

На правах рукописи

Латыпов Рамиль Рашитович

РАЗРАБОТКА ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ И  
ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ДИСКОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Самарском государственном техническом университете на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Базаров Александр Александрович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Лившиц Михаил Юрьевич**

кандидат технических наук  
**Сорокин Алексей Григорьевич**

Ведущая организация:  
Саратовский государственный технический университет (г. Саратов)

Защита состоится "7" декабря 2010 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Самарский государственный технический университет" (СамГТУ) по адресу: г. Самара, ул. Первомайская, д. 18, корпус №1, ауд. 4А.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СамГТУ, а с авторефератом диссертации на официальном сайте: <http://postgrad.samgtu.ru>

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; тел.: (846) 278-44-96, факс (846) 278-44-00; E-mail: [krotkov@samgtu.ru](mailto:krotkov@samgtu.ru).

Автореферат разослан «1» ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.217.04  
кандидат технических наук, доцент



Е.А.Кротков

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Диссертация посвящена разработке и исследованию индукционных систем для вибрационных и термоциклических испытаний дисков турбоагрегатов на специальном стенде.

**Актуальность проблемы:** Совершенствование технологий проектирования таких сложных изделий как турбореактивные двигатели, турбокомпрессоры сопровождается усложнением программного обеспечения, повышением вычислительной мощности компьютеров. Это позволяет решать все более широкий круг вопросов без привлечения физических экспериментов. Вместе с тем, существует ряд задач, требующих натурных испытаний. К числу таких относятся задачи определения малоцикловой и многоцикловой усталости элементов двигателей. Повышению эффективности испытаний дисков турбоагрегатов на специальных стендах должно способствовать совершенствование оборудования стенда, расширение его функциональных возможностей в части приближения программы испытаний к реальным условиям. В настоящее время на стендах проводятся термоциклические испытания дисков с помощью индукционных систем нагрева и систем воздушного охлаждения. Более сложной задачей, не нашедшей практического решения, является осуществление вибрационных испытаний дисков. Известные способы возбуждения вибраций имеют множество ограничений, препятствующих воспроизведению вибраций вращающихся дисков. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет использования индукторов, создающих усилия во вращающемся диске с необходимой частотой и амплитудой. Компактность таких индукторов позволяет совместить две системы – систему термоциклирования и систему вибровозбуждения. Такой подход позволяет воспроизводить вибрационные испытания при различных температурных распределениях в диске.

Внедрение эффективных технологий, использующих индукционный нагрев, требует предварительного исследования процессов методами физического и математического моделирования. Моделирование процессов теплопередачи при индукционном нагреве осложняется тем, что фрагменты конструкции имеют сложную геометрическую форму и различные электрофизические свойства, а также необходимостью учета таких факторов, как изменение свойств материалов при нагреве – удельного сопротивления, теплопроводности, магнитной проницаемости.

Решение практически важной задачи разработки адекватных моделей сложных электромагнитных, тепловых и упругодеформационных процессов в дисках, позволит осуществить оптимизацию конструкции индукционных систем и режимов работы.

В связи с этим актуальными являются задачи исследования электромагнитных, электродинамических, тепловых и деформационных процессов в системе «индуктор – диск», разработки методики проектирования энергоэффективных индукционных установок.

Решение поставленных задач составляет основное содержание диссертационной работы, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка методик расчета индукционных систем для термоциклических и вибрационных испытаний дисков турбоагрегатов.

Достижение поставленной цели представляется в виде последовательного решения следующих задач:

1. Разработка проблемно – ориентированных математических моделей процессов в индукционных системах нагрева и вибровозбуждения дисков турбоагрегатов.

2. Исследование электромагнитных и тепловых полей, гармонических деформаций и напряжений в индукционных системах для термоциклических и вибрационных испытаний дисков турбоагрегатов.

3. Оптимальное проектирование индукционной системы для вибрационных испытаний дисков турбоагрегатов.

4. Разработка пространственно-временного управления индукционной системой нагрева дисков для термоциклических испытаний.

5. Разработка систем управления термоциклическими и вибрационными испытаниями на стенде.

**Задачи исследования.** В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих способов и устройств нагрева и вибровозбуждения подвижных изделий;

- построение математических моделей электромагнитных и тепловых полей для анализа процессов в системе «индуктор – диск»;

- разработка математической модели статического и гармонического процессов деформации диска под воздействием электромагнитных сил;

- разработка вычислительных алгоритмов для реализации метода расчета электромагнитных и тепловых полей в сложной структуре изделия;

- разработка системы управления, обеспечивающей требуемое температурное распределение.

**Методы исследования.** Для решения поставленной задачи использовались методы математического анализа, теории теплопроводности, теории электромагнитного поля, теории упругости, теории оптимального проектирования, численные методы расчета, экспериментальные методы исследования объектов и систем управления.

Достоверность результатов работы оценивалась путем сравнения с результатами численных экспериментов и частично с данными, полученными в работах других авторов.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

- разработаны численные математические модели процессов теплопроводности, электромагнитного поля и упругих деформаций при индукционном нагреве дисков, ориентированные на решение задач проектирования индукционных систем нагрева и вибровозбуждения;

- разработаны алгоритмическое обеспечение и вычислительная технология реализации метода расчета электромагнитных и тепловых полей, деформаций под воздействием электродинамических усилий в дисках, позволяющие учитывать при проектировании взаимное влияние процессов;

- разработаны алгоритм и методика поиска оптимального пространственно-временного управления процессом индукционного нагрева в системе термоциклических испытаний дисков турбоагрегатов, отличающиеся от известных использованием взаимодействием двух задач оптимизации - программного управления нагревом и оптимального проектирования индукционной системы.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

На основе предложенных алгоритмов разработана инженерная методика решения комплекса задач по оптимальному проектированию индукционных систем для термоциклических и вибрационных испытаний.

Разработанные связанные математические модели позволяют решать комплексные задачи исследования электротепловых, электродинамических процессов и процессов упругой деформации для стационарных и нестационарных режимов с учетом нелинейностей и сложных условий теплообмена.

Разработаны методики и модели для проектирования конструкций и режимов работы установок для термоциклических и вибрационных испытаний дисков турбоагрегатов.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧААННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ» (2008 р., Маріуполь, Україна), XII Международной конференции «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ» (Крым, Алушта, 2008), Международной научно-технической конференции (XV Бенардосовские чтения) «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Иваново, 2009), 14, 15, 16 Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2008, 2009, 2010), Международной научно-технической конференции. «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти: ТГУ, 2009), Международной научно-технической конференции «Успехи современной электротехнологии» (Саратов, СГТУ, 2009), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. «Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений» (Москва: Технетика, 2009), Всероссийских научно-технических конференциях студентов, магистрантов и аспирантов «Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов» (Тольятти: ТГУ, 2007, 2009), Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Кибернетика электротехнических систем» (Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2007), Всероссийских научных конференциях «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск: НГТУ, 2007, 2008, 2009), II Всероссийской научно-технической конференции «Электротехнологии, электропривод и

электрооборудование предприятий» (Уфа: УГНТУ, 2009), V, VI Всероссийских научных конференциях «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара СамГТУ 2008, 2009).

### **Реализация результатов работы**

Полученные в работе теоретические закономерности и практические результаты использованы

-при выполнении фундаментальных НИР (2002-2009 г.г.) «Разработка теории векторной оптимизации процессов, описываемых уравнениями Максвелла и Фурье для определенного класса задач математической физики» (№ г.р. 01200802926), «Создание математических моделей взаимодействия электромагнитных и тепловых полей в пространственно распределенных объектах» (№ г.р. 01200951711);

в проектно-конструкторских организациях и промышленных предприятиях:

-при разработке и создании индукционной системы нагрева для установки по ремонту дисков турбокомпрессоров в ООО «Газпром трансгаз Самара» ОАО «Газпром» (Самара)

-в учебном процессе при чтении лекций по курсу «Электротехнологические установки и системы», «Автоматическое управление системами с распределенными параметрами», в курсовом и дипломном проектировании.

**Публикации** По результатам диссертационной работы опубликована 21 печатная работа.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 127 страницах машинописного текста; содержит 55 рисунков и 9 таблиц, список использованных источников, включающий 126 наименований.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Комплексные математические модели взаимосвязанных электромагнитных, тепловых, термомеханических и вибрационных процессов дисков турбоагрегатов, позволяющие эффективно решать задачи исследования и оптимального проектирования;
2. Методика расчета нестационарного процесса упругих колебаний вращающихся дисков с подвижным локальным источником давления;
3. Методики проектирования конструктивных и режимных параметров индукционных систем для вибрационных и термоциклических испытаний дисков на основе итерационного решения комплексной задачи;

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается выбор темы и ее актуальность, формулируется цель и основные задачи работы, характеризуется практическая значимость полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются способы и устройства проведения вибрационных испытаний для различных изделий. Проанализированы

варианты применения индукционных систем для термоциклических и вибрационных испытаний дисков турбоагрегатов.

Индукционный нагрев традиционно используется для создания заданных температурных распределений в объектах различной формы. В диссертационной работе одной из задач является разработка индукционной системы для термоциклических испытаний дисков турбоагрегатов. Повышенная частота тока затрудняет использование магнитопроводов, поэтому возникают проблемы учета магнитной связи между отдельными кольцевыми индукторами, а также явления полосатого нагрева. Решение этих задач достигается в ходе совместного поиска оптимальной конструкции индукционной системы и параметров алгоритма управления. Сложность этой задачи объясняется наличием взаимосвязи электромагнитной и тепловой задач, а также существенной нелинейностью процесса теплообмена.

Помимо процессов термоциклирования на испытательном стенде производятся другие виды испытаний. Наиболее сложными для реализации являются вибрационные испытания. Это связано с тем, что диск вращается на большой скорости. Наиболее приемлемым для решения этой проблемы является индукционный способ возбуждения вибраций. В данном случае нет никаких ограничений на частоту прилагаемого усилия независимо от скорости вращения. Индукционное устройство для создания усилий в диске может быть реализовано с различными конструктивными и энергетическими характеристиками. Выбор оптимального варианта должен осуществляться с учетом множества факторов: минимальная активная и реактивная мощность индуктора, минимальные гармонические искажения кривой усилий и возникающих в диске напряжений, электромагнитная совместимость с существующими источниками питания, потери в железе магнитопровода на гистерезис и от вихревых токов.

Использование численных моделей различных процессов приводит к необходимости применения методов поиска оптимального решения в задачах проектирования и синтеза управления, обладающих хорошей устойчивостью и гарантированным достижением результата. Существующие численные методы поиска хорошо приспособлены для параметрической оптимизации. Однако в случае сложных связанных моделей - термоупругих, электродинамических и других, когда резко возрастает время расчета, и имеется множество влияющих друг на друга параметров, необходимо применение более гибких алгоритмов оптимизации, позволяющих корректировать некоторые задачи в ходе процесса.

В работе проведен обзор публикаций, посвященных вопросам конструирования и расчета индукционных систем, исследованию электродинамических процессов, а также методам расчета электромагнитных, тепловых и упругодеформационных процессов при индукционном нагреве.

**Вторая глава** посвящена разработке и исследованию математической модели, адекватно представляющей электромагнитные и тепловые явления, упругодеформационные процессы в сложной системе «индуктор – диск».

Сложность геометрической формы и необходимость учета нелинейностей обусловили необходимость применения численных методов расчета. В работе

используется численный метод решения, основанный на методе конечных элементов. Условия испытаний предъявляют жесткие требования к индукционным системам: они должны обеспечить высокую эффективность, возможность формирования нужного распределения внутренних источников тепла, требуемую интенсивность процесса нагрева, высокий КПД, малый вес и габариты, высокую надежность и долговечность. Создание индукционных нагревательных установок, удовлетворяющих предъявленным требованиям, базируется на исследованиях, проведенных на основе математической модели, достаточно полно и точно отражающей процесс индукционного нагрева.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный магнитный потенциал системой уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot}\dot{A}\right) + \gamma \frac{\partial \dot{A}}{\partial t} = \dot{J}_0; \\ \operatorname{rot}\dot{A} = \dot{B}, \quad \operatorname{div}\dot{A} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\dot{A}$  - векторный магнитный потенциал;  $\dot{J}_0$  - плотность тока внешних источников;  $\dot{B}$  - магнитная индукция;  $\mu_a = \mu\mu_0$  - магнитная проницаемость среды;  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость.

Принимая во внимание осевую симметрию и квазистационарность исследуемого поля, уравнение система (1) может быть представлена для комплексной амплитуды векторного потенциала в виде уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{\partial \dot{A}(r, z)}{\partial z} \right] + r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{\mu_a} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \dot{A}(r, z)}{\partial r} \right] - j\omega \dot{A}(r, z) - \dot{J}_0 = 0, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота питающего тока.

В качестве граничных условий принято равенство нулю векторного потенциала на границе расчетной области  $S_1$ , находящейся в бесконечности. На поверхностях геометрической симметрии  $S_2$  предполагается перпендикулярность линий потока этим линиям и поверхностям:

$$\dot{A} \Big|_{S_1 \in S} = 0; \quad \frac{\partial \dot{A}}{\partial n} \Big|_{S_2 \in S} = 0,$$

Указанная постановка задачи охватывает самые общие электромагнитные явления и позволяет рассчитывать практически весь класс устройств индукционного нагрева, который может быть математически описан двумерным уравнением Пуассона.

Идеология расчета МКЭ основывается на вариационных принципах, когда решение системы (2) ищется путем минимизации функционала, выражающего энергию электромагнитного поля:

$$F(\dot{A}) = \frac{1}{2} \iint_Q \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_a} \right) \frac{\partial \dot{A}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu_a r} \right) \frac{\partial \dot{A}}{\partial r} \right] dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q j \omega \gamma |\dot{A}|^2 dr dz + \frac{1}{2} \iint_Q J_0 \dot{A} dr dz \quad (3)$$

В дискретной модели функционал (3) определяется суммой вкладов всех конечных элементов, и исходное уравнение (2) заменяется системой алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами вида:

$$\{[K] + j[Q]\}[\dot{A}] + [R] = 0, \quad (4)$$

где  $[K]$  – матрица жесткости;  $[Q]$  – матрица вихревых токов;  $[\dot{A}]$  – искомая функция;  $[R]$  – матрица внешних источников тепла.

Мощность внутренних источников тепла вычисляется для каждого КЭ по закону Джоуля – Ленца.

Расчет электродинамических полей в системе «индуктор – изделие» основывался на определении действительной части вектора Пойнтинга:

$$\bar{f} = \mu \mu_0 \gamma \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{2} [\dot{E} \cdot \dot{H}^*] \right\}, \quad (5)$$

Применение метода конечных элементов к тепловой задаче базируется на упрощенной линейной постановке. Это позволяет осуществить преобразования с наименьшими затратами. После получения расчетной конечно-элементной модели производится ее усложнение для учета нелинейностей.

Для решения тепловой задачи в качестве исходной модели принято двумерное линейное уравнение нестационарной теплопроводности для ограниченного цилиндра:

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{w}{c\gamma}; \quad (6)$$

с граничными условиями:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_1=0} = 0; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r_2} = \alpha(T - T_c); \quad (7)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_1} = \alpha(T - T_c); \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_2} = \alpha(T - T_c), \quad (8)$$

где  $T(r, x, t)$  – температура,  $r, x, t$  – радиальная и аксиальная координаты и время процесса,  $w$  – функция распределения мощности внутренних источников тепла,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $x_1, x_2$  и  $r_1, r_2$  – минимальные и максимальные значения аксиальной и радиальной координат диска.

Начальные условия характеризуются произвольным в общем случае пространственным распределением температуры по объему изделия  $T(r, x, 0) = T_0(r, x)$ .

Следуя МКЭ, системе дифференциальных уравнений ставится в соответствие вариационная формулировка о минимизации энергетического функционала, характеризующего тепловое состояние тела:

$$\chi = \iint_S \left[ \frac{1}{2} \lambda r \left( \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 \right) + c \gamma \frac{\partial T}{\partial t} - WT \right] dr dx + \frac{1}{2} \int_{L_h} h (T^2 - 2T_c T) dL, \quad (9)$$

где  $L_h$  – граница с конвективным теплообменом;  $h = \frac{\alpha}{\lambda}$ .

Процесс проектирования индукционного вибровозбудителя содержит несколько этапов, для каждого из которых формулируется своя математическая модель упругой деформации. На первом этапе необходимо определение спектра собственных частот колебаний диска. При отсутствии внешних сил уравнение для движущегося объекта имеет вид:

$$[K]\{\delta\} = -[M]\{\ddot{\delta}\}. \quad (10)$$

Здесь  $[K]$ - матрица жесткости,  $[M]$  - матрица распределенных масс,  $\{\delta\}$ - вектор перемещений. В этом уравнении матрица концентрированных узловых масс либо опускается совсем, либо просто добавляется к матрице массы элемента.

Уравнение (10) типично для всех задач колебаний с конечным числом степеней свободы. При собственных колебаниях все точки движутся в фазе, поэтому мы можем записать

$$\{\delta\} = \{\delta_0\} \sin \omega t. \quad (11)$$

Из этого уравнения получаем следующее условие:

$$([K] - \omega^2 [M])\{\delta_0\} = 0. \quad (12)$$

Уравнение является типичным для задач на собственные значения. Если матрицы  $[K]$  и  $[M]$  имеют размер  $n \times n$ , то мы будем иметь  $n$  различных значений угловой частоты  $\omega$ , и они рассматриваются как собственные частоты системы.

При моделировании колебаний диска под воздействием внешних сил требуется учет различных дополнительных факторов. Внешние массы в виде лопаток или узла крепления к технологической опоре приводят за счет сил трения к демпфированию, то есть к затуханию колебаний.

Нелинейное затухание, которое возникает в некоторых системах, может быть приведено к линейному в первом приближении или может рассматриваться с помощью вычисления по шагам. При включении затухания уравнение динамики может быть записано

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{P\}, \quad (13)$$

где  $[C]$  — матрица затухания (демпфирования),  $\{P\}$  - вектор приложенных усилий.

Дальнейшее разделение модели на модификации связано со способом задания внешних усилий. Если внешняя сила  $\{P(t)\}$  периодична и может быть записана в виде:

$$\{P(t)\} = \{P_0\} e^{i\omega t}, \quad (14)$$

то расчет напряжений, перемещений и деформаций становится проще и быстрее. Более сложная нестационарная модель необходима при исследовании процессов деформации, возникающих за счет приложения усилий сложной формы, в частности, импульсных сил с частотной модуляцией.

Влияние температурного поля на процессы упругой деформации проявляется через изменение свойств материалов и линейное расширение элементов изделия.

Для рассматриваемого класса объектов задачей индукционного нагрева является формирование заданного пространственного температурного распределения. К температурному полю в заданных областях объекта могут предъявляться различные требования и задаваться различные законы распределения, но иногда заранее их характер неизвестен, и его предстоит определить в ходе поиска наилучшего варианта системы нагрева. Учитывая сказанное, можно следующим образом сформулировать комплексную задачу оптимального проектирования конструктивных и режимных параметров системы индукционного нагрева: необходимо найти такие значения параметров основных проектных характеристик системы индукционного нагрева, которые при ее последующем функционировании в оптимальном режиме обеспечивают достижение экстремального значения выходных критериев эффективности в условиях заданных ограничений и требований к конечному температурному состоянию объекта нагрева. Достижение оптимума решения обеспечивается применением интегрированного проектирования конструктивных и режимных параметров системы индукционного нагрева.

Задача проектирования индукционного нагревателя должна решаться с учетом множества факторов.

Векторный критерий оптимальности составляется из наиболее значимых компонент

$$J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\} \rightarrow opt \quad (15)$$

Здесь в качестве критериев рассматриваются быстродействие, расход энергии, КПД, стоимость оборудования, расходы на эксплуатацию и др. Кроме критериев в постановке присутствуют функциональные ограничения, накладываемые источниками питания, технологией и безопасностью. В качестве одного из ограничений принято допустимое отклонение от заданного распределения внутренних источников тепла.

$$|W_3(r, x) - W(r, x)| < \varepsilon; \quad (16)$$

Использование указанного ограничения в качестве одного из критериев сложнее из-за технологии расчетов, так как требуется непростая постпроцессорная обработка результатов в области со сложной геометрией.

Для поиска оптимального варианта использовались численные процедуры, в частности метод Нелдера-Мида.

Для решения перчисленных задач были использованы пакеты программ ELCUT 5.6 и FEMLAB 3.0.

**Третья глава** посвящена расчету параметров индукционных систем и алгоритмов управления для проведения вибрационных испытаний.

При проектировании индукционной системы для возбуждения колебаний в дисках турбоагрегатов возникает ряд проблем, связанных с определением необходимых требований к системе возбуждения колебаний и, в частности, – к виброиндуктору. Исследование процессов вибраций сводится к определению собственных частот дисков, определению характера и параметров, необходимых для создания колебаний нужных форм воздействий (частота, усилие, площадь воздействия) для формирования необходимых напряжений и деформаций, решению нестационарной задачи для поверочного анализа найденных форм воздействия.

После определения форм воздействия определяется величина желаемых усилий с помощью индуктора. В общем виде алгоритм проектирования состоит из двух блоков. В первом осуществляется определение режимных параметров индуктора путем последовательного решения задачи определения собственных частот, оценки качества воспроизведения формируемых гармонических напряжений и перемещений при решении нестационарной задачи с заданными параметрами возбуждающих усилий и задачи частотного анализа. На втором этапе производится оптимизация конструкции и режимов работы индуктора.

Особенностью проектирования конструкции виброиндуктора является достижение необходимых усилий для обеспечения заданных отклонений и напряжений в диске при возбуждении колебаний на резонансных частотах. Для определений амплитудных значений напряжений и деформаций было применено решение задачи частотного анализа.

Увеличение частоты вращения дисков способствует увеличению частот собственных колебаний по экспоненциальному закону вследствие действия центробежных усилий, стремящихся выпрямить диск.

Частота колебаний диска:

$$\nu = \sqrt{\nu_1^2 + B \cdot n^2}; \quad (17)$$

где  $\nu$  - частота колебаний вращающегося диска, Гц;  $\nu_1$  – частота статических колебаний, Гц;  $n$  – частота вращения диска, об/с;  $B$  - коэффициент, зависящий от геометрических характеристик и формы колебаний диска.

При расчете частот собственных колебаний диска при различных скоростях вращения учитывалось добавлением радиальных усилий. При помощи соответствующих формул задаются усилия, направленные от оси диска к ободу, которые по направлению совпадают с возникающими при реальном вращении радиальными усилиями.

Из-за сложной конструкции диска и форм колебаний в нем возникает необходимость решения нестационарной задачи колебаний диска при

приложенных усилиях. Необходимость эта также обусловлена еще и тем, что возникает ряд проблем с режимами подачи импульсов в индукционной системе, это такие проблемы, как компенсация реактивной мощности в индукционной системе, небольшие величины усилий, создаваемых индуктором при частотах питающего тока, близкого к частотам собственных колебаний диска. При этом также возникает необходимость моделирования не только стоячих волн, но и бегущих, что несколько затруднительно при использовании метода конечных элементов.

Решение задачи перемещающегося воздействия заключалось в том, что диск был разбит на  $n$  одинаковых сегментов по окружности на месте приложения воздействия.

Усилие задается на внешней границе сегмента в виде комбинации функции Хевисайда и синусоидальных функций. В общем виде формула выглядит следующим образом:

$$F = |f_{\text{мод}}(t) \cdot f_{\text{нес}}(t) \cdot f_{\omega}(t)|, \quad (18)$$

где,  $f_{\text{мод}}(t)$  - закон изменения модулированного сигнала,  $f_{\text{нес}}(t)$  - закон изменения несущего сигнала,  $f_{\omega}(t)$  - функция, обеспечивающая перемещение усилия по окружности.

Применительно же к пакету моделирования формула выглядит так:

$$F = F_a \sqrt{\sin(\pi v_{\text{мод}} t) \sin(\pi v_{\text{нес}} t) H(\sin(v_{\text{вращ}} t + \varphi) - t_{\text{выкл}})} \quad (19)$$

где  $F_a$  – амплитудное значение усилий индуктора,  $H$ ;  $v_{\text{мод}}$  - частота модулированного сигнала, Гц;  $v_{\text{нес}}$  – частота несущего сигнала, Гц;  $v_{\text{вращ}}$  – частота вращения диска, об/сек;  $\tau$ ,  $k$  – эмпирические коэффициенты;  $\varphi$  – фаза включения сегмента, меняется в зависимости от расположения сегмента.

Анализ исследований показывает, что вне зависимости от частоты вращения при совпадении частоты возбуждающего сигнала и частоты резонанса, колебания диска через несколько периодов принимают форму колебаний соответствующей резонансной форме.

Также при соблюдении ряда условий, а именно совпадении скорости обратно бегущей волны скорости вращения диска можно рассмотреть явление стоячих относительно пространства колебаний, в реальных дисках способных привести к аварии.

В процессе оптимизации режимов работы приходится сталкиваться с рядом проблем. В частности, к ним можно отнести выбор частоты воздействия, с которой связаны проблемы с выбором источника питания, компенсации реактивной мощности, а также прямая зависимость усилий индуктора от частоты тока. Решением этих проблем является использование модулированного сигнала, когда несущая частота во много крат выше частоты воздействия. Отдельно рассматривается задача определения зависимости прилагаемых усилий от площади воздействия (рис.1).

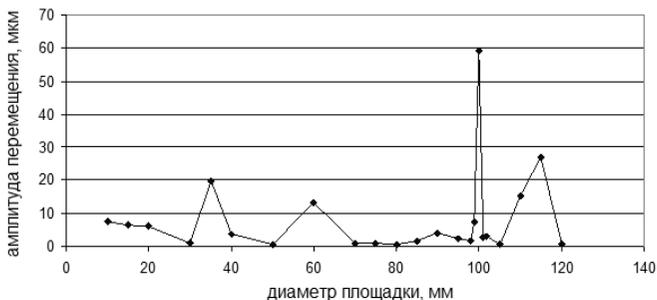


Рис.1 Зависимость амплитуды колебаний от диаметра площадки при возбуждении колебаний с числом узловых диаметров, равным восьми

При проектировании конструкции индуктора рассматривались варианты без магнитпровода и с магнитпроводами различной конструкции.

В качестве цели для комплексной задачи проектирования принимается минимум энергозатрат.

$$J = \int_t P dt \rightarrow \min. \quad (20)$$

Достижение заданной величины электродинамических усилий учитывается в виде ограничений

$$|F - F_3| < \varepsilon. \quad (21)$$

Параметрами при поиске оптимальной конструкции выступают частота напряжения, геометрические размеры (радиус, размеры витков), материалы магнитпровода.

Для обеспечения электромагнитной совместимости источника питания и индуктора при изменении частоты колебаний необходима подстройка параметров колебательного контура. Решение этой проблемы найдено применением процедуры модуляции напряжения несущей стабильной частоты более низкой частотой, соответствующей заданной частоте колебаний диска (рис.2). Наличие высших гармоник в кривой перемещений и напряжений диска снижается с ростом несущей частоты. Так, при несущей частоте, равной 10 кГц, высшие гармоники практически не заметны по сравнению с частотой 1 кГц.

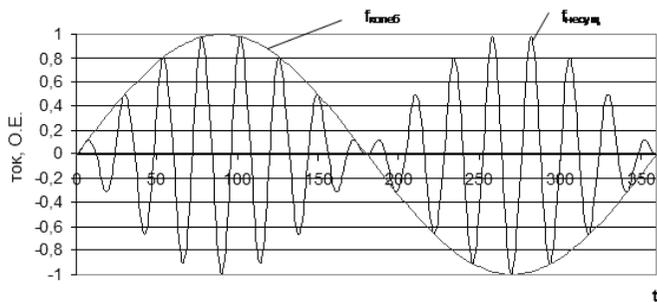


Рис.2 Форма модулированного тока индуктора

В результате задачи оптимального проектирования оптимальным решением является дисковая конструкция индуктора с магнитопроводом диаметром 100 мм. Напряжение 147 В частотой 10 кГц подается в модулированной форме.

**В четвертой главе** рассматриваются вопросы проектирования системы индукционного нагрева для задач термоциклирования.

Формирование заданного температурного поля с помощью нескольких индукторов предполагает управление каждой зоной в отдельности. При этом неизбежно возникает взаимовлияние зон друг на друга за счет теплопроводности.

Разработка индукционных нагревателей для стенда разгонных и термоциклических испытаний подчинена задаче создания температурных полей в дисках, аналогичных полям в реальных условиях. При решении этой проблемы необходимо учесть два противоречивых условия: наличие нескольких индукторов и высокая степень требуемой равномерности температурного поля. Первое условие определяется большими значениями подводимой мощности, необходимостью промежутков для установки системы воздушного охлаждения и обеспечения хорошей циркуляции воздушных потоков. Второе условие вытекает из требований к точности нагрева.

Длительные испытания дисков ставят во главу угла проблему энергозатрат. Поэтому в качестве цели для комплексной задачи проектирования и синтеза управления принимается минимум энергозатрат.

$$J = \int_t P dt \rightarrow \min. \quad (22)$$

На этапе проектирования основным критерием является достижение заданного распределения удельной мощности (и температуры) в нагреваемой системе тел.

$$J_1 = |w_3(x, t) - w(x, t)| \leq \varepsilon. \quad (23)$$

На этапе синтеза системы управления критерий складывается из таких показателей, как минимум отклонения от заданного распределения температуры и минимум энергозатрат

$$J_2 = k_1 |T_3(r, x) - T(r, x, t)| + k_2 \int_t P dt \rightarrow \min \quad (24)$$

Обеспечение взаимодействия двух задач – проектирования и синтеза управления – осуществляется за счет корректировки заданного распределения мощности после моделирования процесса нагрева на связанной модели. Для каждого варианта индуктора заново производится расчет настроек программного устройства.

Для нагрева широкого полотна диска возможно применение индукторов с магнитопроводом, а также кольцевых индукторов. Анализ этих конструкций показал, что второй тип индуктора предпочтительнее, так как позволяет подвести большие значения мощности и обеспечивает более равномерные температурные поля, хотя и несколько уступает в значениях КПД и коэффициента мощности.

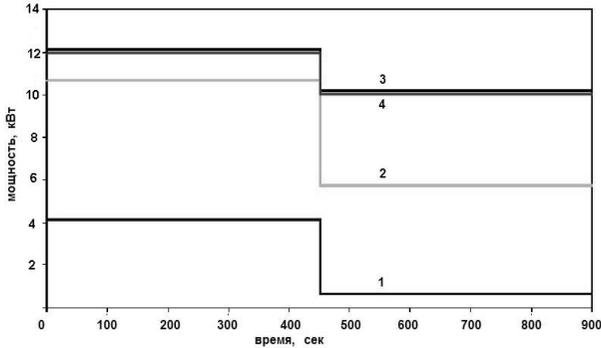


Рис. 3. Диаграммы мощности тепловыделения в зонах диска:  
1 – индуктор №1 (обод); 2 – индуктор №2; 3 – индуктор №3; 4- индуктор №4

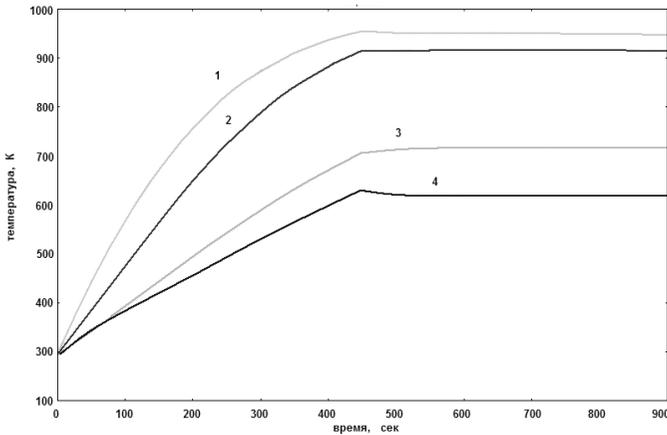


Рис. 4 Временные диаграммы температур в точках диска:  
1 – обод ( $r=0.33$ ); 2 – полотно ( $r=0.27$  м); 3 – полотно ( $r=0.18$  м);  
4 – ступица ( $r=0.084$  м)

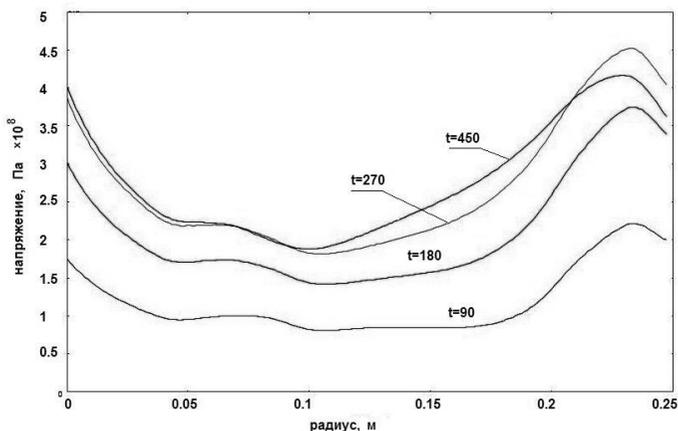


Рис.5 Диаграммы термонапряжений на поверхности диска для различных моментов времени

Таким образом, наиболее приемлемой конструкцией для нагрева полотна диска является система плоских кольцевых индукторов. Найденные уровни мощности и длительности интервалов включения обеспечивают требуемые показатели качества распределений температуры и термонапряжений (рис.4, 5).

**В пятой главе** рассматриваются вопросы реализации индукционных систем для термоциклических и вибрационных испытаний рассматриваемых задач.

Стенд для разгонных и термоциклических испытаний дисков турбоагрегатов предназначен для создания различного вида нагружений дисков, аналогичных реальным нагрузкам во время работы турбоагрегата.

Система управления позволяет воспроизводить следующие характеристики режимов работы турбоагрегатов: скорость нагрева и охлаждения – 2–10 °С/с при максимальной температуре 850 °С; скорость вращения диска – до 1600 рад/с, число циклов до 30000 при длительности цикла от 3 до 30 мин; точность реализации температурного режима при обработке программы ±10 °С.

Супервизорное управление процессом термоциклирования осуществляется с автоматизированного рабочего места оператора, реализованного на персональной ЭВМ, работающей под управлением операционной системы Microsoft Windows 2000 и SCADA-системы сбора и предоставления информации Siemens SIMATIC WinCC 5.1 Service Pack 2. В качестве управляющего контроллера используется программируемый логический контроллер фирмы Siemens серии S7-300.

На основе проведенных исследований для индукционной системы виброиспытаний дисков была реализована индукционная установка, имеющая источник питания на частоту 10 кГц с возможностью модуляции низкой частоты, соответствующей заданной частоте колебаний. Система

регулирования позволяет обеспечивать резонанс колебаний с учетом частоты вращения и температуры диска, от которой зависят свойства материала. В качестве источника выбран преобразователь SPA-K фирмы LDS Bruel & Kjaer мощностью 50 кВА. Он позволяет регулировать частоту от 10 Гц до 10 кГц. Поэтому его можно использовать как непосредственным заданием рабочей частоты тока индуктора, так и при формировании модулированного напряжения с несущей частотой 10 кГц и регулируемой частотой модуляции от 10 до 1000 Гц.

### **Заключение**

В работе получены следующие основные результаты.

1. Разработаны методики проектирования индукционных систем для термоциклических и вибрационных испытаний дисков, отличающиеся учетом многосвязности математических моделей процессов.

2. Разработаны связанные конечно–элементные модели электротепловых процессов и алгоритмы расчета внутренних источников тепла, температурных распределений для индукционных систем термоциклических испытаний дисков.

3. Разработаны связанные конечно–элементные модели и алгоритмы расчета электродинамических усилий и деформаций в дисках для индукционных систем вибрационных испытаний.

4. Разработан алгоритм поиска пространственно-временного управления индукционным нагревом дисков для термоциклических испытаний, отличающийся итерационным последовательным решением задач синтеза управления распределением температур и оптимального проектирования индукционной системы.

5. Разработан алгоритм проектирования индукционной системы для вибрационных испытаний дисков на базе последовательного решения задач определения собственных частот колебаний, определения параметров внешнего воздействия на нестационарной модели упругой деформации и задачи оптимального проектирования индуктора.

6. Предложены конструкции индукционных систем, обеспечивающих термоциклические и вибрационные испытания дисков турбоагрегатов.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

#### **В изданиях по списку ВАК:**

1. Латыпов Р.Р. Расчет индукторов для систем индукционного нагрева дисков и формирования механических колебаний в процессе испытаний [Текст] / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Р.Р. Латыпов // Электротехника. - 2008. - №8. – С. 34-38.
2. Латыпов Р.Р. Особенности систем электроснабжения на специальных испытательных стендах [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // Известия ВУЗов «Электромеханика». -2007. -Спец. выпуск. - С.79-80.
3. Латыпов Р.Р. Электроснабжение систем индукционного нагрева в установках переработки и транспортировки нефтепродуктов [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов, С.В. Степанов, И.О. Щепин // Известия ВУЗов «Электромеханика». -2009. -Спец. выпуск. - С.37.

### **В прочих изданиях:**

4. Латыпов Р.Р. Автоматизация системы индукционного нагрева дисков турбоагрегатов на испытательных стендах. [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий. Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции. Т.2. - Уфа: УГНТУ, 2009. - С. 208-211. ISBN 978-5-7831-0867-9.
5. Латыпов Р.Р. Идентификация процессов индукционного нагрева как объектов с распределенными параметрами [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: Математическое моделирование и краевые задачи. Тр. шестой Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Ч. 2. – Самара: РИО СамГТУ, 2009. – С. 13 – 15. ISBN 978–5–7964–1255–8.
6. Латыпов Р.Р. Индукционная система для вибрационных испытаний дисков турбомашин [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ. VI МІЖНАРОДНА НАУКОВО–ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ. 21–23 травня 2008 р., Маріуполь, Україна. с. 374–376.
7. Латыпов Р.Р. Индукторы для формирования колебаний дисков в процессе испытаний [Текст] / Базаров А.А., Латыпов Р.Р., Семенов С.И. // В сб.: Труды XII Междунар. конференции ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ. - Крым, Алушта, 2008. - С. 336.
8. Латыпов Р.Р. Идентификация процессов индукционного нагрева как объектов с распределенными параметрами [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: Математическое моделирование и краевые задачи: Труды V Всерос. науч. конф. Ч.2. - Самара СамГТУ 2008, С. 11-13.
9. Латыпов Р.Р. Индукционная система для формирования колебаний дисков в процессе испытаний [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: Состояние и перспективы развития электротехнологии. Тезисы докладов Междунар. научно-технич. конф. (XV Бенардосовские чтения). Т. 1. - Иваново: ИГЭУ, 2009. - С. 10. ISBN 978-5-89482-568-7.
10. Латыпов Р.Р. Управление индукционным нагревом дисков для циклического термонагружения [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. 15 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 2. - М.: МЭИ, 2009. - С. 158-159.
11. Латыпов Р.Р. Проектирование конструкции и синтез системы управления индукционных нагревателей для специализированных стендов [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб. Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии. Сборник трудов Международной научно-технической конференции. - Тольятти: ТГУ, 2009. – С. 18-22.
12. Латыпов Р.Р. Индукционные системы для нагрева дисков и формирования механических колебаний в процессе испытаний [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб. Успехи современной электротехнологии. Труды Международной научно-технической конференции. СГТУ, Саратов, 2009 г. – С. 140-144.
13. Латыпов Р.Р. Снижение энергозатрат при индукционном нагреве дисков турбоагрегатов на испытательном стенде [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р.

- Латыпов // В сб. Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Т. 2. - М.: Технетика, 2009. – С. 126-127.
14. Латыпов Р.Р. Разработка системы управления нагревом в процессе термоциклических испытаний дисков турбоагрегатов [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб.: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. Труды Всерос. научно–техн. конф. студ., магистр. и асп. - Тольятти: ТГУ, 2007. - С. 50-51. ISBN 978-5-8259-0364-4.
  15. Латыпов Р.Р. Особенности систем электроснабжения специальных испытательных стендов [Текст] / А.А. Базаров, Р.Р. Латыпов // В сб. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов Кибернетика электротехнических систем. - Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2007. – С. 126-127.
  16. Латыпов Р.Р. Комплексное решение задачи снижения энергозатрат при индукционном нагреве дисков турбоагрегатов [Текст] / Р.Р. Латыпов, С.В. Степанов // В сб.: Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов. Труды Междунар. научно–техн. конф. студ., магистр. и асп. - Тольятти: ТГУ, 2009. - С. 92-93. ISBN 978-5-8259-0499-3.
  17. Латыпов Р.Р. Разработка индукционной системы для создания колебаний в процессе вибрационных испытаний дисков турбоагрегатов [Текст] / Р.Р. Латыпов, А.А. Базаров // В сб.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. 14 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 2. - М.: МЭИ, 2008. - С. 15-16. ISBN 978-5-383-00219-3.
  18. Латыпов Р.Р. Разработка системы индукционного нагрева для подогрева технологических узлов [Текст] / Р.Р. Латыпов, С.В. Степанов, И.О. Щепин, А.А. Базаров // В сб.: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. 16 Междунар. научн. техн. конф. студентов и аспирантов. Т. 2. - М.: МЭИ, 2010. - С. 176. ISBN 978-5-383-00489-0.
  19. Латыпов Р.Р. Система управления индукционным нагревом дисков для циклического термонагружения [Текст] / Р.Р. Латыпов, А.А. Базаров // В сб.: Наука. Технологии. Инновации. Материалы Всерос. науч. конф. Ч. 3. - Новосибирск: НГТУ, 2008. - С. 16- 18.
  20. Латыпов Р.Р. Численное моделирование нестационарного теплообмена в процессе термоциклических испытаний дисков турбоагрегатов [Текст] / Р.Р. Латыпов, А.А. Базаров // В сб.: Наука. Технологии. Инновации. Материалы Всерос. науч. конф. Ч. 3. - Новосибирск: НГТУ, 2007. - С. 118- 119.
  21. Латыпов Р.Р. Расчет индукторов для виброиспытаний дисков турбоагрегатов [Текст] / Р.Р. Латыпов, С.В. Степанов, А.А. Базаров // В сб.: Наука. Технологии. Инновации. Материалы Всерос. науч. конф. Ч. 3. - Новосибирск: НГТУ, 2009. - С. 222-223.

**Личный вклад автора.** В работах [1, 2, 3, 5, 6, 13, 15] автору принадлежит постановка задачи исследования, в работах [9, 16, 18] разработка вычислительного алгоритма расчета электромагнитных полей, в

работах [7, 12, 17, 21] – исследование электродинамических усилий в конструкции, в работе [19] – выбор оптимальной частоты источника питания, в работах [4, 8, 10, 11, 14, 20] – расчет оптимальных алгоритмов управления.

Разрешено к печати диссертационным советом Д 212.217.04.

Протокол № 12 от 26.10.2010 г.

Заказ № 46 Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе.

Самарский государственный технический университет.

Типография СамГТУ.

443100, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 244