\partial \Psi_{m,s,k}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{m,s,l}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q + R_{m,s,k} \cdot i_{fp(m,s,k)} - \\ - R_{m,s,l} \cdot i_m + R_{m,s,l} \cdot \sum_{r=2}^{nk} i_{fp(m,s,r)} = 0 \\ \sum_{q=1}^n \left(\frac{\partial \Psi_{nf,s,k}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{nf,s,l}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q + R_{nf,s,k} \cdot i_{fp(nf,s,k)} + \\ + R_{nf,s,l} \cdot \sum_{m=1}^{nf-1} i_m + R_{nf,s,l} \cdot \sum_{r=2}^{nk} i_{fp(nf,s,r)} = 0 \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} m=1 \\ m=1 \\ m=1 \\ k=2 \\ s=1 \\ k=2 \\ s=1 \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} m=nf-1 \\ s=ns \\ s=ns \end{array} \quad (7)$$

Здесь n_f – количество фаз; R_n и L_n – сопротивление и индуктивность нагрузки.

Данная система уравнений имеет вид

$$[Z] \cdot [i] = [\dot{U}] \quad (8)$$

где $[Z]$ – квадратная матрица полных сопротивлений; $[i]$ – вектор контурных токов; $[\dot{U}]$ – вектор напряжений.

Интегрирование системы уравнений (6) дает распределение токов по сечениям в любой момент времени (рис. 7). Индуктивность обмотки:

$$L_p = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_p^2}, \quad (9)$$

где U, I – действующие значения напряжения и тока первого контура; f – частота.

Распределение тока по расчетным сечениям трехфазного реактора, полученное путем решения системы уравнений (8) представлена на рис. 8. Заменой $j\omega$ на d/dt система уравнений (8) преобразуется в систему дифференциальных уравнений, имеющую форму (6), описывающую динамику многофазного реактора. По полученным в результате расчета значениям контурных токов определяем токи отдельных секций, по которым рассчитываем потери в секциях, суммарные $P_{\Sigma m}$, основные P_m и добавочные P_{dm} потери и силы, действующие на обмотки.

Найденные таким образом потери в расчетных сечениях реактора являются исходными данными для подсистемы теплового расчета. Тепловой расчет ведется двумя методами: расчет теплового поля методом конечных элементов и расчет по упрощенной методике на основе тепловых

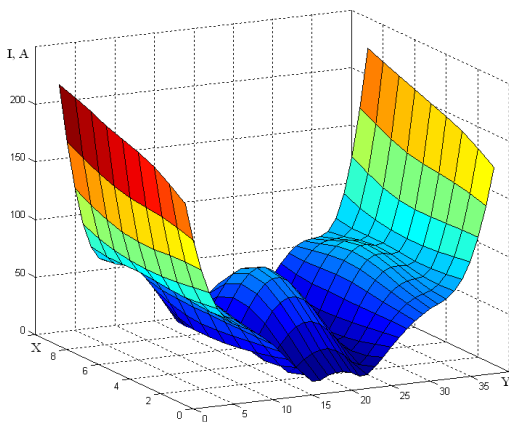


Рис. 7. Распределение тока I по высоте проводника (ось X) и концентрам (ось Y)

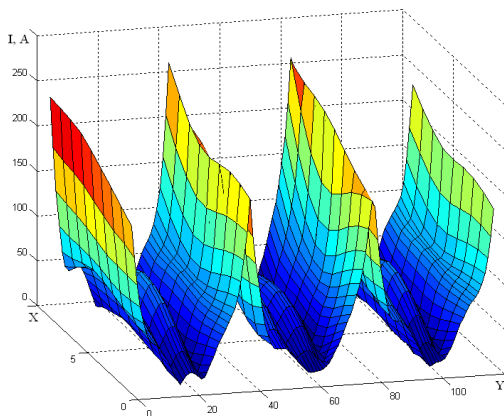


Рис. 8. Распределение тока I по высоте проводника (ось X) и концентрам (ось Y)

цепей. В первом случае с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии текучей среды, моделируется ее движение и теплообмен. Кроме того, использовались уравнения состояния компонентов текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. Потоки воздуха, возникающие при работе реактора с естественным охлаждением, являются ламинарными. Поэтому турбулентность не учитываем. Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей средой моделируется пограничным слоем потока текучей среды.

Этот расчет отличается точностью, но малым быстродействием (рис. 9), что не позволяет использовать его в оптимизационных задачах. Для оптимизации разработана подсистема тепловых расчетов на основе методики, представленной в РД16 472-88, которая распространяются на сухие трансформаторы. Эта методика была переработана для расчета реакторов с воздушным сердечником. Модель теплового расчета может давать существенные погрешности при определении перегревов обмоток реактора. Тем не менее, для оптимизации реактора, в которой сравниваются температурные режимы множества вариантов конструкции, такая точность вполне допустима.

Четвёртая глава посвящена исследованию вариантов конструкции токоограничивающего реактора с помощью разработанных математических моделей. В качестве примера использования данных моделей проверены две гипотезы о возможности снижения эффекта вытеснения тока путем изменения конструкции реактора. Первая гипотеза касается транспонирования ленты. При этом каждая обмотка реактора разбивается на три сегмента. При переходе с одного концентратора на другой лента транспонируется путем переход с одного сегмента на другой. Разработана схема замещения, описываемая системой уравнений

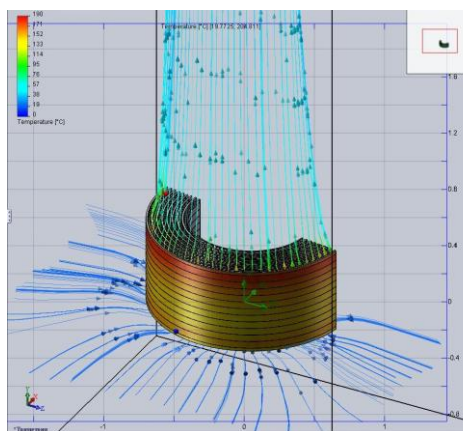


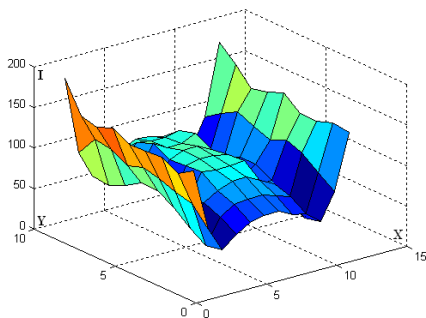
Рис.9. Результат теплового расчета катушки реактора

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{q=1}^n \left(\sum_{s=1}^{ns} \frac{\partial \Psi_{msl}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q + i_{fp(m,1,1)} \cdot \sum_{s=1}^{ns} R_{msl} + \\ + \sum_{s=1}^{ns} \sum_{r=2}^{nk} R_{msl} \cdot i_{fp(m,s,r)} = \dot{U}, \\ \sum_{q=1}^n \left(\frac{\partial \Psi_{msk}}{\partial i_q} - \frac{\partial \Psi_{msl}}{\partial i_q} \right) j\omega i_q - R_{msl} \cdot i_{fp(m,1,1)} + \\ + R_{msk} \cdot i_{fp(m,s,k)} + R_{msl} \cdot \sum_{r=2}^{nk} i_{fp(m,s,r)} = 0 \end{array} \right. \begin{array}{l} m=nf \\ k=nk \\ s=ns \\ k=2 \\ s=1 \\ m=l \end{array} \quad (10)$$

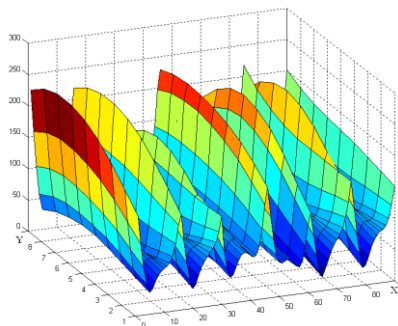
Полученное в ходе расчета распределение тока по расчетным секциям показано на рис. 10,а. Разбиение обмотки сегменты с транспонированием, не устраняет эффекта вытеснения тока. Применение других схем транспозиции также не дает эффекта выравнивания тока.

Также исследован вариант конструкции реактора с разнесенными фазами, с вырезанной средней частью проводника, по которой течет ток малой плотности (рис. 10,б). При этом каждая фаза распадается на два сегмента. Шесть сегментов разных обмоток чередуются друг с другом.

Получен вариант, обеспечивающий заданную индуктивность, с перегревами, как в исходном варианте, дающий экономию алюминия 28,5%.



а)



б)

Рис. 10. Распределение тока I по высоте проводника (ось X) и концентралам (ось Y) при транспонировании ленты (а) и в варианте с разнесенными фазами (б)

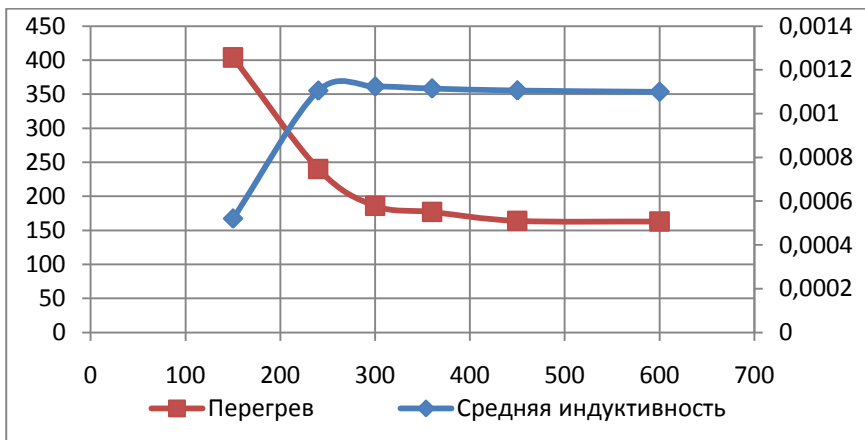


Рис. 11. Зависимость перегрева и средней индуктивности реактора от осевого расстояния между катушками

Далее проведено исследование влияния на работу реактора расстояния между фазными обмотками. Получено, что с уменьшением расстояния между фазными обмотками индуктивность растет. Однако растет и эффект вытеснения тока, что после некоторого предела приводит к уменьшению индуктивности реактора и перегреву реактора (рис. 11).

Второй раздел четвертой главы посвящен разработке подсистемы оптимизации реактора. Блок-схема подсистемы оптимизации представлена на рис. 12. Текущий локальный экстремум ищется средствами Mat-Lab методом Дэвидона-Флетчера-Пауэлла путем варьирования вектора аргументов (3). Поиск осуществляется с учетом функциональных ограничений (4). Глобальный экстремум ищется путем случайного перебора стартовых точек для направленного поиска. Внешний цикл реализуется вследствие недопустимости дискретности варьируемой переменной N_k в цикле направленного поиска локального экстремума.

Целевая функция (2) строится путем свертки вектора критериев с помощью весовых коэффициентов, выбор которых осуществляется на основе анализа множества Парето, которое строится на основе предварительного перебора вариантов при варьировании аргументов в заданных пределах. Результаты перебора вариантов расчета катушки реактора в пространстве критериев G-P и множество Парето (оггибающая линия) для задачи оптимизации реактора представлены на рис. 13. Здесь каждое ре-

шение представлено точкой. Учитывались только те решения, которые удовлетворяют функциональным ограничениям (4).

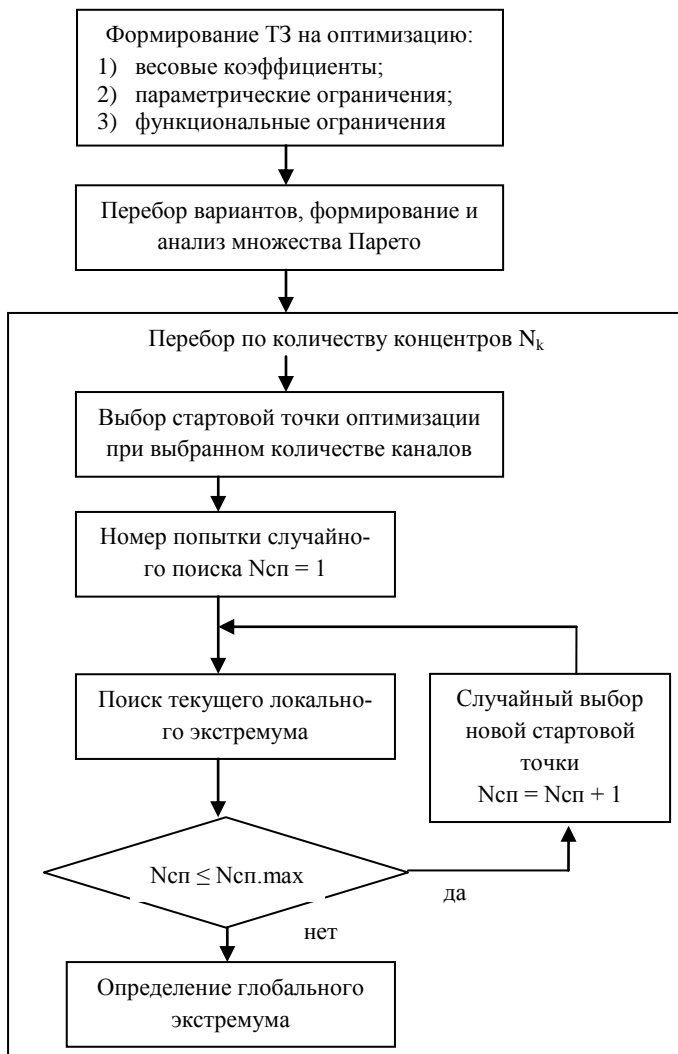


Рис. 12. Блок-схема процесса оптимизации реактора

В ходе оптимизации получен вариант, в котором выровнены перегревы обмоток, величина индуктивности соответствует технической зада-

нию, вес проводника уменьшен по сравнению с исходным вариантом на 9,5 %, потери энергии уменьшились на 36%, высота реактора уменьшилась на 11,5% при неизменном внешнем диаметре обмотки.

Третий раздел посвящен организации опытного производства и испытанию спроектированного реактора.

Опытное производство токоограничивающего реактора из ленты было организовано на базе производственной площадки ЗАО «Трансформер». В программе трёхмерного моделирования был спроектирован технологический процесс производства реактора. Для намотки катушек реактора модернизирован намоточный станок «Micafil». Разработана и изготовлена специальная конструкция кантователя. Для пропитки обмоток использовалась установка пропитки методом вакуум-давление «Махита». Обмотка сушится в печи, в которой задается температурный режим сушки в соответствии с рекомендациями производителя используемой смолы. Для изготовления монолитных крестовин была использована эпоксидная смола. В качестве армирующих материалов использовались стеклотекстолитовые рейки и арамидная сетка. Опорные изоляторы изготавливались из той же эпоксидной смолы, что и крестовины.

Первичная экспериментальная проверка результатов электромагнитного расчета реактора проводилась в испытательной лаборатории ЗАО «Трансформер». Измерение индуктивного сопротивления производилось методом амперметра-вольтметра. Отличие результатов измерений индуктивности от расчетных значений не превысило 4,9%.

Сертификационные испытания опытного образца реактора (электромагнитные замеры, испытаний на нагрев, электродинамические испытания) проводились в сертификационном центре «НИЦ ВВА» г. Москва. Тепловые испытания подтвердили соответствие обмотки реактора требованиям ГОСТ 14794-79.

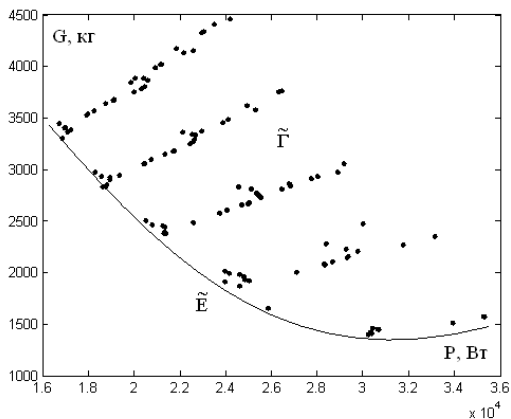


Рис. 13. Результаты перебора вариантов расчета катушки реактора в пространстве критериев G-P

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика оптимального проектирования, структура и компонентный состав САПР токоограничивающих реакторов из ленты, построенной на основе быстродействующей комбинированной математической модели электромагнитных процессов.
2. Разработаны математические модели реактора из ленты, предназначенные для расчета переходных процессов, индуктивности, температур и механических усилий с учетом эффекта вытеснения тока.
3. Разработана параметрически генерируемая конечно-элементная модель магнитного поля реактора с разбиением обмоток на расчетные секции.
4. Разработана методика формирования матрицы индуктивностей для математической модели реактора из ленты с использованием параметрически генерируемой конечно-элементной модели магнитного поля.
5. Разработан способ моделирования реакторов из ленты с сегментированными обмотками с произвольной геометрией сегментов и их чередованием.
6. Осуществлен поиск оптимальной конструкции реактора.

Публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Тихонов А.И., Иванов А.В. Использование библиотеки моделирования магнитного поля при расчете реактора из алюминиевой ленты. - "Вестник ИГЭУ", 2009, Вып. 3, с. 25-28.
2. Тихонов А.И., Попов Г.В., Иванов А.В. Система автоматизированного проектирования токоограничивающего реактора из алюминиевой ленты. - "Вестник ИГЭУ", 2010, Вып. 4, с. 55-58.
3. Тихонов А.И., Попов Г.В., Иванов А.В. Особенности транспозиции обмотки в токоограничивающем реакторе из алюминиевой ленты. - "Вестник ИГЭУ", 2011, Вып. 1, с. 70-72.

Монография

4. Тихонов А.И., Иванов А.В. Расчет и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 116 с.

Публикации в других изданиях

5. Иванов А.В., Тихонов А.И. Расчет индуктивности реактора в среде EXCEL с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля // Энергия 2008: Тезисы докл. региональной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2008. - с. 26-27.
6. Тихонов А.И., Иванов А.В. Расчет потерь и индуктивности реактора из фольги с учетом вытеснения тока (XV Бенардосовские чтения): Тезисы докл. Междунар. науч.- техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2009. - с.53.
7. Иванов А.В., Попов Г.В., Тихонов А.И. Использование компьютерных технологий при проектировании токограничивающего реактора // Вестник научно-промышленного общества. М: «Алев-В», 2011, Вып. 1, с. 29-34.
8. Иванов А.В., Тихонов А.И. Попов Г.В. Особенности САПР токограничивающего реактора из алюминиевой ленты // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тезисы докл. семнадцатой международной науч.- техн. конф. студентов и аспирантов / МЭИ. – М.: Издательский дом МЭИ, Том. 2, 2011. - с. 10-11.

ИВАНОВ Александр Валерьевич

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ ИЗ ЛЕНТЫ

АВТОРЕФЕРАТ

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

Подписано в печать 27.04.2011г. Формат 60x84¹/₁₆

Печать плоская. Усл.печ.л.1.13.

Тираж 100 экз. Заказ № 123.

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

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ