

*На правах рукописи*

*Майя*

**ТАМБЯРОВА Майя Владиславовна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН НА ОСНОВЕ  
ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ГЕНЕРИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Специальность  
05.13.12 – Системы автоматизации проектирования  
(электротехника, энергетика)

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

Иваново – 2019

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

**Научный руководитель:**

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

**Официальные оппоненты:**

**Чермошенцев Сергей Федорович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева», заведующий кафедрой «Системы автоматизированного проектирования»

**Сускин Виктор Васильевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования вычислительных средств»

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «4» октября 2019 г. в 14-00 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 Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен

[http://ispu.ru/files/Dissertaciya-Tamyarova\\_M.V..pdf](http://ispu.ru/files/Dissertaciya-Tamyarova_M.V..pdf)

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.064.02



Сидоров  
Сергей Георгиевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Конструкция коллекторной машины (КМ) или машины постоянного тока (МПТ), содержащей ненадежный в эксплуатации щеточно-коллекторный узел, постоянно подвергается критике. В то же время КМ имеет лучшие среди всех типов машин динамические и регулировочные свойства. Особенно популярны КМ малой мощности, используемые в бытовых приборах. Кроме того, высокая перегрузочная способность КМ позволяет им выдерживать конкуренцию и в качестве тяговых двигателей, двигателей прокатных станов и т.п. Поэтому *повышение эффективности проектирования коллекторных электромашин путем разработки более совершенных методик, позволяющих учесть особенности ее постоянно изменяющейся конструкции, является и будет являться актуальной инженерной задачей.*

Конструкция якоря КМ с конца XIX века принципиально не менялась. Однако возможности совершенствования конструкции статора еще не исчерпаны, что вызвано особенностями практически неподвижного относительно статора магнитного поля. Поэтому *в плане перспективных направлений развития САПР КМ актуальной является задача разработки методик проектирования, позволяющих получать новые варианты конструкции статора КМ в процессе структурно-параметрической оптимизации машины.* Так как данная постановка задачи предполагает появление в ходе проектирования нетиповых решений, для которых не существует апробированных методик расчета, разрабатываемая методика должна строиться на основе моделей магнитного поля, позволяющих учесть все особенности конструкции магнитной системы.

Так как преимущества КМ определяются их регулировочными свойствами, то моделирование переходных режимов является одним из главных элементов САПР КМ. При этом *необходимо учитывать влияние на динамику машины особенностей ее конструкции, что требует динамических моделей КМ, основанных на полевой постановке задачи.*

Проблемой разработки САПР электрических машин (ЭМ) занимались многие научные школы СССР и РФ. Значительный вклад в развитие теории САПР ЭМ внесли российские ученые Д.А. Аветисян, Ю.Б. Бородулин, А.Г. Иосифьян, И.П. Копылов, Э.Д. Кравчик, Б.И. Кузнецов, С.И. Маслов, И.П. Норенков, И.Н. Орлов, И.М. Постников, Э.Л. Стрельбицкий, Т.Г. Сорочер, А.А. Терзян, В.А. Трапезников, И.Н. Чарахчян и др.

В плане подходов к созданию САПР КМ данная диссертация продолжает традиции Ивановской школы, в частности, в русле работ Ю.Б. Бородулина, Г.В. Попова, Ю.Я. Щелькалова, Ю.Б. Казакова,

А.И. Тихонова. Особый акцент делается на поиске оптимальной конструкции и моделировании динамики ЭМ, в том числе, с использованием моделей магнитного поля.

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

**Цель работы** заключается в повышении эффективности автоматизированного проектирования коллекторных машин путем разработки и использования математических моделей для анализа и синтеза проектных решений на основе современных компьютерных технологий.

**Задачи, решаемые в диссертации:**

1. Разработка параметрического генератора, позволяющего автоматизировать построение полевых моделей КМ произвольной конструкции.

2. Разработка оптимизационной модели, позволяющего решать задачи структурно-параметрической оптимизации КМ.

3. Разработка полевой динамической модели КМ и подсистемы моделирования произвольных режимов работы КМ нетиповой конструкции на основе существующих имитационных пакетов.

4. Разработка структуры проектно-исследовательской среды в составе САПР КМ. Интеграция разработанных моделей и приложений в единую проектно-исследовательскую среду.

5. Поиск оптимального варианта структуры КМ с использованием инструментов разработанной САПР.

**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 ... и 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 технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных проце-

дур 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».

**Методы исследования.** Используются методы теории САПР, теории цепей и теории магнитного поля, в частности, метод конечных элементов, методы анализа переходных процессов в нелинейных электрических цепях, методы оптимизации, в частности, генетические алгоритмы.

### **Научная новизна.**

1. Разработана методика проектирования коллекторных электрических машин нетиповой конструкции, ***отличающаяся*** использованием параметрически генерируемых моделей магнитного поля как на стадии поиска оптимального варианта, так и на стадии поверочного расчета, осуществляемого в форме имитационного эксперимента.

2. Разработана оптимизационная модель коллекторной электрической машины на основе модели квазистационарного магнитного поля, ***отличающаяся*** способом построения целевой функции с использованием параметрического генератора полевой модели, позволяющего осуществлять программируемые деформации расчетной области, решая таким образом задачу структурно-параметрического синтеза коллекторной машины с использованием генетических алгоритмов.

3. Разработана методика построения полевых динамических моделей коллекторных электрических машин, в том числе нетиповой конструкции, ***отличающаяся*** быстродействием, характерным для цепных моделей при сохранении точности полевых моделей, а также возможностью их интеграции в модели автоматизированного электропривода, реализуемые с помощью современных имитационных комплексов.

### **Практическая значимость** результатов работы:

1. На базе MSExcel разработана управляющая подсистема САПР КМ, позволяющая интегрировать приложения и математические модели в рамках единой проектно-исследовательской среды. На данной основе разработана версия проектно-исследовательской среды КМ.

2. На базе MSExcel и библиотеки моделирования магнитного поля EMLib разработан параметрический генератор конечно-элементной модели коллекторной машины нетиповой конструкции.

3. На базе MSExcel и MatLab разработана подсистема оптимизации КМ, позволяющая формулировать и решать с использованием генетических алгоритмов задачи структурно-оптимизационного синтеза КМ.

4. На базе MSExcel и MatLab Simulink разработана подсистема формирования и анализа полевой динамической модели КМ.

5. На основе разработанной проектно-исследовательской среды проведен поиск и анализ оптимальной структуры КМ.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждается использованием апробированных методов математического моделирования, сравнением результатов расчета с результатами, полученными на апробированных моделях и экспериментальной установке.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы внедрены в производственный процесс в ООО «Трансформер» (г. Подольск), а также в учебный процесс на кафедре ИВК УлГТУ (г. Ульяновск) и на кафедре электромеханики ИГЭУ (г. Иваново).

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

**Автор защищает:**

- методику анализа и синтеза КМ нетиповой конструкции на основе использования полевых моделей на стадии оптимизации и анализа режимов работы спроектированного устройства, а также структуру проектно-исследовательской среды, позволяющей решать задачи анализа и синтеза КМ.

- параметрический генератор конечно-элементной модели магнитного поля КМ нетиповой конструкции;

- оптимизационную модель, позволяющую решать задачи структурно-параметрического синтеза КМ с использованием полевых расчетов;

- быстродействующую полевую динамическую модель КМ, реализованную средствами современных имитационных пакетов.

**Личный вклад автора** состоит в разработке математического аппарата параметрического генератора полевой модели КМ, оптимизационной и полевой динамической модели КМ, в разработке структуры проектно-исследовательской среды для решения задач анализа и синтеза КМ, в участии в разработке и отладке программного обеспечения проектно-исследовательской среды, в частности, параметрического генератора полевой модели КМ нетиповой конструкции, подсистемы структурно-параметрической оптимизации КМ, подсистемы формирования полевой динамической модели и анализа режимов работы КМ, управляющей подсистемы САПР КМ, а также в проведении численных экспериментов и разработке рекомендаций по совершенствованию конструкции КМ.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на конференциях: «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)» (XXVI международная конференция, МЭИ,

г. Москва, 2018 г.); «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров» (Международная научно-практическая конференция, ПГТУ, г. Пенза, 2016 г.); «Актуальные проблемы информатизации науки и производства» (XIII Международная научно-практическая конференция, ВУиТ, г. Тольятти, 2016 г.); «Эффективные системы менеджмента: качество, инновации, устойчивое развитие» (VI Международный научно-практический форум, г. Казань, 2017 г.); «Современное состояние, проблемы и перспективы энергетики и технологии в энергостроении» (Международная научно-техническая конференция XIX Бенардосовские чтения, г. Иваново, ИГЭУ, 2017 г.); 18-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям (ИГЭУ, г. Иваново, 2018); 10-я Международная конференция по системам электропривода (ICERPDS, г. Новочеркасск, 2018); «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, г. Москва, МЭИ, 2017 г.); на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия» (г. Иваново, ИГЭУ, 2017, 2018 гг.); «21 century: fundamental science and technology X Proceedings of the Conference (заочная конференция, н.-и. ц. «Академический», North Charleston, USA, 2016 г.).

**Публикации.** По результатам работы опубликованы 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 13 статей в периодических изданиях, сборниках статей и материалов конференций, 2 тезисов докладов, 1 учебное издание, 1 свидетельство на программный продукт.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 118 наименований, и приложения. Основная часть работы изложена на 128 страницах и содержит 61 иллюстрацию.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы анализа и синтеза КМ, в частности, особенности конструкции КМ, средства автоматизации проектирования, численные модели, используемые для решения задач и синтеза КМ. Особое внимание обращено на моделирование магнитного поля, методы оптимизации, модели режимов работы КМ, в том числе, основанные на результатах полевых расчетов.

Подчеркнуто, что учет особенностей неподвижного относительно индуктора магнитного потока может привести к эффективным нетиповым решениям, для которых отсутствуют апробированные инженерные методики расчета. Выход в таких случаях ищется в использовании моделей магнитного поля. Дан обзор систем инженерного анализа (CAE), используемых в качестве инструментальной базы при проектировании КМ, позволяющих осуществить расчет физических полей и цепей, чаще всего, методом конечных элементов. В частности, в области электромеханики особую популярность в России приобрели такие CAE-системы, как ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, ElCut. Подобные системы позволяют решить практически весь спектр задач проектирования, предоставляя удобный интерфейс и средства программирования для автоматизации построения и расчета моделей, в том числе для имитации режимов работы электрических машин. Главным недостатком подобных моделей является значительное время расчета переходных процессов.

Принято решение использовать в качестве основы проектной среды табличный процессор MSExcel, который интегрируется с математическими пакетами, расширяющими его функционал, такими как MatLab или его свободно распространяемый аналог SciLab, а также со свободно распространяемыми библиотеками расчета физических полей, такими как EMLib (разработка ИГЭУ).

Так, библиотека EMLib представляет собой DLL, поставляющую в среду программирования Visual Basic for Excel, функции для построения, расчета и анализа результатов расчета квазистационарного магнитного поля электрических машин в нелинейной 2D-постновке. Это позволяет разрабатывать макросы Excel для автоматизации специфических проектных процедур, а также для создания комбинированных моделей, в которых результаты расчета магнитного поля играют вспомогательную роль.

Для решения задачи синтеза КМ осуществлен анализ проблемы поиска оптимального решения при проектировании электрических машин. Для этого математические пакеты предоставляют специальные средства. Например, пакет MatLab предоставляет библиотеку оптимизации с использованием математического аппарата нелинейного программирования Optimization toolbox и библиотеку методов направленного случайного поиска Global Optimization Toolbox. Аналогичные средства предоставляет и пакет SciLab. Для учета специфических особенностей целевых функций, характерных для электромеханики (многоэкстремальный, овражный и дискретный характер целевой функции), наилучший эффект дают генетические алгоритмы в комбинации с методами направленного поиска.



Для решения задачи анализа КМ рационально использовать имитационные модели MatLab Simulink SimPowerSystems и SciLab Xcos.

В случае машин нетиповой конструкции необходимо переходить к полевым динамическим моделям (ПДМ). САЕ-системы позволяет решить данную задачу, однако время расчета нестационарных полей не позволяет использовать эти модели в режиме имитации эксперимента.

Быстродействующую ПДМ, в которой учтены особенности конструкции магнитной системы КМ, можно создать на основе серии предварительных расчетов магнитного поля с последующей сплайновой аппроксимацией зависимостей потокоцеплений обмоток  $\Psi_k$  от токов в обмотках  $i_j$  и угла поворота якоря  $\alpha$ . Обобщенный математический аппарат ПДМ КМ строится на основе разложения

$$\frac{d\Psi_k}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_k}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^n L_{kj} \frac{di_j}{dt} + C_k \frac{d\alpha}{dt}, \quad (1)$$

где  $L_{kj}$  – взаимная индуктивность  $k$ -го контура с током  $j$ -го контура;  $C_k$  – коэффициент ЭДС вращения, наводимой в  $k$ -м контуре.

Это позволяет привести систему уравнений динамики КМ к виду

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \{i\} = \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial i} \right]^{-1} (\{u\} - [R] \{i\}) + \left\{ \frac{\partial \Psi}{\partial \alpha} \right\} \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_b) \end{cases} \quad (2)$$

где  $\{\Psi\}$  – вектор потокоцеплений обмоток;  $\{u\}$  – вектор напряжений;  $[R]$  – матрица сопротивлений;  $\{i\}$  – вектор токов;  $\omega$  – частота вращения;  $J$  – момент инерции на валу машины;  $M_b$  – момента на валу КМ.

Одной из задач данной диссертации является развитие данного подхода к моделированию динамического режима КМ и адаптация ПДМ к современным имитационным пакетам, что позволило бы использовать точные ПДМ КМ при моделировании электроприводов.

**Во второй главе** приведены результаты разработки и апробации оптимизационной модели для решения задачи синтеза КМ. Структура оптимизационной модели КМ приведена на рис. 1. Ядром данной модели является модуль параметрического генератора конечно-элементной модели (ПГ КЭМ) магнитного поля КМ по заданному набору входных параметров, определяющих конструктивное исполнение машины, а также модуль расчета данной модели, передающий результаты расчета в модуль формирования целевой функции.



Рис. 1. Структура оптимизационной модели КМ

Решатель подсистемы оптимизации представляет собой разработанный в ИГЭУ VBA-макрос, реализующий генетический алгоритм, основанный на островной модели с несколькими параллельно развивающимися популяциями в комбинации с методом Нелдера-Мида, более точно доводящим найденное решение до оптимума.

На каждом шаге оптимизации осуществляется обращение к ПГ КЭМ КМ, который полностью перестраивает конечно-элементную модель (КЭМ) машины и рассчитывает магнитное поле, обеспечивая широкий набор исполнений индуктора КМ, необходимый для решения задачи структурно-параметрического синтеза.

Для этого осуществлена декомпозиция расчетной области КМ с выделением множеств типовых фрагментов модели

$$\mathbf{F} = \{ \tilde{\mathbf{F}}_i \mid \tilde{\mathbf{F}}_i = \{ \tilde{\mathbf{T}}_i \subset \mathbf{T}, \mathbf{I}_i \subset \tilde{\mathbf{T}}_i, \tilde{\mathbf{P}}_i \subset \mathbf{P}, \tilde{\mathbf{R}}_i \subset \mathbf{R} \}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{T}$  – множество опорных точек, заданных координатами;  $\mathbf{P}$  – множество графических примитивов (отрезков и дуг), опирающихся на данные точки;  $\mathbf{R}$  – множество замкнутых подобластей, занятых однородной средой;  $\mathbf{I}$  – множество интерфейсных точек для стыковки фрагментов.

Каждый фрагмент модели может состоять из более мелких фрагментов. Например, пазы статора и ротора разбиваются на четыре зоны, для каждой из которых предлагается несколько исполнений (рис. 2).

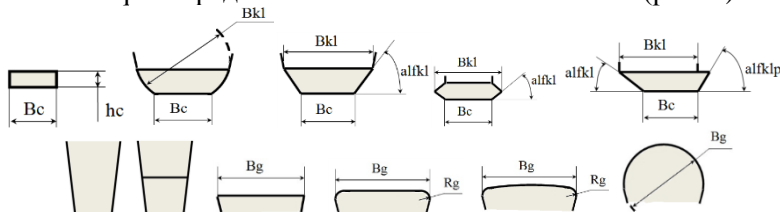


Рис. 2. Варианты исполнений элементов пазов статора и ротора

Отдельные фрагменты модели стыкуются друг с другом по вертикали и по горизонтали посредством интерфейсных точек. Произвольная комбинация фрагментов позволяет получить с помощью разработанного ПГ КЭМ несколько десятков тысяч исполнений КМ, включая типовые и нетиповые варианты конструкции. На статоре автоматически формируются однослойные или двухслойные обмотки (последовательная и параллельная обмотки возбуждения (ОВ) компенсационная обмотка (КО) и обмотка добавочных полюсов (ОДП)). На якоре формируется двухслойная равносекционная волновая обмотка (ОЯ) и коллектор со щетками, позволяющие осуществлять автоматическую коммутацию секций при повороте якоря. Некоторые варианты моделей КМ приведены на рис. 3.

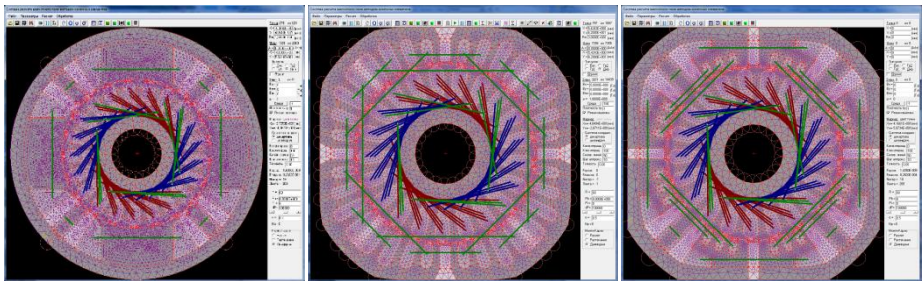


Рис. 3. Варианты исполнения явнополюсной КМ, созданные ПГПМ

В отличие от ANSYS Maxwell RMXprt все варианты, в том числе нетиповые, могут быть построены одним ПГ КЭМ, что позволяет использовать его при структурно-параметрической оптимизации КМ.

Оптимизационная модель была апробирована на задаче оптимизации конструкции неявнополюсной КМ серии 4П. Получен вариант машины с усечением спинки статора и неравномерными пазами (рис. 4), дающий 23% экономии электротехнической стали. Допущения: равенство с исходным вариантом плотностей тока в пазах статора и индукции в зоне коммутации.

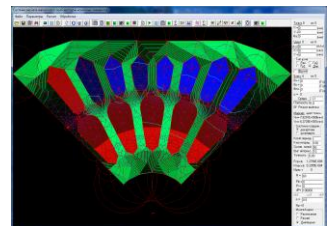


Рис. 4. Вариант машины, найденный в ходе оптимизации

В особых случаях проектировщик сам разрабатывает свой ПГ КЭМ. Например, на рис. 5 представлена модель УКД, сформированная созданным для этого ПГ КЭМ.

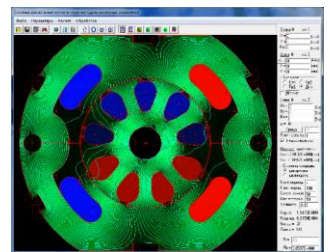


Рис. 5. Полевая модель УКД

В третьей главе приведены результаты разработки методики построения и исследования полевых динамических моделей КМ с использованием современных имитационных пакетов. В общем случае КМ со смешанным возбуждением система уравнений динамики имеет вид

$$\begin{bmatrix} L_{ff}(i_f, i_a, \alpha) & L_{fa}(i_f, i_a, \alpha) & C_f(i_f, i_a, \alpha) & 0 \\ L_{af}(i_f, i_a, \alpha) & L_{aa}(i_f, i_a, \alpha) & C_a(i_f, i_a, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \\ \alpha \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_f(t) - R_f i_f(t) \\ u_a(t) - R_a i_a(t) \\ \omega \\ (M(i_f, i_a, \alpha) - M_b) / J \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где индексы f и a относятся соответственно к цепям ОВ и ОЯ;

$$L_{pq}(i_f, i_a, \alpha) = \frac{\partial \Psi_p}{\partial i_q} \approx \frac{\Delta \Psi_p}{\Delta i_q} \Bigg|_{\substack{p=f | a \text{ \& } q=f | a \\ \mu_s = \text{const } \forall s=1 \dots N_e}} + L_p \quad (5)$$

– зависимость взаимной индуктивности p-го и q-го контуров от токов контуров и угла поворота якоря;  $L_p$  – индуктивность лобового рассеяния p-го контура ( $L_p = 0$  для недиагональных элементов);

$$C_p(i_f, i_a, \alpha) = \frac{\partial \Psi_p}{\partial \alpha} \approx \frac{\Delta \Psi_p}{\Delta \alpha} \Bigg|_{\substack{p=f | a \\ \mu_s = \text{const } \forall s=1 \dots N_e}} \quad (6)$$

– зависимость коэффициентов ЭДС вращения;  $N_e$  – количество треугольных элементов конечно-элементной сетки.

Зависимости (5) – (6) формируются в предварительной серии расчетов магнитного поля КМ при варьировании аргументов в пределах возможных изменений. На каждом шаге рассчитывается поле. Затем поочередно даются приращения аргументам и повторно рассчитывается поле в линейной постановке при полученных из нелинейного расчета значениях магнитных проницаемостей  $\mu_s = \text{const } \forall s=1 \dots N_e$  в элементах КЭ-сетки. Полученные зависимости аппроксимируются сплайнами (рис. 6) (при наличии скоса пазов зависимость коэффициентов от  $\alpha$  отсутствует).

ПДМ УКД в среде SciLab Xcos представлена на рис. 7. ПДМ КМ со смешанным возбуждением в MatLab Simulink SimPowerSystem представ-

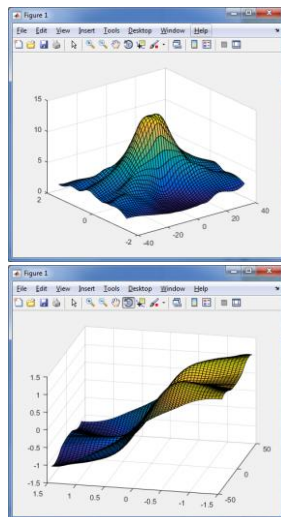


Рис. 6.  $L_{ff}(i_f, i_a)$  и  $C_a(i_f, i_a)$  с учетом скоса пазов

лена на рис. 8. Зависимости (5) – (6) использованы здесь для формирования матрицы коэффициентов в (4) на каждом шаге интегрирования.

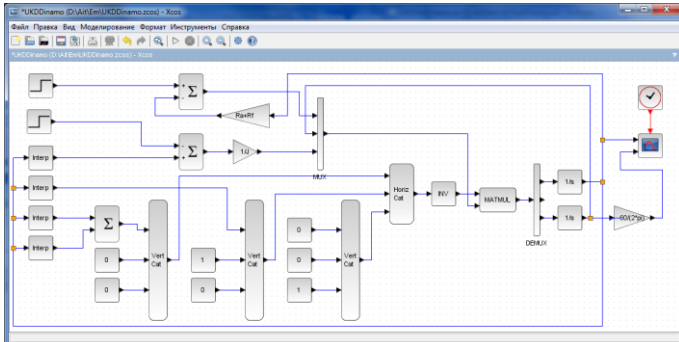


Рис. 7. ПДМ КМ с последовательным возбуждением в среде в среде SciLab Xcos

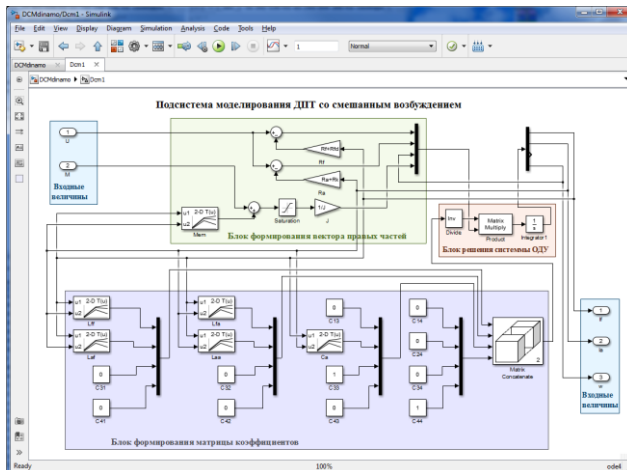
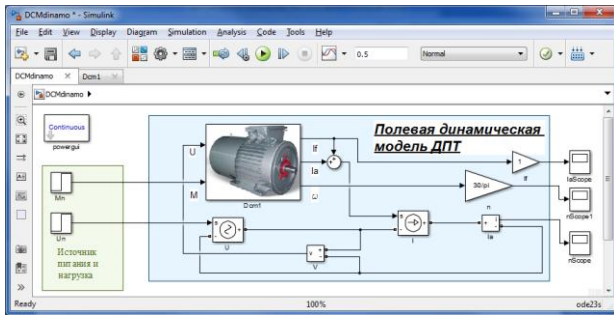


Рис. 8. ПДМ КМ со смешанным возбуждением в среде MatLab Simulink SimPowerSystem

На рис. 9 приведены результаты расчета динамики УКД на постоянном и переменном токе в сравнении с традиционными моделями. Адекватность модели была проверена на разработанной в ИГЭУ экспериментальной установке. Из рис. 9 видно, что на постоянном токе значения частоты вращения практически совпадают для упрощенных моделей и для ПДМ. Однако на переменном токе различия существенны.

На рис. 10 приведены результаты расчета динамики двигателя постоянного тока (ДПТ) серии 4П с параллельным возбуждением.

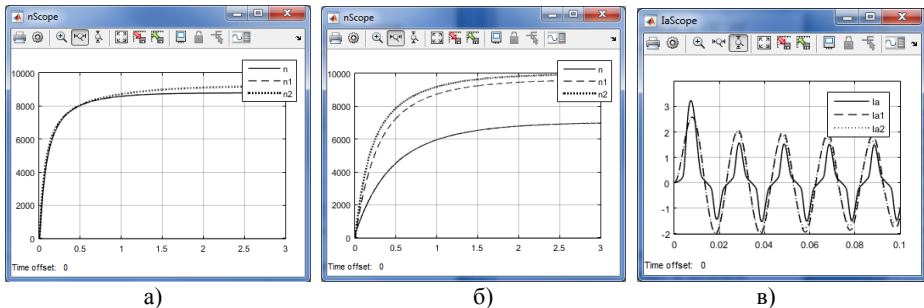


Рис. 9. Результаты расчета пуска УКД на постоянном (а) и на переменном (б, в) токе, полученные на упрощенной (точки), уточненной (пунктир) и полевой динамической модели УКД (сплошная линия): а-б)  $n(t)$ ; в)  $i_a(t)$

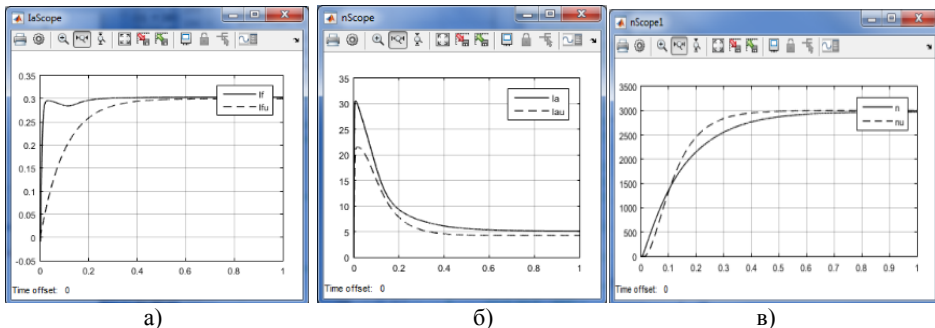


Рис. 10. Результаты пуска неявнополюсной КМ, полученные на упрощенной модели (пунктир) и полевой динамической модели (сплошная линия): а)  $i_f(t)$ ; б)  $i_a(t)$ ; в)  $n(t)$

Разработанные ПДМ КМ по скорости вычислений не уступают упрощенным цепным моделям, что позволяет использовать их при имитации систем электропривода. В то же время возможность учета особенностей конструкции машины соответствует понятию полевой модели, что позволяет использовать их при исследовании динамики КМ нетиповой конструкции. В частности, на рис. 11,а приведена оригинальная модель КМ. Анализ ПДМ показал неустойчивость ее динамики (рис. 11,б).

Именно для этих целей разрабатывалась ПДМ КМ, которая уже на стадии проектирования КМ способна выявить подобные конструкторские ошибки.

В четвертой главе представлены результаты разработки методики анализа и синтеза КМ, в основе которой лежат две разработанные модели: оптимизационная, позволяющая осуществлять структурно-параметрическую оптимизацию КМ с использованием ПГ КЭМ, и ПДМ КМ, позволяющая имитировать работу КМ нетиповой конструкции в различных режимах работы.

Методика включает в себя этапы:

1. Выбор типового аналога или его расчет по инженерной методике.
2. Построение КЭ-модели аналога.
3. Анализ вариантов конструкции КМ.
4. Формулировка и решение задачи структурно-параметрической оптимизации КМ с учетом выявленных перспектив.

5. Расчет статических характеристик КМ на полевой модели.

6. Обучение ПДМ КМ на модели магнитного поля.

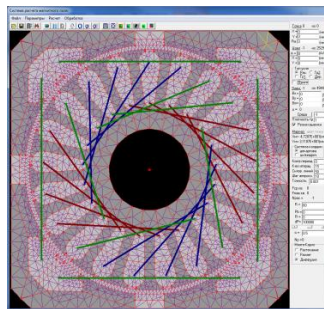
7. Исследование обученной ПДМ КМ в различных режимах работы, анализ результатов, выявление недостатков конструкции, совершенствование конструкции, корректировка КЭ-модели с учетом полученных результатов, повторное обучение и исследование ПДМ.

Структура проектно-исследовательской среды показана на рис. 12.

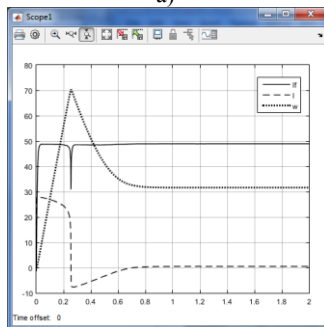
Апробация методики структурно-параметрической оптимизации КМ выполнена на примере машины серии 4П80. Целевая функция имеет вид

$$F(\vec{X}) = h_c^2 L_\delta \gamma_{Fe} + \frac{C_{Cu}}{C_{Fe}} \sum_{i=1}^{N_w} L_i q_i \gamma_{Cu} + \begin{cases} k_{\Phi \max} (\Phi - \Phi_{\max}) \forall \Phi > \Phi_{\max}, \\ k_{\Phi \min} (\Phi_{\min} - \Phi) \forall \Phi < \Phi_{\min}, \\ 0 \forall \Phi_{\min} < \Phi < \Phi_{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

$$+ \begin{cases} k_{B \max} (B - B_{\max}) \forall B > B_{\max}, \\ k_{B \min} (B_{\min} - B) \forall B < B_{\min}, \\ 0 \forall B_{\min} < B < B_{\max}, \end{cases} + \begin{cases} k_{B_{kz} \max} (B_{kz} - B_{kz \max}) \forall B_{kz} > B_{kz \max}, \\ k_{B_{kz} \min} (B_{kz \min} - B_{kz}) \forall B_{kz} < B_{kz \min}, \\ 0 \forall B_{kz \min} < B_{kz} < B_{kz \max}, \end{cases}$$



а)



б)

Рис. 11. КЭМ нетиповой ДПТ (а) и кривые пуска (б)



где  $h_c$  – расстояние от оси машины до сечения спинки статора;  $\gamma_{Fe}$ ,  $\gamma_{Cu}$  – плотность электротехнической стали и меди обмоток;  $C_{Cu}$ ,  $C_{Fe}$  – стоимость медного провода и электротехнической стали;  $N_w$  – количество обмоток статора;  $L_i$ ,  $q_i$  – длина и сечение провода  $i$ -й обмотки;  $\Phi$  – магнитный поток;  $B$ ,  $B_{kz}$  – индукция в зоне коммутации в номинальном режиме и в режиме КЗ;  $\Phi_{min}$ ,  $\Phi_{max}$ ,  $B_{min}$ ,  $B_{max}$ ,  $B_{kz\ min}$ ,  $B_{kz\ max}$  – функциональные ограничения по магнитному потоку и индукции в зоне коммутации;  $k_{\Phi\ min}$ ,  $k_{\Phi\ max}$ ,  $k_{B\ min}$ ,  $k_{B\ kz\ min}$ ,  $k_{B\ max}$ ,  $k_{B\ kz\ max}$  – весовые коэффициенты.

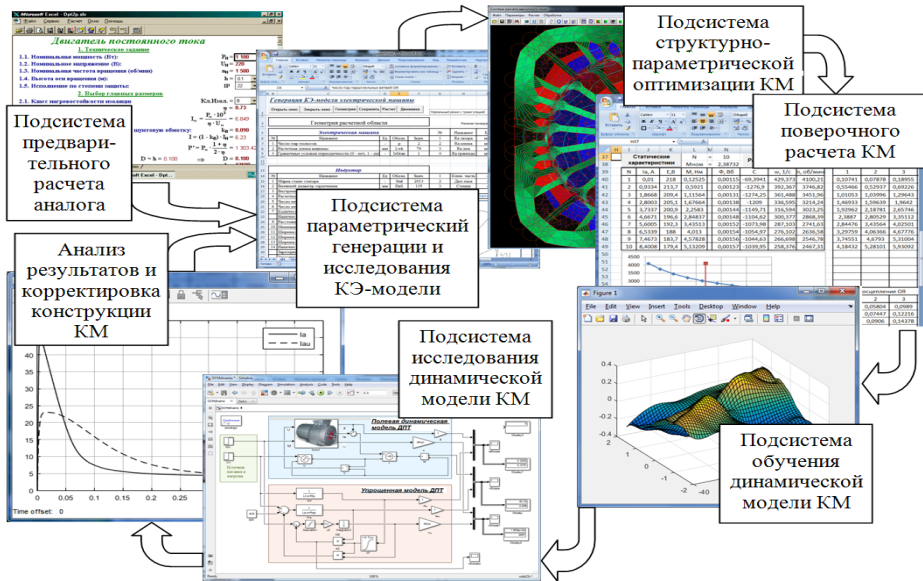


Рис. 12. Структура проектно-исследовательской среды САПР КМ

Список варьируемых параметров включает в себя: величину зазора; внешний диаметр статора; расстояние от оси машины до сечения спинки статора; ширину прорези на оси полюса; количество вырубленных и невырубленных пазов статора; ширину зубца и высоту паза статора; относительные плотности тока в пазах статора.

Допущения:

1) якорь машины не меняется по сравнению с исходным вариантом;

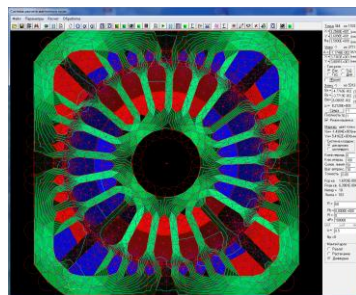


Рис. 13. Магнитное поле в номинальном режиме оптимизированной КМ



- 2) машина имеет явнополюсную конструкцию;
- 3) в межполюсном окне расположены ОВ и ОДП;
- 4) в пазах на полюсной дуге располагаются КО и ОВ в 2 слоя;
- 5) секции обмоток статора концентрические;
- 6) пазы статора неравномерные по высоте;
- 7) сечение проводов КО принималось

равным сечению провода в исходном варианте, сечение ОВ варьировалось;

8) плотности тока в пазах равны средней плотности тока в пазах статора исходного варианта.

В результате оптимизации получен вариант, дающий 39,4% экономии электротехнической стали по сравнению с аналогом и 34,9% экономии меди в обмотках статора без учета ОЯ (рис. 13). Машина имеет прорезы по осям полюсов и облегченную КО, позволяющие получить удовлетворительную коммутацию как при пуске, так и в номинальном режиме.

Кривые пуска спроектированной КМ представлены на рис. 14.

Разработанные модели и методика позволили осуществить синтез и анализ КМ нетиповой конструкции и могут быть использованы как на стадии оптимизации КМ, так и на стадии НИОКР.

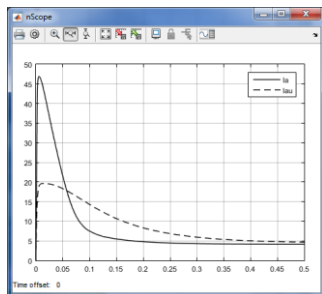
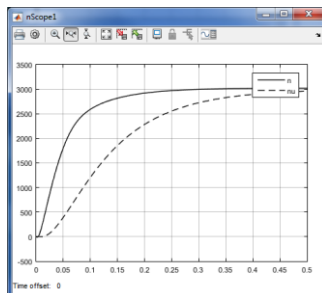


Рис. 14. Зависимость скорости и тока якоря от времени при пуске КМ (ПДМ - сплошная линия; упрощенная модель - пунктир)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Осуществлен анализ проблем автоматизации проектирования КМ. Выявлены возможности формулировки и решения задачи структурно-параметрической оптимизации КМ с использованием полевых моделей.

2. Разработана версия параметрического генератора КЭ-модели КМ, позволяющего формировать по заданному списку параметров расчетные области КМ с произвольным набором технологических элементов.

3. Разработана оптимизационная модель, позволяющая решить задачу структурно-параметрического синтеза КМ с выходом на нетиповые исполнения машины.

4. Разработана полевая динамическая модель КМ, реализуемая на базе современных имитационных пакетов и обучаемая на основе серии численных расчетов магнитного поля. Данная полевая модель по скорости расчета сопоставима с традиционными цепными моделями, что позволяет использовать ее для анализа работы КМ произвольной конструкции в системах электропривода.

5. Разработана методика анализа и синтеза проектных решений КМ, в которой впервые реализована идея структурно-параметрической оптимизации машины на основе параметрически генерируемых моделей магнитного поля с последующим имитационным анализом быстродействующей полевой динамической модели КМ произвольной конструкции.

6. Разработана структура и рабочий вариант проектно-исследовательской среды в составе САПР КМ, позволяющей реализовать достоинства новой методики анализа и синтеза проектных решений и доступной для предприятий малого и среднего бизнеса.

7. Расчетная подсистема САПР КМ опробована при решении задачи поиска оптимальной конструкции КМ.

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

1. Тихонов А.И., Гусенков А.В., Тамьярова Ю.В., Подобный А.В. Технология моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов. – Иваново: «Вестник ИГЭУ», 2016. – Вып. 6. – С. 57 – 65.
2. Семенова К.В., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Технология моделирования динамических режимов электрических машин и аппаратов на основе моделей квазистационарного магнитного поля // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С.160 – 174.
3. Тамьяров А.В., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Облегченная машина постоянного тока для авиатехники // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: 2018. – № 4(3). – Т. 20. – С. 435 – 440.
4. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин с использованием модели магнитного поля и генетического алгоритма. – Иваново: «Вестник ИГЭУ», 2018. – Вып. 5. – С. 46 – 55.

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

5. Тамьярова М.В. Оптимальная стохастическая система активной виброзащиты сложных электромеханических систем // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2011. – № 18. – С. 72 – 80.
6. Тамьяров А.В., Тамьярова М.В. Аппроксимация передаточных функций оптимальных регуляторов высокого порядка систем автоматического управле-

- ния // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. –2011. – № 17. – С. 94 – 99
7. Тамьярова М.В., Легков А.А., Тихонов А.И. Подсистема параметрической генерации и анализа конечно-элементных моделей электрических машин на основе библиотеки EMLib. – Пенза: "XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего", Серия: Технические науки. Технология производства продуктов. Информатика, вычислительная техника и управление. 05(33)/2016. – С. 121 – 125.
  8. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Создание систем инженерного анализа электромеханических устройств на базе произвольно выбранных математических пакетов / В сб.: 21 century: fundamental science and technology X Proceedings of the Conference. н.-и. ц. «Академический». 2016. – С. 137 – 139.
  9. Тамьярова М.В., Подобный А.В., Тихонов А.И. Разработка системы автоматизации экспериментальных исследований электрических машин на основе виртуального лабораторного стенда / В сборнике: Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров. Сб. статей междунар. науч.-практич. конф. / Пензенский гос. технол. ун-т. – 2016. С. 168 – 177.
  10. Подобный А.В., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Полевая динамическая модель универсального коллекторного двигателя в Simulink: Материалы двенадцатой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2017». 4 – 6 апреля 2017. Том 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – С. 38 – 40.
  11. Корнев И.А., Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Технология проектирования электрических машин с использованием библиотек моделирования магнитного поля и электрических цепей // (XIX Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – Т. 3. – с.198 – 201.
  12. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Технология проектирования энергоэффективных преобразователей электроэнергии на основе программируемых полевых моделей // В сборнике: Вопросы теории и проектирования электрических машин. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С. 257 – 273.
  13. Тамьярова М.В., Тихонов А.И., Гусенков А.В. Универсальная нелинейная полевая динамическая модель электрической машины в среде Simulink // (XIX Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – Т. 3. – С. 195 – 198.
  14. Тамьярова М.В., Тихонов А.И. Разработка технологии нового поколения для инженерных расчетов электромеханических систем / В книге: Эффективные системы менеджмента: качество, инновации, устойчивое развитие: Материалы VI Международного научно-практического форума. Под редакцией И.И. Антоновой. – Казань: 2017. – Ч. 1. – С. 373 – 377.
  15. Гусенков А.В., Тихонов А.И., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Технология инженерных расчетов электротехнических устройств с использованием автономных наукоемких библиотек Modern engineering and innovative

technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien // International periodic scientific journal. October 2018. Issue 5 / Vol. 1. – С. 42-55.

16. Тихонов А.И., Тамьярова М.В. Использование библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib в задачах анализа и синтеза электромеханических устройств. // Материалы: XXVI международ. конф. «Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования)», НИУ МЭИ. – М.: ИНФРА-М. – 2018. – С.562 – 575.
17. Tikhonov, A., Kulenko, M., Tamyarova M., Gusenkov A. Dynamic Field Model of Brushed DC Motor for Electric Drive Systems Research, ICPDS 2018 - Proceedings of 10th International Conference on Electrical Power Drive Systems ICEPDS 2018 accepted for publication in IEEE; Novocherkassk, Russian Federation; October 3-6, 2018.

#### **Тезисы докладов на конференциях**

18. Тамьярова М.В., Тихонов А.И., Гусенков А.В. Технология моделирования электротехнических систем в MatLab Simulink с использованием полевых моделей: Материалы двенадцатой международной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2017». 4 – 6 апреля 2017. Том 2 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2017. – с. 160 – 161.
19. Подобный А.А., Тамьярова Ю.В., Тихонов А.И. Динамическая полевая модель универсального коллекторного двигателя // "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика": Тезисы докладов двадцать третьей международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Том 2 – М: МЭИ, 2017 г. – с. 24.

#### **Учебные издания**

20. Тихонов А.И., Лихачева А.В., Тамьярова М.В. Исследование системы стабилизации напряжения генератора постоянного тока в среде Simulink / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2017. – 36 с.

#### **Свидетельства на программные продукты**

21. Тихонов А.И., Тамьярова М.В., Подобный А.В. Система генерации и исследований полевой динамической модели универсального коллекторного двигателя / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2019615127, дата гос. регистрации 18.04.2019.

---

ТАМЬЯРОВА Майя Владиславовна

### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ГЕНЕРИРУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 03.07.2019 г. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать плоская. Усл. Печ. л 1,16

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

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

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