На правах рукописи

ШЕВКУНОВА АНАСТАСИЯ ВЛАДИМИРОВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Электрический подвижной состав» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Петрушин Александр Дмитриевич

Официальные оппоненты: **Темирев Алексей Петрович**,
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск), профессор кафедры «Электроснабжение и электропривод»;

Карнаухов Николай Федорович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону), профессор кафедры «Робототехника и мехатроника»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится 25 апреля 2018 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=275668

Автореферат разослан «___» _____ 201__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Трудно назвать область деятельности человека, где бы не применялись электромеханические преобразователи (ЭМП) энергии. ЭМП составляют основу современного промышленного производства, используются в транспортных системах, робототехнических комплексах, в медицине, сельском хозяйстве и других областях на земле и в космосе. Постоянно возрастающие требования к динамическим, энергетическим и массогабаритным характеристикам ЭМП требуют совершенствования всех компонентов, прежде всего активных частей, участвующих в электромеханическом преобразовании энергии.

Одним из перспективных в настоящее время ЭМП является вентильно-индукторный, обладающий высокими технико-экономическими показателями. В мировой практике вентильно-индукторные электрические машины (ВИМ) в составе вентильно-индукторных электроприводов (ВИП) применяются во многих областях. Основной причиной расширения области их применения является ряд преимуществ, таких как: простота конструкции, надёжность, относительно низкая стоимость в изготовлении, а также высокие энергетические характеристики и массогабаритные показатели.

К настоящему времени выполнено достаточно много теоретических и практических исследований, посвященных улучшению технико-экономических показателей этого типа привода.

Первые работы по созданию ВИП (англоязычное название Switched Reluctance Driver – SRD) связаны с именами таких зарубежных и российских ученых как P.J. Lawrenson, T.J. Miller, R. Krishnan, Л.Ф. Коломийцев, в которых раскрыты основные преимущества и недостатки ВИП. В России дальнейшее развитие ВИП получили в трудах Н.Ф. Ильинского, В.Ф. Козаченко, М.Г. Бычкова, В.В. Кузнецова, С.А. Пахомина, Г.К. Птаха, В.В. Рымшы, А.Д. Петрушина и др.

Для того, чтобы ВИП получил более широкое практическое использование, необходимо совершенствование методов его проектирования с применением современного программного обеспечения и методов оптимизации.

Одним из центральных вопросов при проектировании является создание оптимальной геометрии активной части ВИМ, которая определяет основные ее показатели, в том числе и экономические. Известно, что выходными параметрами ВИМ, которые связывают электрическую машину и остальное технологическое оборудование, служат электромагнитный момент и частота вращения. Таким образом, актуальной является задача проектирования ВИМ из расчета получения максимального вращающего момента в широком диапазоне частот вращения при сохранении высокого значения КПД, минимальных габаритов, массы и других важных технико-экономических показателей, включая тепловое состояние электрической машины.

Степень разработанности проблемы. В настоящее время существуют различные методики проектирования ВИМ, связанные с именами таких ученых,

как R.Krishnan, T.J. Miller, T. Wichert, В.В. Кузнецов, С.А. Пахомин, Ю.А. Голландцев, В.Г. Фисенко, А.Н. Попов.

Однако существующие расчетные схемы не используют в полной мере возможности оптимизационных алгоритмов. Данная диссертационная работа направлена на совершенствование ВИМ путем разработки научно обоснованных алгоритмов проектирования с применением методов оптимизации.

Объект исследования – активная часть вентильно-индукторной электрической машины.

Предмет исследования – параметры и характеристики вентильно-индукторной электрической машины.

Целью работы является улучшение параметров и характеристик электрических машин вентильно-индукторного типа путем совершенствования алгоритмов проектирования.

Задачи исследования, которые поставлены в работе:

– совершенствование алгоритмов проектирования активной части ВИМ;

– создание программного комплекса для автоматизации проектирования активной части ВИМ с учетом методов оптимизации;

– исследование влияния фрагментов магнитной системы ВИМ на среднее значение электромагнитного момента;

– исследование восприимчивости величины среднего электромагнитного момента к изменению найденных оптимальных геометрических размеров магнитной системы ВИМ;

– проведение экспериментальных испытаний опытных образцов ВИМ и выдача рекомендаций по методике проектирования ВИМ.

Научная новизна данного диссертационного исследования заключается в следующем:

– разработаны алгоритм и программа автоматизированного проектирования с оптимизацией активной части ВИМ;

– установлена закономерность влияния отдельных геометрических элементов активной части ВИМ на формирование среднего значения электромагнитного момента при различных конфигурациях магнитных систем и количестве фаз;

– предложены научно обоснованные рекомендации, определяющие приоритет при выборе изменяемых параметров геометрических размеров активной части ВИМ при проведении оптимизационных расчетов;

– установлены зависимости величины среднего значения электромагнитного момента от изменения найденных оптимальных геометрических размеров магнитной системы ВИМ.

Теоретическая и практическая ценность диссертационной работы

Разработанные алгоритм и программа компьютерного проектирования с оптимизацией геометрических размеров активной части ВИМ позволяет повы-

сить качество проектирования, что в свою очередь дает возможность получить ВИМ, обладающую высокой конкурентоспособностью на мировом рынке.

Проведенные исследования о влиянии конфигурации магнитопровода ВИМ на величину среднего электромагнитного момента может быть использовано разработчиками ВИМ в случаях, когда в конкретном техническом задании оговорены условия и ограничения. В этой ситуации разработчик может выбрать для оптимизации только те элементы активной части магнитной системы, которые оказывают доминирующее влияние на величину электромагнитного момента. Результаты исследования по определению восприимчивости среднего значения электромагнитного момента к изменению найденных оптимальных геометрических размеров магнитной системы могут быть применены на практике для оценки влияния возможных отклонений от оптимальных размеров вследствие особенностей технологии изготовления ВИМ или наличия в техническом задании каких-либо ограничений на размеры магнитной системы.

Так, использование результатов диссертационной работы позволило предприятию ООО «САПФИР» улучшить параметры и характеристики ВИП, а также внести рациональные изменения в технологию их изготовления с целью сокращения издержек производства и эксплуатации.

Методы исследований. При решении поставленных задач применялся комбинированный подход, основанный на сочетании метода теории поля и теории электрических цепей. Расчеты магнитного поля проводились основе метода конечных элементов (программа FEMM 4.2). В качестве методов оптимизации были выбраны детерминированный метод Нелдера – Мида (деформируемого многогранника) и стохастический метод Монте-Карло.

Основными положениями, выносимыми на защиту, являются:

– алгоритм и компьютерная программа автоматизированного проектирования с оптимизацией активной части ВИМ;

– закономерность влияния отдельных геометрических элементов активной части ВИМ на формирование среднего значения электромагнитного момента при вариациях конфигураций магнитных систем и количества фаз;

– комплекс рекомендаций, направленных на процесс принятия решений по рациональному выбору геометрических размеров активной части ВИМ;

– зависимость величины среднего значения электромагнитного момента от изменения найденных в результате оптимизационного расчета геометрических параметров магнитной системы ВИМ;

– результаты экспериментальных исследований, направленных на верификацию расчетных данных по определению величины среднего момента опытного образца ВИМ.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечены:

– корректностью принятых допущений при теоретическом анализе и математическом моделировании физических процессов;

– использованием специализированного программного обеспечения;

– анализом разработанных теоретических положений и данных экспериментальных исследований, полученными на экспериментальном стенде.

Апробация. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013», РГУПС, Ростов-на-Дону, 2013;

– XI Международной научно-практической конференции «Материалы и технологии XXI века», Пенза, 2013;

– Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России», РГУПС, Ростов-на-Дону, 2015;

– Международной научно-практической конференции «Транспорт-2015», РГУПС, Ростов-на-Дону, 2015;

– Международной научно-практической конференции «Новая наука: проблемы и перспективы», Стерлитамак, 2016;

– Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электромеханики и электротехнологий», Екатеринбург, 2017.

С темой научной работы «Мировой опыт использования вентильно-индукторного двигателя и экономический эффект от оптимизации геометрии активной части вентильно-индукторного двигателя» был выигран конкурс обзоров «Я и мир 2030», организованный банком «Центр-Инвест».

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, одно свидетельство о регистрации программы.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 103 наименований. Общий объем работы составляет 150 страниц, 58 рисунков, 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, поставлена цель, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность, методы исследований.

В первой главе дано обоснование использования ВИМ (в составе ВИП) в различных отраслях промышленности, приведено описание конструктивных особенностей исследуемого объекта, принципа его действия, достоинств и недостатков. Проведен анализ областей использования ВИП и перспективы его дальнейшего развития. Также произведен краткий обзор научных работ, связанных с совершенствованием ВИМ, в частности, повышения уровня ее проектирования. На основании анализа материалов первой главы сформулированы задачи, которые решены в результате дальнейших исследований.

Во второй главе проведен анализ особенностей наиболее распространенных методик проектирования ВИМ, представлена математическая модель ВИМ и произведен выбор метода для дальнейшей оптимизации активной части. Здесь же представлено описание разработанных алгоритмов и программы для ЭВМ.

На современном этапе развития теории ВИМ стандартной и единой методики проектирования не создано. Базой для всех методик проектирования являются три основных метода: энергетический, полевой и метод, связанный с учетом переходных процессов. На основе проведенного анализа существующих методик проектирования ВИМ представляется наиболее перспективным двухэтапный подход, использующий на предварительном этапе одну из известных методик проектирования, а на завершающем этапе проводится оптимизация по заранее выбранному критерию. В данной диссертационной работе основным критерием проектирования ВИМ является величина среднего электромагнитного момента.

Расчет электромагнитного момента и других параметров ВИМ осуществлялся посредством разработанной программы «Оптимизация ВИМ», функционирующей в среде MATLAB и взаимодействующей с программой FEMM 4.2. В основе программы FEMM 4.2 лежит метод теории поля, основным инструментом которого является метод конечных элементов. Момент, действующий на ротор, определялся в программе FEMM 4.2 по результатам расчета магнитного поля ВИМ с помощью взвешенного тензора натяжения.

При математическом моделировании ВИМ приняты следующие допущения: питающая сеть способна отдать бесконечную мощность; потери в силовых ключах преобразователя отсутствуют; коммутация фаз полупроводниковыми ключами считается мгновенной; силовые ключи не имеют ограничения по частоте коммутации; взаимная индуктивность фаз не учитывается; воздушный зазор между статором и ротором равномерен и одинаков под всеми полюсами; вихревые токи и гистерезис в магнитопроводе не учитываются; катушки фазных обмоток имеют одинаковые активные сопротивления и обмоточные данные; при расчете магнитного поля (в программе FEMM 4.2) не учитываются потоки рассеяния лобовых частей обмоток, рассматриваемая область активной части ВИМ плоскопараллельна и стационарна; электротехническая сталь, из которой изготовлен магнитопровод, обладает изотропными свойствами.

Для определения динамических характеристик ВИМ были использованы известные соотношения, приведенные для случая 3-х фазного исполнения:

$$\begin{cases} \dfrac{di_1}{dt} = \dfrac{1}{L_{d1}\ i_1,\theta} \cdot \left(u_1 - i_1 \cdot R - \omega \cdot \dfrac{\partial \psi_1\ i_1,\theta}{\partial \theta} \right), \\ \dfrac{di_2}{dt} = \dfrac{1}{L_{d2}\ i_2,\theta} \cdot \left(u_2 - i_2 \cdot R - \omega \cdot \dfrac{\partial \psi_2\ i_2,\theta}{\partial \theta} \right), \\ \dfrac{di_3}{dt} = \dfrac{1}{L_{d3}\ i_3,\theta} \cdot \left(u_3 - i_3 \cdot R - \omega \cdot \dfrac{\partial \psi_3\ i_3,\theta}{\partial \theta} \right), \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{J} \cdot \left(\sum_{k=1}^{3} M_k\ i_k,\theta\ - M_c \right), \\ \dfrac{d\theta}{dt} = \omega, \end{cases}$$

где i_1, i_2, i_3 – фазные токи, А; t – время, с; L_d – дифференциальная индуктивность фазы, Гн; u – напряжение фазы, В; R – активное сопротивление фазной обмотки, Ом; ω – частота вращения ротора, рад/с; ψ_1, ψ_2, ψ_3 – потокосцепления фаз, Вб; θ – угол поворота ротора, эл. град; J – приведенный момент инерции ротора, кг·м^2; M_k – электромагнитный момент, производимый в результате работы k-й фазы, Н·м; $M_с$ – приведенный момент сопротивления на валу ВИМ, Н·м.

Зависимость электромагнитного момента в функции тока и угла поворота ротора $M_э(i,\theta)$ получена из уравнения:

$$M_э\ i,\theta = \left.\frac{\partial W'\ i,\theta}{\partial\theta}\right|_{i=const},$$

где W'– коэнергия, определяемая как часть энергии магнитного поля, которая расходуется на совершение механической работы:

$$W' = \int \psi\ i,\theta\ di.$$

Итогом расчетов были значения мгновенного электромагнитного момента в пределах полюсного деления.

В качестве методов оптимизации были выбраны последовательно используемые два метода: Монте-Карло (метод случайных вбросов) и Нелдера – Мида (метод деформируемого многогранника). Именно такое сочетание методов обусловлено возможностью объединения преимуществ и исключения недостатков каждого из этих методов, повысив тем самым вероятность получения достоверных результатов.

Метод Монте-Карло относят к стохастическим методам, при этом необходимо провести большой объем вычислений. Суть метода заключается в моделировании случайной величины с целью вычисления характеристик ее распределения. Применительно к ЭВМ используют псевдослучайные числа, получаемые в результате работы алгоритма, который предназначен для генерации этих чисел.

В основе алгоритма, базирующегося на методе Монте-Карло, лежит использование моделей возможных результатов. При создании этих моделей любой параметр, носящий характер неопределенности, заменяется диапазоном некоторых значений (распределением вероятностей). Применяя распределение вероятностей переменные могут иметь различные вероятности наступления последствий.

Для данного алгоритма было принято распределение случайной величины при равной плотности вероятности.

Блок-схема алгоритма Монте-Карло изображена на рисунке 1.

Одним из основных условий оптимизации является задание количества оптимизируемых параметров (т.е. в нашем случае геометрических размеров активной части ВИМ – n) и задание ограничений (тех размеров и параметров, которые по условиям технического задания менять нельзя $a_{1\min}\ldots a_{n\min}$; $a_{1\max}\ldots a_{nmax}$).

После того, как начальные условия сформированы, для запуска программы необходимо задать количество вычислений (*NumCalc*).

Далее, следуя алгоритму (рис. 1), в процесс вступает генератор случайных чисел, который производит случайный вброс значений параметров в заданных ограничениях по следующей формуле:

$$a = a_{\min} + (a_{\max} - a_{\min}) \cdot rand \ ,$$

где *rand* – случайное число в диапазоне от 0 до1.

На следующем этапе производится вычисление целевой функции в зависимости от вброшенных значений параметров: $ЦФ_t = f(a_{t1}...a_{tn})$. Таким образом, действия будут повторятся, пока счетчик *t* не станет больше *NumCalc*: *t>NumCalc*.

Результатом оптимизации будут являться значения оптимизируемых параметров, соответствующие экстремуму целевой функции.

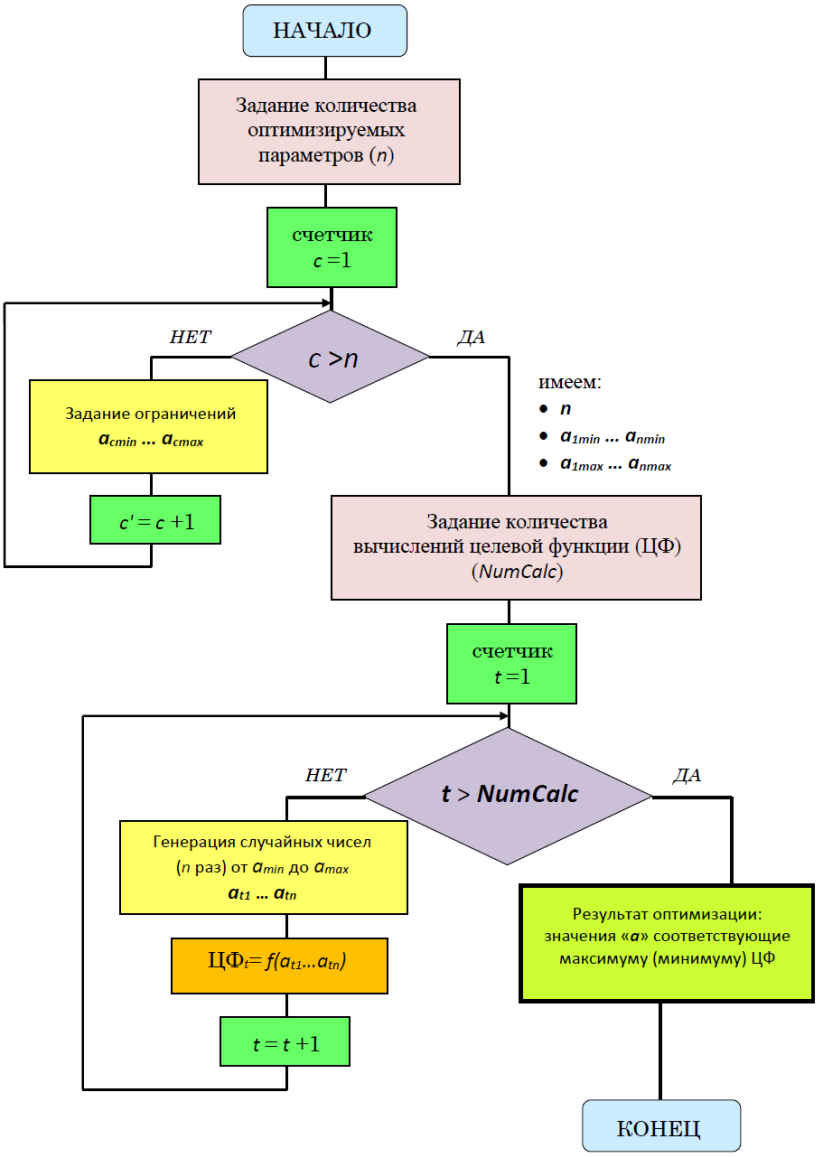


Рисунок 1 – Блок-схема метода Монте-Карло

Блок-схема метода Нелдера – Мида представлена на рисунке 2.

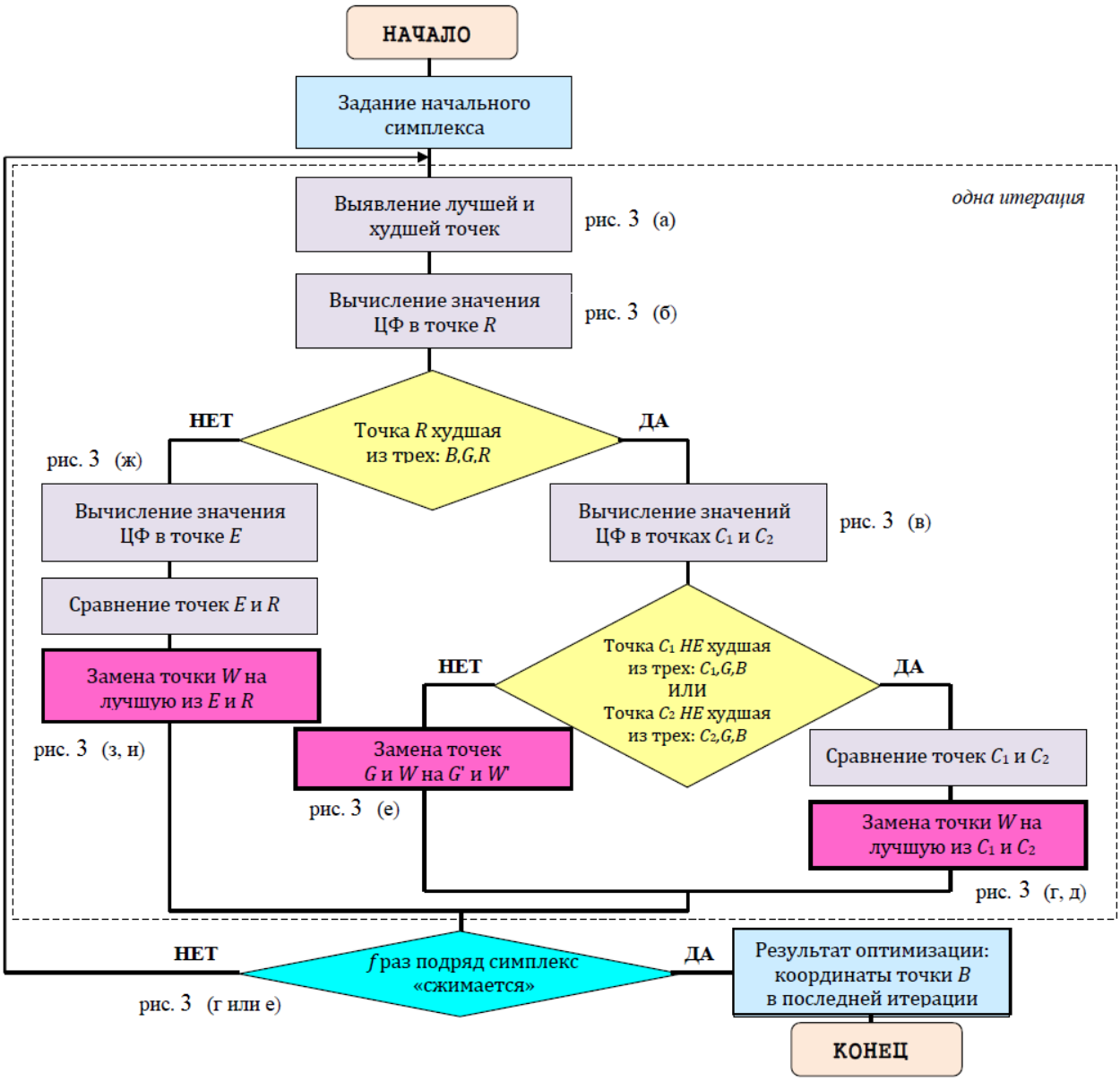


Рисунок 2 – Блок-схема метода Нелдера-Мида

Суть метода заключается в сравнении значений функции $f(x,y)$ в вершинах треугольника (рис. 3) и дальнейшем перемещении этого симплекса в направлении оптимального значения. В процессе итерационного вычисления наихудшая вершина (в которой функция принимает наибольшее или наименьшее значение) отбрасывается и заменяется новой вершиной. Таким образом, формируемый новый симплекс каждый раз уменьшается, пока не будет найден экстремум функции.

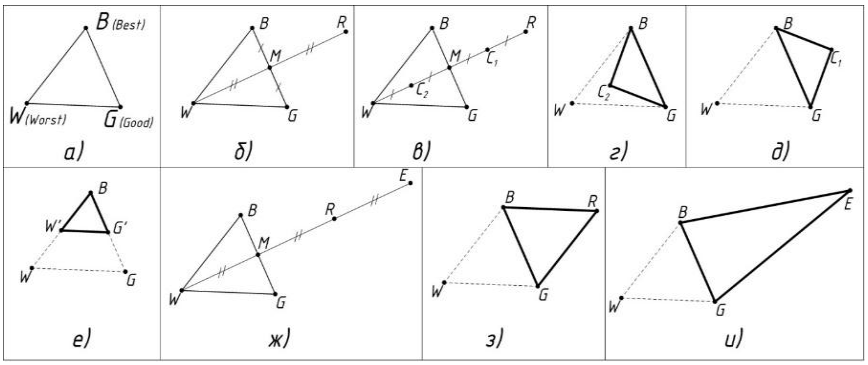


Рисунок 3 – Пояснения к нахождению оптимальной точки

Вышеизложенные алгоритмы легли в основу программы «Оптимизация ВИМ». Созданный и зарегистрированной в государственном фонде под номером 2016618039 программный продукт направлен на автоматизацию проектирования ВИД с учетом конкретного технического задания и возможностью применения оптимизационных алгоритмов. Задачей, на решение которой направлен программный продукт, является нахождение оптимальной геометрии активной части ВИД по выбранному критерию.

В результате расчета была получена зависимость электромагнитного момента от угла поворота ротора $M=f(\theta)$. Для получения среднего значения момента проводилось численное интегрирование этой кривой методом трапеций.

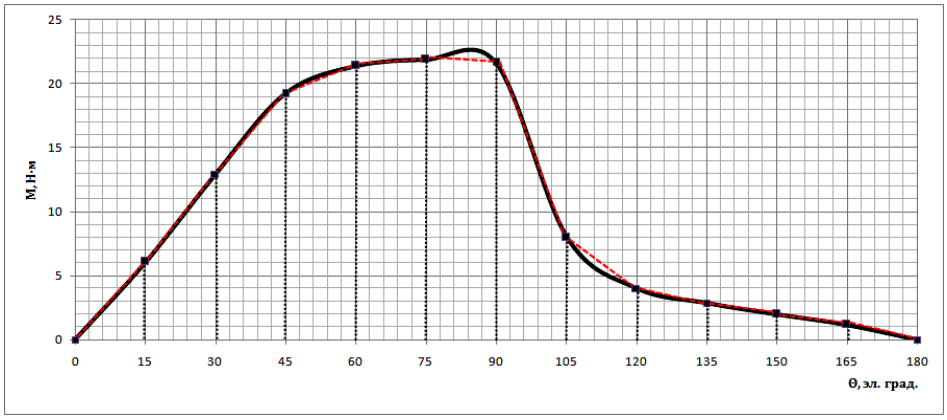


Рисунок 4 – Кривая электромагнитного момента

На рисунке 4 сплошной линией изображена расчетная кривая момента, а штриховой – аппроксимация этой кривой, с помощью которой производился расчет площади n-го участка под кривой. Формула для n-го участка выглядит следующим образом:

$$S(n) = \frac{(M_э(n) + M_э(n+1))}{2} \cdot \Delta\theta \text{ (от } n \text{ до } n+1).$$

где $S(n)$ – площадь n-го участка под кривой момента;

$M_э(n)$, $M_э(n+1)$ – значения моментов для n-го и $n+1$ участков;

$\Delta\theta$ – шаг поворота ротора, эл.град.

Среднее значение электромагнитного момента за один цикл коммутации, т.е. за 360 эл. град. находилось по следующей формуле:

$$M_{ср} = m \cdot \frac{\int_0^{360} M_э(\theta)}{360},$$

где m – число фаз;

θ – угол поворота ротора, эл.град.;

$M_э(\theta)$ – кривая зависимости электромагнитного момента машины от угла поворота ротора;

0, 360 – пределы интегрирования (от 0 эл.град. до 360 эл.град., т.е. для полного цикла работы магнитной системы).

Кривые электромагнитного момента каждой фазы одинаковы (с учетом принятых допущений), отличаются только сдвигом по координате положения ротора (θ). Кривая момента для любой одной фазы строится путем вычисления электромагнитного момента методом конечных элементов для всех положений ротора с шагом $\Delta\theta$ (эл.град.) и зависящим от параметра q:

$$\Delta\theta = \frac{180}{q},$$

где q – количество вычислений в одном расчете;

180 – период активности одной фазы, эл.град.

Для данного исследования значение q принято равным 12. Значение параметра q выбирается исходя из соображений обеспечения рационального соотношения между точностью получаемой кривой электромагнитного момента и временем расчета. Время расчета зависит в свою очередь от возможностей компьютера разработчика. Поэтому способ выбора значения q можно считать эвристическим.

С помощью данной программы проводилось исследование влияния отдельных фрагментов различных магнитных систем на среднее значение электромагнитного момента и оптимизация активной части отдельно исследуемого объекта с целью повышения его технико-экономических показателей.

В третьей главе осуществлен выбор критерия, параметров оптимизации и приведено обоснование этого выбора. Выполнено исследование влияния фрагментов магнитных систем ВИМ 6/4, ВИМ 12/8 и ВИМ 6/6 на среднее значение электромагнитного момента при работе в пусковом режиме (форма тока фаз принята близкой к прямоугольной), а также исследование трехфазной ВИМ 12/8 при работе в одноимпульсном режиме с учетом влияния насыщения участков магнитопровода на результирующий электромагнитный момент. При расчетах учитывалось, что часть времени соседние фазы работают одновременно.

Так как при изготовлении ВИМ возможны некоторые отклонения от рекомендованных размеров, обусловленных технологией изготовления, исследована восприимчивость величины электромагнитного момента к изменению геометрических размеров магнитной системы ВИМ 6/6 (в пределах ±5 %). По полученным данным выполнен анализ. Произведено выделение общих и индивидуальных особенностей результатов проведенных исследований, представлены прак-

тические рекомендации по формированию геометрических размеров магнитопровода ВИМ.

Все параметры магнитной системы ВИМ взаимосвязаны и каждый из них оказывает соответствующее влияние на формирование среднего значения электромагнитного момента. В качестве оптимизируемых параметров использованы шесть основных геометрических размеров магнитной системы ($R2r$, $b1s$, $b2s$, $b1r$, $b2r$) (рис. 5, табл. 1).

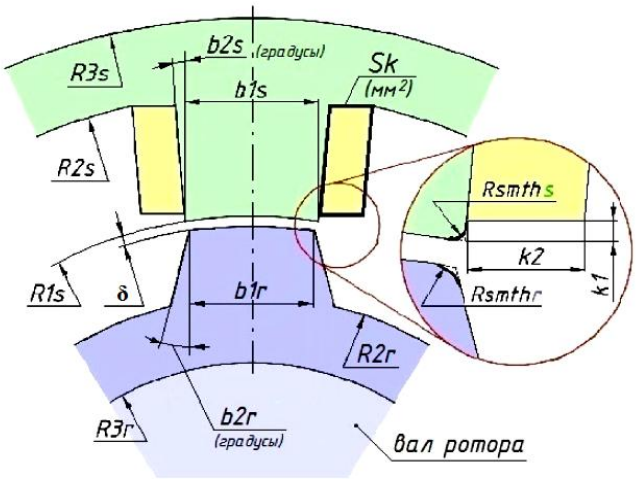


Рисунок 5 – Схема фрагмента магнитной системы ВИМ с обозначением геометрических размеров

Таблица 1 – Определение принятых символов магнитной системы ВИМ

Номер п/п	Символ	Определение символа
1	$R3s$	Внешний радиус статора, мм
2	$R2s$	Внутренний радиус статора (по пазам), мм
3	$R1s$	Радиус расточки статора, мм
4	δ	Воздушный зазор, мм
5	$R2r$	Радиус ротора по пазам, мм
6	$R3r$	Радиус отверстия под вал, мм
7	$b2s$	Угол наклона боковой поверхности зубца статора, град.
8	$b1s$	Ширина зубца статора, мм
9	$b1r$	Ширина коронки зубца ротора, мм
10	$b2r$	Угол наклона боковой поверхности зубца ротора, град.
11	$Rsmths$	Радиус сглаживания зубцов статора, мм
12	$Rsmthr$	Радиус сглаживания зубцов ротора, мм
13	$k1$	Возвышение зубца статора над катушкой, мм
14	$k2$	Ширина обмотки, мм
15	Sk	Площадь сечения обмотки, мм^2

Наряду с воздушным зазором (δ) приняты постоянными размеры обмотки ($k1$, $k2$, Sk), определяемые из условия размещения в пазовой зоне. Такие размеры двигателя как внешний диаметр статора ($R3s$), длина магнитопровода в аксиальном направлении, и диаметр вала ($R3r$) часто задаются в техническом за-

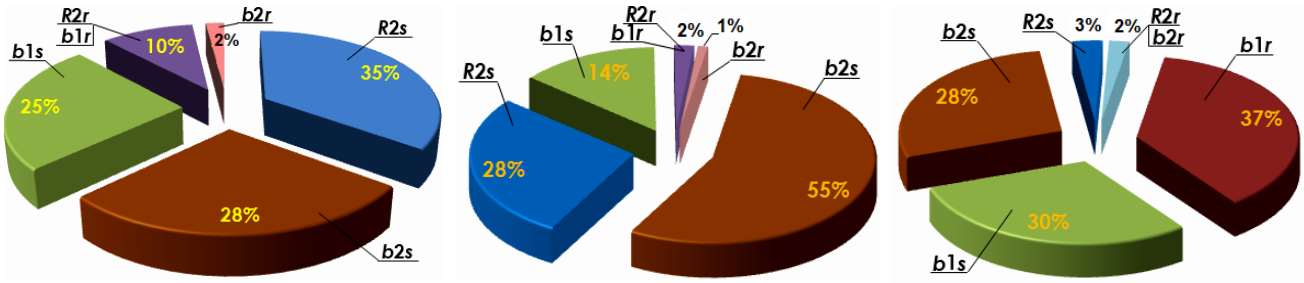
дании, так как нередки случаи, когда требуется встроить магнитную систему ВИМ в корпус асинхронного двигателя или двигателя постоянного тока. Однако, если эти размеры не определены в техническом задании, то включение их в оптимизируемые параметры в качестве варьируемых переменных также возможно в программе «Оптимизация ВИМ».

Результаты проведенных исследований ВИМ в двигательном режиме (ВИД) представлены ниже в таблице 2.

Таблица 2 – Значения среднего момента до и после оптимизации

Тип исследуемого ВИД	Исходная величина среднего электромагнитного момента	Величина среднего электромагнитного момента после оптимизации	Увеличение среднего зн. момента, %
ВИД 6/4	32,4 Н·м	38,18 Н·м	15,14
ВИД 12/8	8,8 кН·м	10,16 кН·м	13,26
ВИД 6/6	1,492 Н·м	2,143 Н·м	30,37

В результате проведенных исследований по определению влияния фрагментов магнитных систем на среднее значение электромагнитного момента двигателей различных конфигураций и количеством фаз, можно сравнить и обобщить полученные данные. На рисунке 6 представлены круговые диаграммы для трех ВИД, показывающие процентные доли, вносимые в формирование среднего значения электромагнитного момента рассматриваемыми фрагментами магнитных систем.



а) ВИД 6/4 *б*) ВИД 12/8 *в*) ВИД 6/6

Рисунок 6 – Круговые диаграммы влияния геометрических параметров на среднее значение электромагнитного момента

В результате исследования, направленного на определение чувствительности величины электромагнитного момента к изменению геометрических величин параметров магнитной системы ВИД 6/6, были получены зависимости, представленные на рисунке 7.

Полученные зависимости расположены в порядке снижения влияния изменения размеров на значение момента и подтверждают результаты, изображенные на рисунке 6, *в*.

На рисунке 8 представлены общие и частные закономерности влияния элементов активных частей ВИД рассмотренных конфигураций на среднее значение электромагнитного момента.

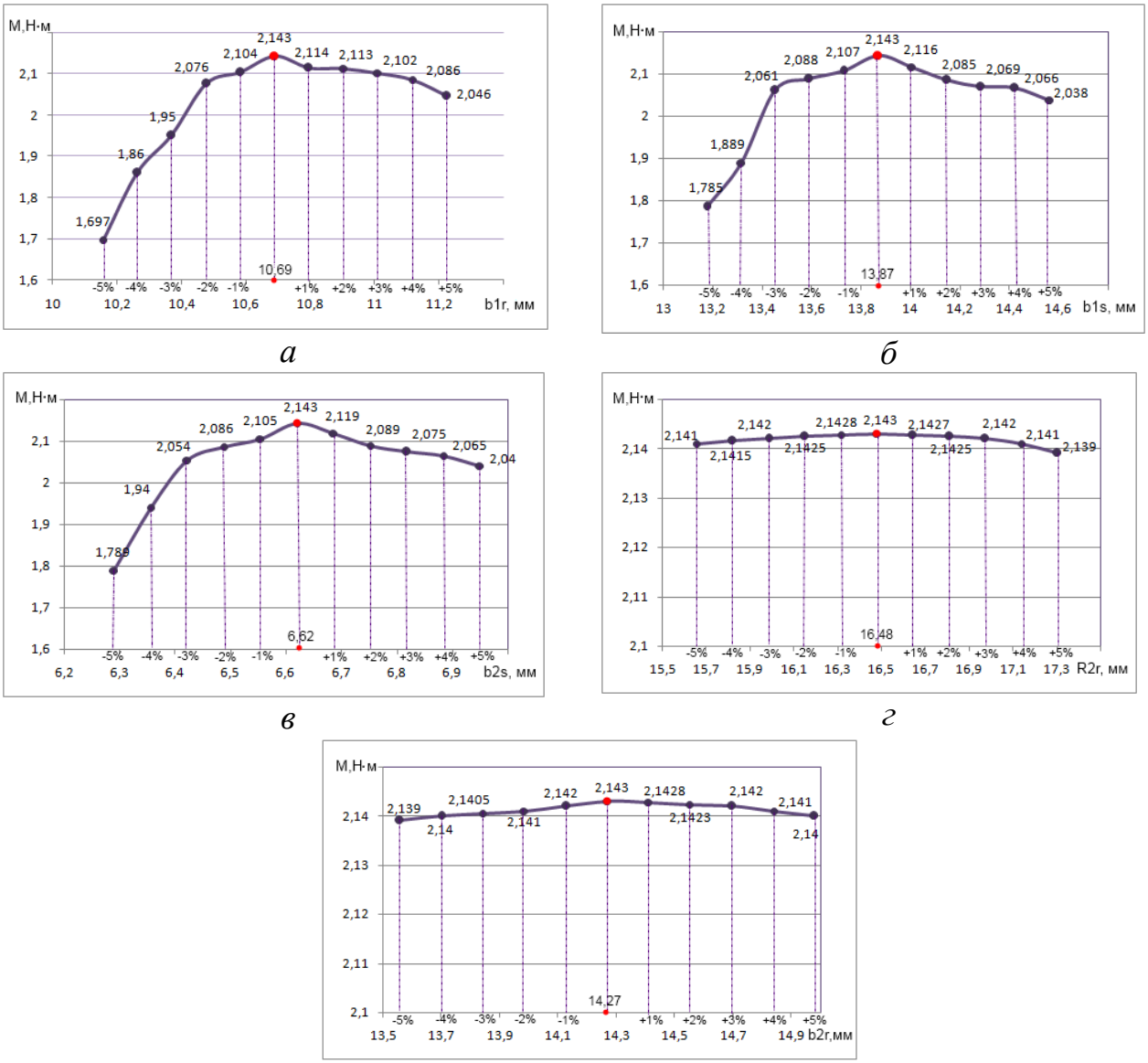


Рисунок 7 – Зависимость среднего значения электромагнитного момента от вариаций геометрических размеров магнитной системы ВИД 6/6: *а* – *b*1*r*; *б* – *b*1*s*; *в* – *b*2*s*; *г* – *R*2*r*; *д* – *b*2*r*

Следует отметить, что предлагаемый двухэтапный подход критичен к выбору метода проектирования на первом этапе: энергетического, полевого или подхода на основе расчета переходного процесса, так как на этом этапе проектируется ВИМ, параметры которой соответствуют техническому заданию, включая значение КПД и теплового состояния машины. На втором этапе в результате решения задачи оптимизации по заданному критерию определяются геометрические размеры магнитной системы ВИМ в рамках принятых ограничений. Полученный результат необходимо проверить на соответствие техническому заданию.

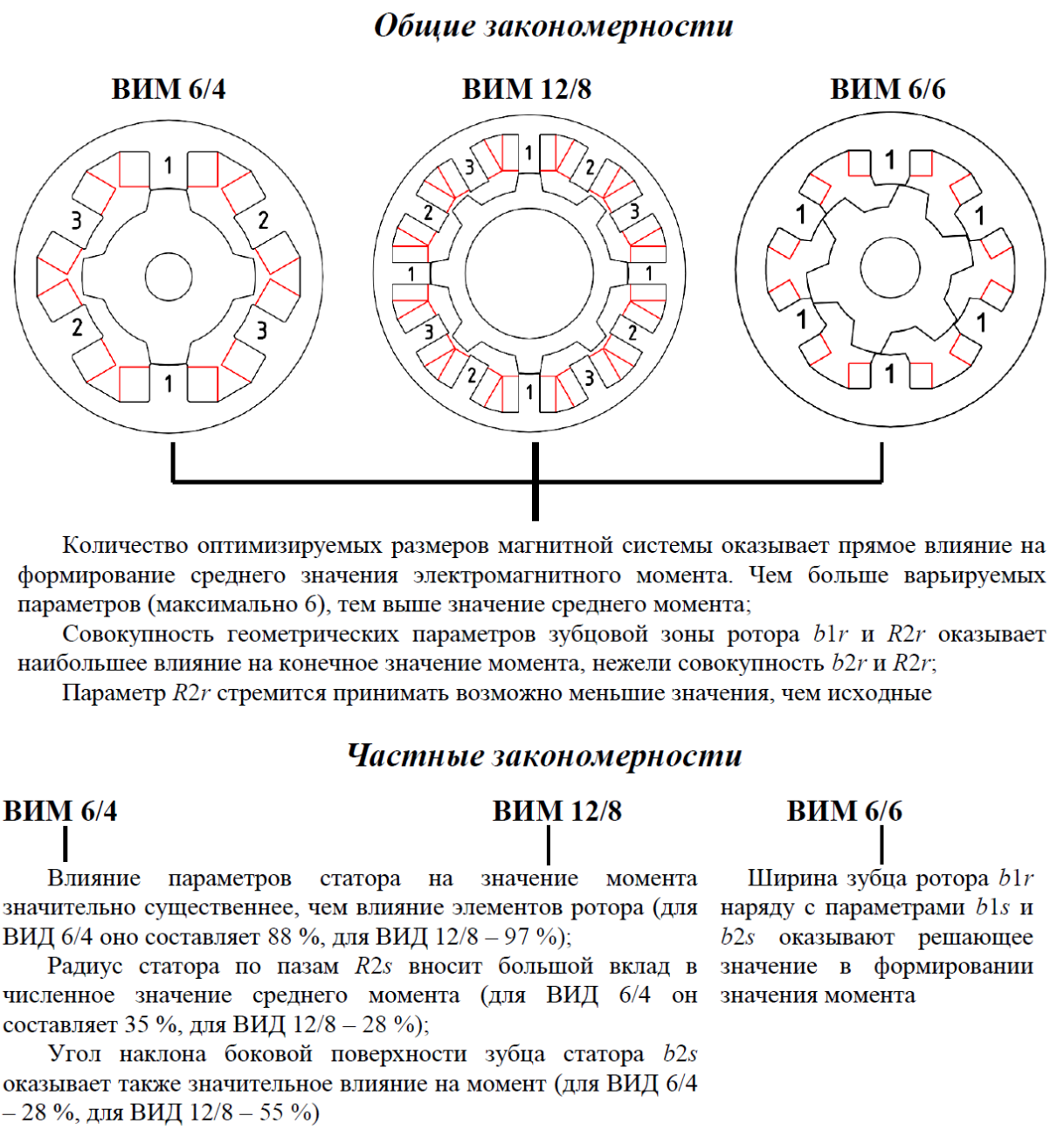


Рисунок 8 – Общие и частные закономерности влияния элементов активных частей ВИМ различных конфигураций на среднее значение момента

Анализируя полученные данные после оптимизации трех видов магнитных систем можно проследить закономерность получения значений рассматриваемых параметров и, исходя из этого, дать некоторые рекомендации по их выбору.

1. Численная величина размерного элемента *R*2*s*, как правило, принимает значения на 7,5–10,5 % меньше, полученного значения на первом этапе для ВИД 6/4, на 1,5–3,5 % и на 0,1–2,5 % меньше соответственно для ВИД 12/8 и ВИД 6/6;

2. Значение $b1s$, как правило, должно быть больше, т.е. зубец статора должен быть шире на 3,5–9 %, чем величина, полученная на первом этапе для ВИД 6/4, на 0,5–1,5 % и на 18–22 % больше соответственно для ВИД 12/8 и ВИД 6/6;

3. Параметр $b2s$ для всех рассмотренных конфигураций ВИД, как правило, должен принимать значения больше (насколько позволяет значения остальных элементов конфигурации магнитной системы), полученных на первом этапе в пределах 14–15 %для ВИД 6/4, на 4,5–5 % и на 5,5–19,5 % больше соответственно для ВИД 12/8 и ВИД 6/6;

4. Радиус ротора по пазам $R2r$как и $R2s$ должен принимать, как правило, значения меньше на 4,5–9 % для ВИД 6/4, на 0,8–4 % для ВИД 12/8 и на 6–19 % для ВИД 6/6, чем полученные на первом этапе;

5. Ширина зуба ротора $b1r$для трехфазного двигателя с конфигурацией магнитной системы 12/8 может принимать различные значения в окрестности исходной величины ± 7 %, для ВИД 6/4 этот параметр, как правило, должен быть больше на 12–20 %, чем полученный на первом этапе; Данный параметр для однофазного ВИД 6/6 оказывает существенное влияние на среднее значение электромагнитного момента (см. рис. 7, *а*) и численное значение $b1r$, как правило, должно быть больше на 13–23 %, полученного на первом этапе;

6. Угол наклона боковой поверхности зубца ротора $b2r$ для всех рассматриваемых объектов оказывает небольшое влияние на формирование значения момента, поэтому его величина может варьироваться: для ВИД 6/4 в пределах ± 27 %; для ВИД 12/8 – ± 16 %; для ВИД 6/6 – ± 25 %.

Проведенные исследования по отдельному влиянию геометрических размеров активной части ВИД на величину электромагнитного момента могут быть использованы разработчиками ВИД в случаях, когда в техническом задании на разработку включены специальные требования (например, встраиваемый вариант магнитной системы в существующую конструкцию электрической машины или какие-либо ограничения на размеры). В этих случаях разработчик может выбрать для оптимизации определенные параметры (рассматриваемые в данном исследовании), которые оказывают наибольшее влияние на формирование величины электромагнитного момента (см. рис. 6).

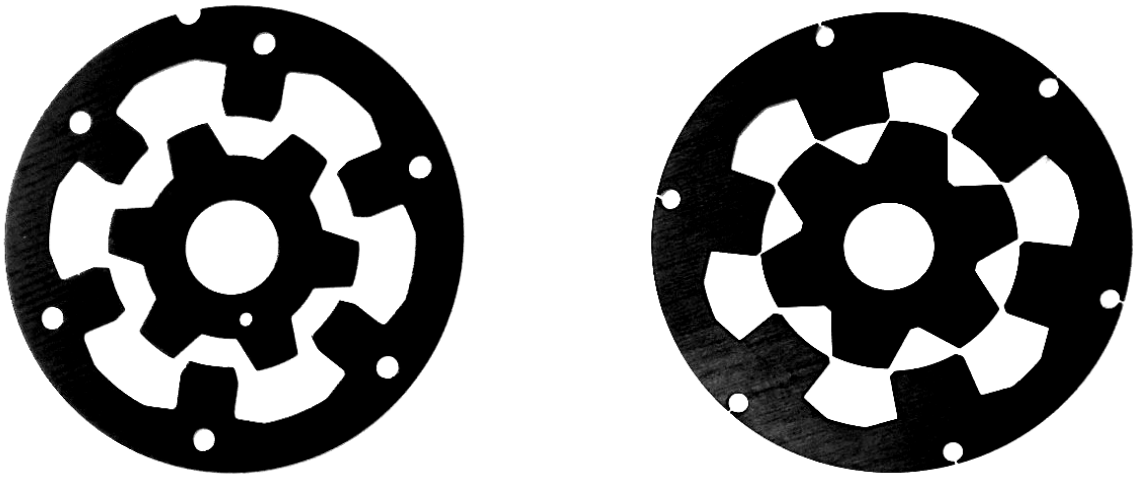
В четвертой главе проведены экспериментальные исследования ВИД 6/6 с исходной конфигурацией магнитной системы и оптимизированной с целью верификации полученных расчетных значений.

Этот двигатель был выбран по причине того, что изначально спроектирован по известной методике с использованием полевого метода, изготовлен на заводе «Горизонт» в г. Ростове-на-Дону и успешно испытан в составе вентиляторной установки (рис. 9, *а*).

а *б*

Рисунок 9 – Испытуемый ВИД с исходными геометрическими размерами:
а – в составе вентиляторной установки; *б* – в разобранном виде

На рисунке10 представлены листы магнитопроводов ВИД 6/6.



а *б*

Рисунок 10 – Листы магнитопроводов:
а – с исходной конфигурацией магнитной системы;
б – с оптимизированной конфигурацией магнитной системы

В состав испытательной установки (рис. 11) вошли: *1* – лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР); *2* – диодный мост; *3* – конденсатор; *4* – амперметр; *5* – испытуемый ВИД; *6* – энкодер; *7* – преобразователь; *8* – дисплей преобразователя; *9* – тензодатчик; *10* – весовой терминал; *11* – радиатор; *12* – рычаг.

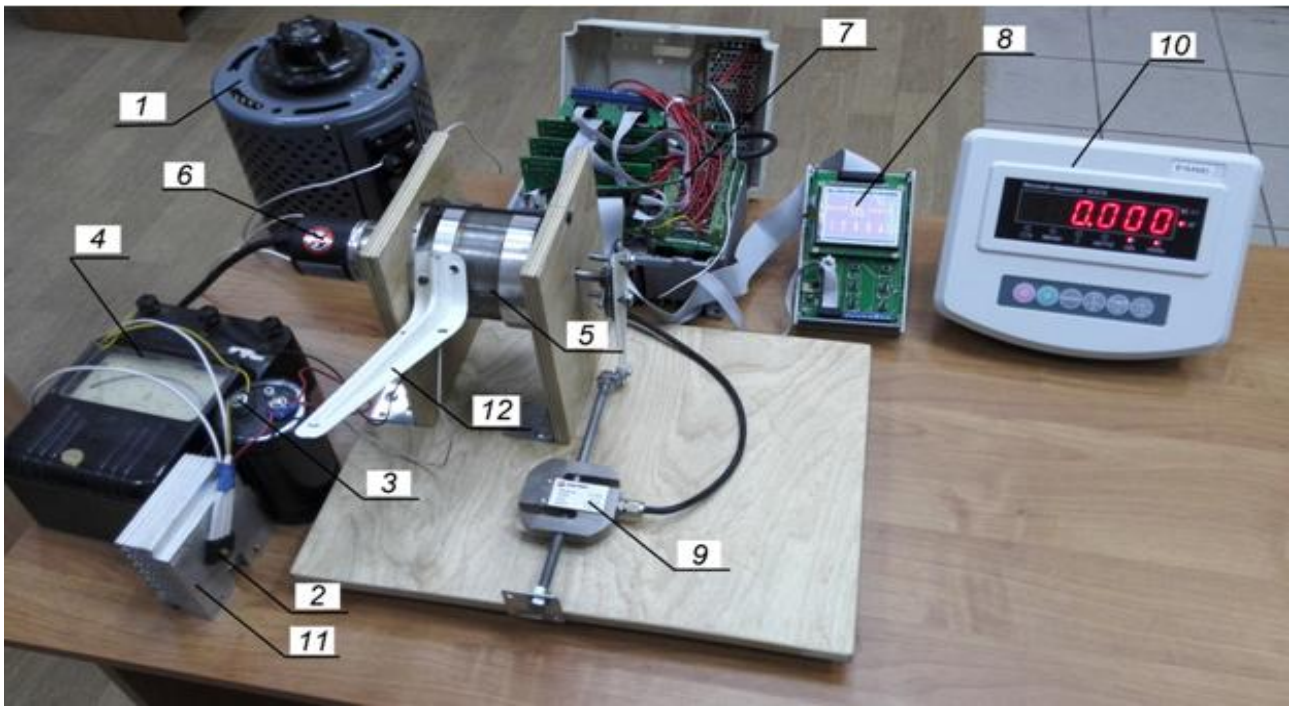


Рисунок 11 – Общий вид испытательной установки

Эксперимент проводился при разных значениях тока. Величина тока составляла 1, 2, 3 и 4 А.

Результаты экспериментальных исследований для ВИД 6/6 при токах 1 и 4 А с исходной магнитной системой представлены ниже на рисунке 12.

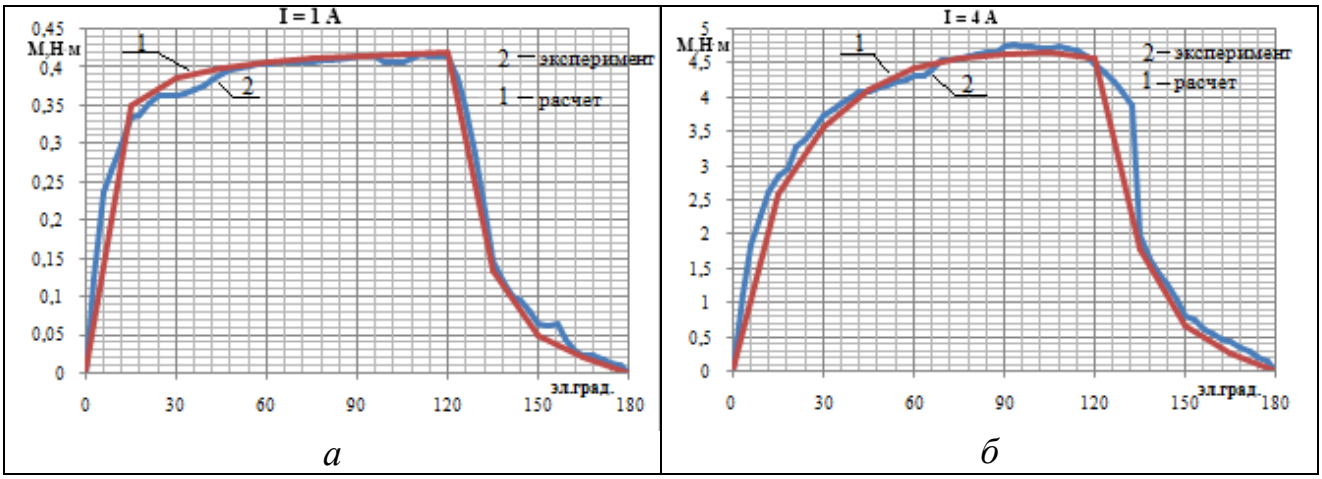
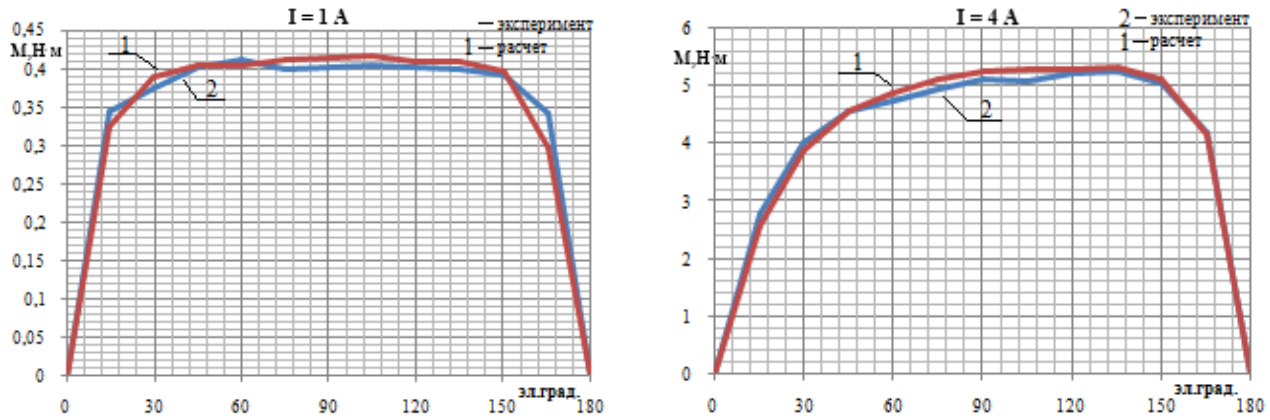


Рисунок 12– Сравнение расчетных и экспериментальных данных неоптимизированного ВИД при токах обмотки статора:
а – 1 А; *б* – 4 А

Результаты расчетных испытаний и экспериментальных для ВИД 6/6 с оптимизированной магнитной системой представлены на рисунке13.



а *б*

Рисунок 13 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных оптимизированного ВИД при токах обмотки статора:
а – 1 А; *б* – 4 А

Результаты экспериментальных исследований представлены ниже в таблице.

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований

Величина тока, А	Средние значения электромагнитного момента неоптимизированного ВИД, Н·м		Погрешность, %	Средние значения электромагнитного момента оптимизированного ВИД, Н·м		Погрешность, %
	расчет	эксперимент		расчет	эксперимент	
1	0,142	0,143	0,7	0,178	0,177	0,56
2	0,521	0,527	1,14	0,698	0,692	0,86
3	0,985	1,011	2,57	1,402	1,383	1,35
4	1,492	1,569	4,9	2,143	2,119	1,2

Как видно из таблицы 3, расхождение результатов экспериментальных исследований с расчетными данными не велико. Максимальная погрешность составила не более 4,9 %. Увеличение расчетного среднего значения электромагнитного момента составило 30,37 %, экспериментального – 35,3 %.

Следует отметить, что отклонения расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 12, 13) при ненасыщенном магнитопроводе со знаком «+» (экспериментальная кривая проходит на всех участках выше расчетной), а в насыщенном режиме наоборот со знаком «–» (экспериментальная кривая проходит в большинстве участков ниже расчетной). Это связано с отклонением магнитных свойств электротехнической стали реального магнитопровода от средних значений кривых намагничивания, публикуемых заводами изготовителями. Также причинами расхождения расчетных и экспериментальных данных могли стать вышеизложенные принятые допущения при расчетах, погрешность измерительных приборов и неучтенная сила трения в подшипниках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача по совершенствованию метода проектирования ВИМ. По итогам диссертационной работы получены результаты, на основе которых сделаны следующие выводы:

1 Усовершенствован алгоритм проектирования ВИМ. Предложено дополнить известные методики проектирования решением задачи оптимизации активной части ВИМ с помощью сочетания методов Монте-Карло и Нелдера – Мида, что позволило при относительно небольшом времени расчета получить глобальный экстремум, увеличив при этом средний электромагнитный момент ВИМ.

2 Создан программный комплекс для автоматизации проектирования с учетом оптимизации активной части ВИМ, который направлен на решение задачи по нахождению оптимальной конфигурации зубцово-пазовой зоны ВИМ по критерию максимума среднего электромагнитного момента.

3 Проведено исследование влияния фрагментов магнитной системы ВИМ различной конфигурации и с различным количеством фаз на среднее значение электромагнитного момента, которое позволило выделить как общие, так и частные закономерности изменения геометрических размеров ВИМ в результате оптимизации.

4 Исследована восприимчивость величины среднего электромагнитного момента к изменению найденных оптимальных геометрических размеров магнитной системы. Результаты исследования могут быть применены на практике для оценки влияния возможных отклонений от оптимальных размеров вследствие особенностей технологии изготовления ВИМ или наличия в техническом задании каких-либо ограничений на размеры магнитной системы.

5 Проведены экспериментальные исследования макетных образцов ВИМ с исходной конфигурацией магнитной системы и оптимизированной. Данные математического моделирования и экспериментальные результаты достаточно близки. Погрешность не превышает 5 %, что свидетельствует об адекватности алгоритма расчета и корректности принятых допущений.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в расширении возможностей программы «Оптимизация ВИМ» путем использования других критериев оптимизации и включения дополнительных оптимизируемых параметров, связанных с динамическими режимами работы ВИМ в широком диапазоне частот вращения и с ее нагрузочной диаграммой.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. **Шевкунова, А.В.** Оптимизация системы управления вентильно-индукторного двигателя для стрелочного перевода / С.Г. Буряковский, Б.Г. Любарский, Ар.С. Маслий, Ан.С. Маслий, А.В. Шевкунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 61–67; 0,75 п.л./0,19 п.л.

2. **Шевкунова, А.В.** Оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя методом Нелдера-Мида / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, А.В. Кашуба // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 83–92; 1,04 п.л./0,45 п.л.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

3. «Оптимизация ВИМ» / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова. – № 2016618039 ; Заявка № 2016615739 ; дата поступления 30.05.2016; дата регистрации 20.07.2016.

Публикации в других научных изданиях:

4. **Шевкунова, А.В.** Вопросы оптимизации геометрии активной части вентильно-индукторной машины / А.В. Шевкунова // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013». – Ростов н/Д: РГУПС, 2013. – С. 293–294; 0,12 п.л./0,12 п.л.

5. **Шевкунова, А.В.** Исследование возможности использования пакета программ OptiY для оптимизации активной части вентильно-индукторных электрических машин / А.Д. Петрушин, А.П. Пиотровский, А.В. Шевкунова // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013». –Ростов н/Д : РГУПС, 2013. – С. 208–209; 0,12 п.л./0,04 п.л.

6. **Шевкунова, А.В.** Общая характеристика вентильно-индукторных двигателей / А.В. Шевкунова // XI Международная научно-практическая конференция «Материалы и технологии XXI века». – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2013. – С. 137–139; 0,17 п.л./0,17 п.л.

7. **Шевкунова, А.В.** Выбор оптимальных значений ширины зубцов статора и ротора вентильно-индукторного двигателя / А.В. Шевкунова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 4. – С. 138–140; 0,35 п.л./0,35 п.л.

8. **Шевкунова, А.В.** К вопросу о проектировании вентильно-индукторного двигателя / А.В. Шевкунова // Труды РГУПС. – 2015. – № 2(31). – С. 117–121; 0,46 п.л./0,46 п.л.

9. **Шевкунова, А.В.** Экономический эффект от оптимизации геометрии активной части вентильно-индукторного двигателя / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 3(32). – С. 117–119; 0,23 п.л./0,18 п.л.

10. **Шевкунова, А.В.**Оптимизация геометрии зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, А.В. Кашуба // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2015. – № 1(10). – С. 27–31; 0,58 п.л./0,25 п.л.

11. **Шевкунова, А.В.**Оптимизация геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя / А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова // Труды международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России». – Ростов н/Д : РГУПС, 2015. – С. 247–249; 0,18 п.л./0,09 п.л.

12. **Шевкунова, А.В.** Проектирование вентильно-индукторной машины с применением оптимизационных алгоритмов / А.Д. Петрушин, А.В. Кашуба,

А.В. Шевкунова // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2015». – Ростов н/Д : РГУПС, 2015. – С. 243–245; 0,18 п.л./0,06 п.л.

13. **Шевкунова, А.В.** Выбор метода оптимизации для зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя / А.В. Шевкунова // Труды международной научно-практической конференции «Новая наука: Проблемы и перспективы». – Стерлитамак: РИЦ АМИ, 2016. – № 3-2(67). – С. 248–251; 0,2 п.л./0,2 п.л.

14. **Шевкунова, А.В.** Выбор оптимальных значений углов наклона боковых поверхностей зубцов статора и ротора вентильно-индукторного двигателя / А.В. Шевкунова // Труды РГУПС. – 2016. – № 2(35). – С. 100–105; 0,52 п.л./0,52 п.л.

15. **Шевкунова, А.В.** Проектирование вентильно-индукторного двигателя как узла системы регулируемого привода с применением алгоритмов оптимизации [Электронный ресурс] / А.В. Шевкунова // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016 – Т. 8. – № 4. – Режим доступа : http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN416.pdf; 1,4 п.л./1,4 п.л.

16. **Шевкунова, А.В.** Исследование влияния фрагментов магнитной системы вентильно-индукторного двигателя на среднее значение электромагнитного момента / А.В. Шевкунова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. –№ 3. – С. 116–123; 0,82 п.л./0,82 п.л.

17. **Шевкунова, А.В.** Оптимизационные расчеты и экспериментальные исследования вентильно-индукторной машины [Электронный ресурс] / А.Д. Петрушин, А.В. Шевкунова, А.В. Кашуба // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9. – №2. – Режим доступа : http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN217.pdf; 1,16 п.л./0,39 п.л.

18. **Шевкунова, А.В.** Оптимизация магнитной системы вентильно-индукторного электродвигателя при работе в одноимпульсном режиме /А.В. Кашуба, А.В. Шевкунова // Труды РГУПС. – 2017. – № 2 (39). – С. 26–31; 0,58 п.л./0,29 п.л.

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат следующие научные результаты (в квадратных скобках указаны номера работ, представленных выше): разработка алгоритма оптимизации ВИД на основе метода Нелдера – Мида [1, 2, 9, 12, 17], анализ основных методов проектирования ВИП [2] и расчет стационарного теплового поля тягового ВИД [12]. Теоретический анализ оптимизационных алгоритмов [1], лежащих в основе программы OptiY [5]. Проведение расчетных испытаний, систематизация и анализ полученных данных [1, 2, 10, 11, 12, 17, 18]. Расчет экономического эффекта, полученного за счет оптимизации геометрии ВИД [9].

Шевкунова Анастасия Владимировна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

Автореферат

Подписано в печать 2018 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 9663

Ростовский государственный университет путей сообщения.
Ризография ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. им. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2.