

На правах рукописи



Домрачева Юлия Вячеславовна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СТАТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ
БЕСПОДШИПНИКОВОЙ МАШИНЫ**

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Псков – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Псковский государственный университет” на кафедре электропривода и систем автоматизации.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Журавлёв Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»
Верещагин Владимир Петрович
кандидат технических наук,
заместитель начальника технического
управления ПАО «Силовые машины»
Антонюк Олег Викторович

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Защита состоится 22 июня 2018 года в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГАОУ ВО “СПбПУ” по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главный учебный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО “СПбПУ”: <http://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан “___” _____ 20__ г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.229.11

кандидат технических наук



Попов Максим Георгиевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Преимущества бесконтактного магнитного подвеса ротора перед традиционными опорами очевидны: отсутствие механического контакта и смазки позволяет использовать активные магнитные подшипники (АМП) там, где механические использовать не возможно (опоры роторов высокоскоростных машин и редкообслуживаемых агрегатов, работа в сверхчистых средах и вакууме и т.д.). Однако установка АМП приводит к увеличению стоимости, габаритов и энергопотребления. Для борьбы с этими недостатками разработаны различные варианты конструкции электрических машин, способных создавать не только вращающий момент, но и управляемые радиальные силы подвеса. Совмещение этих функций в одном устройстве позволяет сократить длину вала и снизить энергопотребление за счёт использования энергии привода для создания радиальных сил подвеса. В литературе такие устройства называют бесподшипниковыми электрическими машинами (БЭМ).

Идея совмещения функций привода и подвеса в одном устройстве появилась в 70х годах XX века и с тех пор были разработаны и исследованы различные виды БЭМ. Синхронная индукторная бесподшипниковая машина (СИБМ), по сравнению с другими видами БЭМ, имеет наиболее простую конструкцию: на роторе нет ни обмоток, ни постоянных магнитов. Это также даёт ей преимущество в высокоскоростных установках, в работе при высоких температурах, в сверхчистых и агрессивных средах.

Из-за сложной взаимосвязи индуктивностей обмоток с конструктивными параметрами СИБМ, для описания её электромагнитных усилий (вращающего момента и радиальных сил) используются результаты экспериментального исследования: зависимость индуктивностей от угла поворота и перемещений ротора заменяются аппроксимирующей функцией. Такое описание успешно используется в системе управления магнитным подвесом, но не позволяет рассчитать параметры конструкции машины при проектировании. Существующие методики проектирования СИБМ требуют наличия эмпирических зависимостей радиальной си-

лы от требуемого сочетания мощности привода и подвеса и предназначены только для расчёта основных размеров машины. Т.к. эмпирические зависимости будут справедливы лишь для одного соотношения параметров конструкции, такой подход сложно использовать при проектировании. Кроме того, отсутствие полного аналитического описания электромагнитных усилий СИБМ не позволяет исследовать влияние конструктивных параметров на работу системы управления машины, особенности которой должны быть учтены при выборе максимальных значений радиальной силы и вращающего момента.

Предметом исследования диссертационной работы являются статические характеристики СИБМ:

- зависимость вращающего момента и радиальных сил от токов обмоток статора, углового и радиального положения ротора, направления радиальной силы и угла нагрузки привода;

- взаимосвязь вращающего момента и радиальных сил с конструктивными параметрами СИБМ;

- влияние допущений, принимаемых при математическом моделировании, на вращающий момент и радиальные силы;

- взаимное влияние вращающего момента и радиальных сил: влияние токов обмоток подвеса на вращающий момент, влияние угла нагрузки привода на амплитуду и направление радиальной силы.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целью работы является создание аналитического описания статических характеристик СИБМ и разработка методики определения его коэффициентов по конструктивным параметрам, не требующей эмпирических данных, для использования при проектировании и описания объекта управления системы магнитного подвеса ротора. Для достижения поставленной цели должны быть выполнены следующие задачи:

1. Получение аналитического описания радиальных сил и вращающего момента, связывающего эти усилия с переменными и параметрами конструкции СИБМ.

2. Получение упрощённой математической модели СИБМ для построения системы управления.
3. Исследование влияния допущений, принятых при составлении математической модели, на сходимость результатов расчёта аналитической модели и экспериментальных данных.
4. Разработка способа учёта допущений, влияющих на статические характеристики СИБМ.
5. Исследование взаимного влияния вращающего момента и радиальных сил и разработка закона управления токами обмоток, снижающего это влияние.
6. Экспериментальное исследование статических характеристик. Сравнение результатов расчёта полученных моделей с результатами эксперимента и расчёта методом конечных элементов.

Научная новизна.

1. Получены аналитические выражения, связывающие конструктивные параметры СИБМ с выходными характеристиками.
2. Предложена упрощённая математическая модель для описания СИБМ как объекта управления системы магнитного подвеса.
3. Получен закон управления фазой тока подвеса, обеспечивающий установку заданного направления радиальной силы и независимое управление электромагнитными усилиями СИБМ.
4. Разработаны принципы построения имитационных моделей БЭМ, позволяющих исследовать влияние особенностей конструкции машин на их выходные характеристики.
5. Предложен способ учёта допущений, принятых при математическом моделировании, в аналитическом описании статических характеристик.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Аналитические выражения, связывающие конструктивные параметры машины с её выходными характеристиками необходимы для создания методики проектирования.

Структура упрощённых аналитических выражений для радиальных сил СИБМ позволяют управлять магнитным подвесом ротора по известным методикам.

Закон управления фазой тока подвеса обеспечивает установку заданного направления радиальной силы независимо от угла поворота ротора и угла нагрузки привода.

Имитационная модель модуля СИБМ позволяет исследовать взаимосвязи конструктивных параметров со статическими характеристиками, которые невозможно оценить другими методами.

Принципы построения имитационной модели могут быть использованы для получения моделей других электрических машин.

Имитационная модель может использоваться в качестве объекта управления при компьютерном моделировании системы управления.

Методология и методы исследования.

Теоретические основы и методы получения математического описания АМП и БЭМ описаны в работах Журавлёва Ю.Н. “Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение” (2003 г.) и Chiba A. “Magnetic Bearings and Bearingsless Drives” (2005 г.). Аналитические выражения для электромагнитных усилий определяются как частные производные магнитной энергии, запасённой в зазоре, по соответствующей координате. При описании индуктивностей обмоток статора используется приближённое выражение для обратной величины зазора, справедливое при малых смещениях ротора.

При исследовании влияния конструктивных параметров СИБМ на статические характеристики использовалась имитационная модель машины, в которой электромагнитные усилия рассчитывались методом виртуальных перемещений. С помощью этого исследования получены корректирующие коэффициенты, введённые в математическую модель СИБМ для учёта влияния допущений, принятых при её составлении.

Статические характеристики СИБМ исследованы экспериментально и с помощью расчёта МКЭ.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие результаты диссертационной работы:

1. Математическая модель синхронной индукторной бесподшипниковой машины.
2. Упрощённое аналитическое описание радиальных сил.
3. Закон управления фазой тока подвеса, обеспечивающий установку заданного направления радиальной силы независимо от параметров работы привода.
4. Имитационная модель СИБМ и принципы её построения.
5. Способ получения корректирующих коэффициентов для учёта основных допущений, принятых при составлении математической модели.

Адекватность математической и имитационной модели проверена сравнением результатов расчёта с МКЭ и результатами эксперимента.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты исследования диссертационной работы были представлены на девятой и десятой международных научно-практических конференциях “Окружающая среда. Технологии. Ресурсы” (Резекне, 2013, 2015), докладывались на научно-технических семинарах кафедры электропривода и систем автоматизации ФГБОУ ВО “Псковский государственный университет” и кафедры “Теоретические основы электротехники” ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”. По результатам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 5 в изданиях из перечня ВАК и 2 в изданиях, индексируемых в Skopus.

Основное содержание работы

Во введении содержатся общие сведения о диссертационной работе, актуальности темы, целях работы и методах исследования.

В первой главе рассматриваются основные особенности конструкции БЭМ, позволяющие сократить габариты и энергопотребление по сравнению с электрическими машинами с АМП. Оценены преимущества и недостатки СИБМ по сравнению с другими видами БЭМ. Рассмотрены существующие математические мо-

дели СИБМ и подходы к их исследованию. Сформулированы задачи диссертационной работы.

Уменьшение габаритов установки с полным магнитным подвесом ротора происходит за счёт того, что вращающий момент и радиальная сила в БЭМ действуют на одном и том же участке длины ротора. Кроме того, длина вала сокращается из-за уменьшения вылетов обмоток статоров.

Энергопотребление снижается за счёт того, что один и тот же магнитный поток участвует и в создании силы, и в создании вращающего момента.

В начале 90х годов были разработаны и исследованы несколько типов БЭМ: синхронная индукторная (synchronous reluctance), вентильная индукторная (switched reluctance), асинхронная (induction), с постоянными магнитами (ПМ) на поверхности ротора (surface mounted permanent magnet), со встроенными ПМ (inset permanent magnet), с утопленными ПМ (interior and buried permanent magnet) и другие. Описание их конструкций, математических моделей и структуры системы управления публиковались многими исследователями, а в 2005 году основные достижения были собраны в книге “Magnetic Bearings and Bearingsless Drives”, авторы которой одними из первых начали разработки в этой области и публиковали экспериментальные исследования бесподшипниковых машин практически всех видов.

В Псковском государственном университете (бывшем политехническом институте) начиная с 1980 года ведутся работы по созданию машин с АМП, а с 2008 года – по созданию БЭМ. В 2012 году Логиновым С.Ю. защищена диссертация на тему “Разработка конструкции, математической модели и методики расчёта бесподшипниковой индукторной машины”. Настоящая диссертационная работа выполнена в рамках НИР № 403 “Разработка основ теории бесподшипниковой синхронной электрической машины” базовой части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2014/700.

Синхронная индукторная БЭМ имеет преимущества перед другими типами машин благодаря отсутствию на роторе обмоток и постоянных магнитов. Недостатки СИБМ также связаны с конструкцией ротора: из-за явнополюсной струк-

туры часть поверхности ротора практически не участвует в создании радиальной силы. Поэтому, чтобы определить является ли выгодной замена машины с АМП на СИБМ, необходимо установить взаимосвязь величины радиальной силы и момента с такими конструктивными параметрами как ширина и высота полюса ротора и размеры шлицев пазов статора, т.к. именно они определяют, во сколько раз снизятся электромагнитные усилия по сравнению с АМП с тем же диаметром ротора.

Одна из наиболее часто используемых исследователями моделей СИБМ описана в книге “Magnetic Bearings and Bearingsless Drives”. В ней токи обмоток и индуктивности переведены во вращающуюся систему координат $d-q$, а коэффициенты для аналитического описания получены по экспериментальным данным.

Недостатком модели является отсутствие аналитического описания её коэффициентов, связывающего статические характеристики с конструктивными параметрами машины. Кроме того, из экспериментальных данных трудно выделить составляющую индуктивностей, содержащую произведение перемещений ротора x и y . Эта составляющая содержит описание возмущающей радиальной силы, зависящей от смещения ротора в перпендикулярном направлении. Из-за явнополюсной формы ротора эта часть радиальной силы может быть соизмерима с другими составляющими.

Математическая модель и примеры построения системы управления СИБМ публиковалась и в других работах, но по структуре они мало отличаются от модели, предложенной авторами вышеупомянутой книги.

Во второй главе описаны конструкция и принцип действия СИБМ, получение полной и упрощённой математической модели, вывод закона управления фазой тока повеса.

Сердечник статора СИБМ (см. рисунок 1) имеет такую же конфигурацию, как и сердечник обычной электрической машины переменного тока. Сердечник ротора имеет явнополюсную структуру. В пазы статора уложены две трехфазные распределённые обмотки: обмотка привода (А, В, С), число полюсов которой совпадает с числом полюсов ротора, и обмотка подвеса (а, b, с). В общем случае чис-

ло пар полюсов обмоток привода и подвеса должно отличаться на один. Далее рассматривается машина с четырёхполюсным ротором и обмоткой привода и двухполюсной обмоткой подвеса.

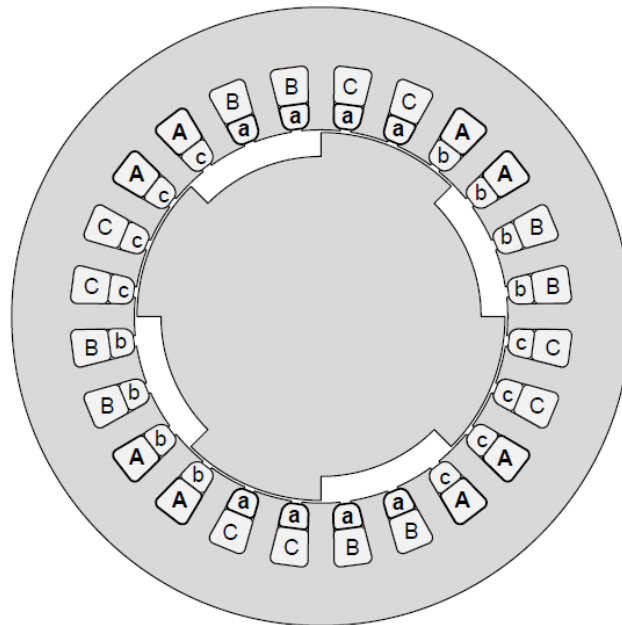


Рисунок 1 – Синхронная индукторная бесподшипниковая машина

Принцип работы привода СИБМ не отличается от обычного синхронного двигателя с реактивным ротором. Обмотка привода создаёт вращающееся магнитное поле в зазоре, в результате чего возникает вращающий момент.

Поле обмотки привода симметрично, поэтому при центральном положении ротора оно не создаёт радиальной силы. При наложении полей обмотки привода и обмотки подвеса симметрия нарушается и на ротор начинает действовать электромагнитная сила, направленная в радиальном направлении. Амплитуда и направление радиальной силы зависит от амплитуды и фазы токов в обмотках статора.

Для создания управляемой радиальной силы поля привода и подвеса должны вращаться в одну сторону. Частота тока в обмотках одинакова, поэтому скорости вращения полей различаются в два раза. При таких условиях радиальная сила не изменяет своего направления и не зависит от угла поворота ротора.

Динамика ротора машины с полным бесконтактным магнитным подвесом была описана ранее. Поэтому целью построения математической модели СИБМ является отыскание аналитических зависимостей радиальных сил и момента от

токов обмоток статора. При построении математической модели были приняты следующие допущения:

- учитывается только первая гармоника магнитодвижущей силы в зазоре,
- сталь сердечников статора и ротора не насыщена и её магнитная проницаемость равна бесконечности,
- радиальные перемещения ротора малы по сравнению с величиной воздушного зазора,
- магнитная проводимость воздушного зазора между полюсами ротора близка нулю,
- внутренняя поверхность статора гладкая (отсутствуют пазы статора),
- потери на вихревые токи и перемагничивание малы.

Радиальные силы и момент определяются как производные магнитной энергии по соответствующей координате. Полученные в результате дифференцирования магнитной энергии выражения для момента и радиальных сил были упрощены с удержанием слагаемых первого порядка малости.

$$\begin{aligned}
 M(x, y, \varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= M_0(\theta, I_4) + \tilde{M}(x, y, \varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4), \\
 F_x(x, y, \varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= F_{x0}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) + c_{xx}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) \cdot x + c_{xy}(\varphi, \gamma, I_2) \cdot y, \\
 F_y(x, y, \varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= F_{y0}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) + c_{yy}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) \cdot y + c_{yx}(\varphi, \gamma, I_2) \cdot x.
 \end{aligned} \quad (1)$$

где I_4 и I_2 – амплитуды токов привода и подвеса соответственно, φ – угол поворота ротора, x и y – смещения ротора в радиальном направлении, γ – фаза тока подвеса, θ – угол нагрузки привода.

В выражениях (1) можно выделить полезные составляющие сил и момента (не зависящие от перемещений ротора x и y) и возмущающие. Коэффициенты, стоящие перед смещениями ротора в выражениях для радиальных сил принято называть “отрицательными” позиционными жёсткостями магнитного подвеса. Составляющие уравнений (1):

$$M_0(\theta, I_4) = \frac{w_4^2 I_4^2 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{2\delta_0} \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin 2\theta, \quad (2)$$

$$\tilde{M}(x, y, \varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) = \frac{w_2 I_2 \cdot w_4 I_4 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{2\delta_0^2} \times \sin 2\alpha \cdot (x \cdot \sin(\gamma - 2\varphi + \theta) + y \cdot \cos(\gamma - 2\varphi + \theta)). \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_{x0}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= F_m(I_2, I_4) \cdot [2\alpha \cdot \cos(2\varphi + \theta - \gamma) + \sin 2\alpha \cdot \cos(2\varphi - \theta - \gamma)], \\ F_{y0}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= F_m(I_2, I_4) \cdot [2\alpha \cdot \sin(2\varphi + \theta - \gamma) + \sin 2\alpha \cdot \sin(2\varphi - \theta - \gamma)], \end{aligned} \quad (4)$$

где $F_m(I_2, I_4) = \frac{w_2 I_2 \cdot w_4 I_4 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{8\delta_0^2}$, α – угловая ширина полюса ротора.

$$\begin{aligned} c_{xx}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= c_4(I_4) \cdot [2\alpha + \sin 2\alpha \cdot \cos 2\theta] + \\ &\quad + c_2(I_2) \cdot [2\alpha + \sin 2\alpha \cdot \cos(2\gamma - 4\varphi)], \\ c_{yy}(\varphi, \theta, \gamma, I_2, I_4) &= c_4(I_4) \cdot [2\alpha + \sin 2\alpha \cdot \cos 2\theta] + \\ &\quad + c_2(I_2) \cdot [2\alpha - \sin 2\alpha \cdot \cos(2\gamma - 4\varphi)], \\ c_{xy}(\varphi, \gamma, I_2) &= c_2(I_2) \cdot \sin 2\alpha \cdot (\sin 4\varphi - \sin 2\gamma \cdot \cos 4\varphi), \end{aligned} \quad (5)$$

где $c_4(I_4) = \frac{w_4^2 I_4^2 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{8\delta_0^3}$, $c_2(I_2) = \frac{w_2^2 I_2^2 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{16\delta_0^3}$.

Из выражений для основной составляющей радиальных сил (4) получен закон управления фазой тока подвеса:

$$\gamma = 2 \cdot \varphi - \gamma_{xy} + k_2 \cdot \theta, \quad (6)$$

где $k_2 = \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{2\alpha + \sin 2\alpha}$, $\gamma_{xy} = \arctg(y/x)$ – направление смещения ротора.

На рисунке 2 приведены графики зависимости погрешности определения направления радиальной силы по закону (6) при различных смещениях ротора.

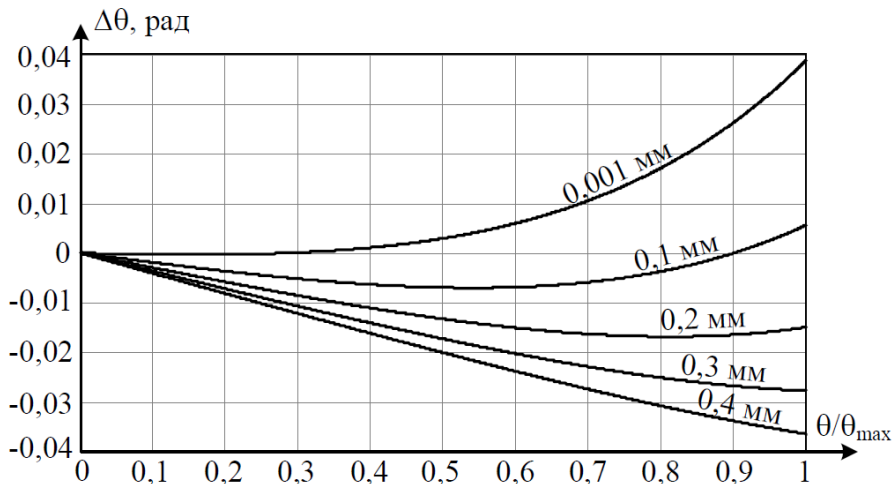


Рисунок 2 – Погрешность определения направления радиальной силы

При управлении фазой тока подвеса по закону (6) амплитуда радиальной силы не зависит от угла поворота ротора и направления смещения ротора.

Для описания объекта управления в системе управления магнитным подвесом из (1) были получены упрощённые выражения для радиальных сил СИБМ:

$$\begin{aligned} F_x(I_2, x) &= k_{x1} \cdot I_2 + k_{x2} \cdot x, \\ F_y(I_2, y) &= k_{y1} \cdot I_2 + k_{y2} \cdot y, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} k_{x1} &= \frac{w_2 w_4 I_4 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{8 \delta_0^2} \cdot [2\alpha \cdot \cos(2\varphi + \theta - \gamma) + \sin 2\alpha \cdot \cos(2\varphi - \theta - \gamma)], \\ k_{y1} &= \frac{w_2 w_4 I_4 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{8 \delta_0^2} \cdot [2\alpha \cdot \sin(2\varphi + \theta - \gamma) + \sin 2\alpha \cdot \sin(2\varphi - \theta - \gamma)], \end{aligned} \quad (8)$$

$$k_{x2} = k_{y2} = \frac{w_4^2 I_4^2 \cdot \mu_0 \cdot r \cdot l}{8 \delta_0^3} \cdot [2\alpha + \sin 2\alpha \cdot \cos 2\theta]. \quad (9)$$

Из-за сокращения части отрицательных жёсткостей, в расчёте амплитуды радиальной силы при смещении ротора по выражениям (7) возникает погрешность. На рисунке 3 показаны графики зависимости этой погрешности от угла нагрузки привода для смещений ротора до 20% от зазора (высота зазора при центральном положении ротора равна 0,45 мм). Проверка выполнена с помощью расчёта МКЭ (программный пакет FEMM 4.2).

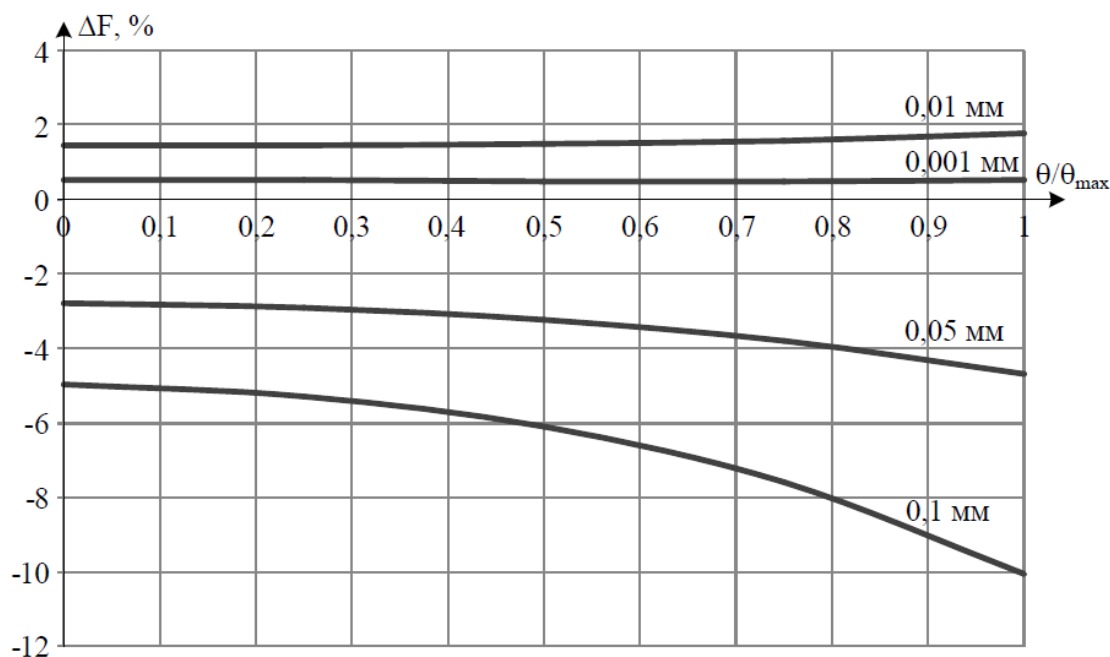


Рисунок 3 – Ошибка расчёта радиальной силы

По результатам расчёта можно сделать вывод, что ошибка в расчёте радиальной силы по упрощённой модели не превысит 10% при самых неблагоприятных условиях

Основное ограничение, касающееся использования математической модели, связано с конструкцией СИБМ. На этапе построения математической модели было задано количество полюсов ротора и обмоток статора. От этих параметров напрямую зависит структура выражений для магнитного потенциала ротора и индуктивностей обмоток. Поэтому полученную модель можно использовать только для машин с четырёхполюсным ротором и обмоткой привода и двухполюсной обмоткой подвеса.

Сложные нелинейные выражения для радиальных сил были упрощены до линейных зависимостей, имеющих ту же структуру, что и в обычных АМП. Упрощённые выражения адекватно описывают радиальные силы не во всём диапазоне изменения токов машины. В алгоритме управления должно быть предусмотрено ограничение величины тока подвеса в зависимости от амплитуды тока привода. Это требование аналогично тому, которое применяется в системах управления АМП: ток смещения составляет половину максимального тока обмоток электромагнитов. В СИБМ роль тока смещения выполняет ток обмотки привода, а максимальное значение тока подвеса определяется из требуемого соотношения МДС, создаваемых обмотками: $w_2 I_2 \leq w_4 I_4$.

Но, в отличие от АМП, коэффициенты выражений для радиальных сил остаются постоянными только до изменения параметров режима работы. При изменении тока обмотки привода, угла нагрузки или направления радиальной силы они должны быть пересчитаны.

Ещё одно ограничение использования линейной модели связано с существенной нелинейностью функции $F(I_2)$ при смещениях ротора более чем на 20% от величины зазора. Для работы при больших смещениях необходимо изменять структуру выражений для радиальной силы. Такая задача в данной работе не рассматривается.

В третьей главе описаны принципы построения имитационной модели СИБМ, исследование статических характеристик и расчёт корректирующих коэффициентов.

Допущения, принятые при составлении математической модели, влияют на результат расчёта статических характеристик. Некоторые из них можно учесть простым введением коэффициента в аналитическое описание, что существенно увеличит точность расчёта. Для исследования характера влияния каждого из допущений необходимо иметь модель СИБМ, из которой их можно исключать независимо друг от друга. По точности расчёта и детализации описания конструкции наиболее подходящим является МКЭ. Однако универсальные программные пакеты для создания и расчёта конечно элементных моделей позволяют исследовать не все допущения, принятые при моделировании СИБМ.

В третьей главе описывается построение имитационной модели СИБМ, позволяющей вводить и исключать следующие допущения:

- магнитодвижущая сила (МДС) обмоток имеет синусоидальную форму (в модели должна быть возможность формирования реальной формы МДС или заданной суммы гармоник),
- внутренняя поверхность статора гладкая (возможность введения и исключения магнитного сопротивления шлицев пазов),
- проводимость межполюсного пространства равна нулю (проводимость пространства между полюсами ротора может быть задана равной нулю),
- величина зазора рассчитывается по приближённому выражению (в модели должна быть возможность расчёта величины зазора по приближённому и по точному выражениям).

Расчёт электромагнитных усилий в имитационной модели происходит следующим образом. Воздушный зазор разбивается на элементы, длина которых равна длине активной части сердечника, а ширина равна длине дуги, опирающейся на угол $\Delta\phi$ (см. рисунок 4 а). Угол $\Delta\phi$ должен быть настолько мал, чтобы с определенной степенью точности можно было считать, что величина зазора над элементом одинакова во всех его точках.

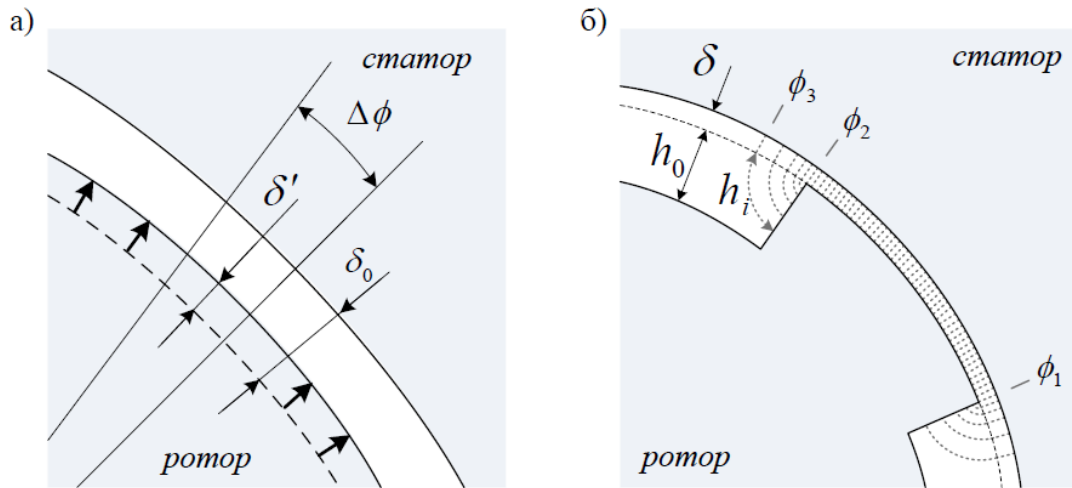


Рисунок 4 - Фрагмент воздушного зазора СИБМ

Величина зазора, в зависимости от угловой координаты ϕ и радиальных перемещений x и y , описывается следующим выражением.

$$\delta = \delta_0 - x \cdot \cos \phi - y \cdot \sin \phi = \delta_0 - \delta', \quad (10)$$

где δ_0 - величина зазора при центральном положении ротора, $\delta' = x \cdot \cos \phi + y \cdot \sin \phi$ - величина постоянная в пределах $\Delta\phi$. Для учёта магнитного сопротивления межполюсного пространства ротора или пространства шлицев пазов статора к величине зазора (10) прибавляется длина пути протекания потока до сердечника h_i , который проходит через данный элемент $\Delta\phi$ (см. рис. 4 б).

Электромагнитный момент и радиальные силы, действующие на ротор, находятся численно по следующим выражениям:

$$M = \frac{\Delta W_\phi}{\Delta\phi}, \quad F_x = \frac{\Delta W_x}{\Delta x}, \quad F_y = \frac{\Delta W_y}{\Delta y}, \quad (11)$$

где M - электромагнитный момент, F_x и F_y - радиальные силы, ΔW_ϕ , ΔW_x , ΔW_y - изменение магнитной энергии при перемещении ротора на $\Delta\phi$, Δx или Δy соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta W_\phi &= W_{\phi+\Delta\phi/2} - W_{\phi-\Delta\phi/2}, \\ \Delta W_x &= W_{x+\Delta x/2} - W_{x-\Delta x/2}, \\ \Delta W_y &= W_{y+\Delta y/2} - W_{y-\Delta y/2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Индексы магнитной энергии в (12) характеризуют положение ротора, для которого она рассчитывается. Для каждого из шести положений ротора магнитная

энергия определяется следующим образом:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (13)$$

где n - общее число элементов $\Delta\phi_i$, W_i - магнитная энергия, запасённая на участке зазора, ограниченном элементом $\Delta\phi_i$:

$$W_i = \frac{l}{2} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \Delta L_{ijk} \cdot i_j \cdot i_k, \quad (14)$$

где N - число обмоток машины, i_j и i_k - токи обмоток, ΔL_{ijk} - собственная или взаимная индуктивность обмоток, определяемая элементом зазора $\Delta\phi_i$.

$$\Delta L_{ijk} = \frac{\mu_0 \cdot \Delta\phi_i \cdot r \cdot l}{\delta_0 - \delta'} \cdot w_j \cdot w_k, \quad (15)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - магнитная проницаемость вакуума, $S = r \cdot \Delta\phi \cdot l$ - площадь элемента $\Delta\phi$, r - радиус ротора, l - длина активной части сердечника, w - число витков соответствующей обмотки.

Адекватность имитационной модели была проверена сравнением результатов расчёта индукции в зазоре, вращающего момента и радиальных сил с МКЭ. На рисунке 5 показано распределение магнитной индукции в зазоре СИБМ, рассчитанное МКЭ и с помощью имитационной модели.

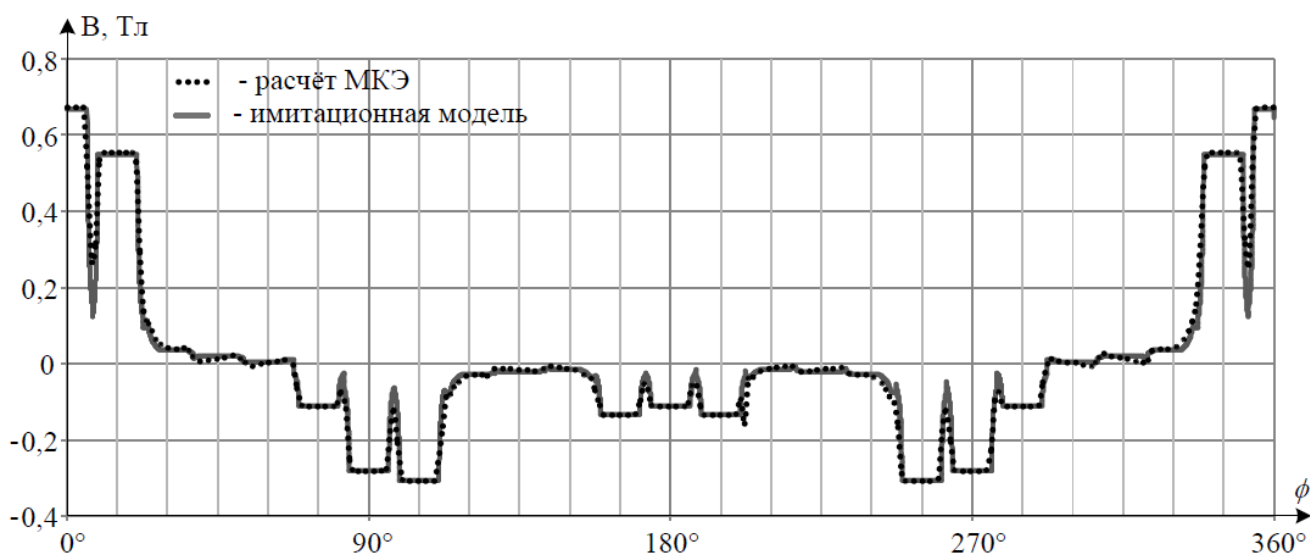


Рисунок 5 – Распределение магнитной индукции в зазоре СИБМ

Из полученных результатов можно сделать вывод, что предложенная имитационная модель обладает достаточно высокой точностью и может быть использована для расчёта статических характеристик вместо универсальной программы расчёта МКЭ.

С помощью имитационной модели были получены корректирующие коэффициенты для учёта реальной формы МДС обмоток и магнитного сопротивления пространства шлицев пазов статора и межполюсного пространства ротора. Для получения каждого коэффициента рассчитывались зависимости радиальных сил или вращающего момента от угла поворота ротора для двух случаев: 1) для реальной конструкции СИБМ; 2) для абстрактной конструкции с заданным допущением (например, при исследовании влияния магнитного сопротивления пространства шлицев, во втором случае магнитное сопротивление прорези паза приравнивается нулю). Коэффициент рассчитывается как отношение средних значений сил или моментов для реальной и абстрактной конструкции. Полученные коэффициенты использовались в расчёте статических характеристик по математической модели СИБМ.

В четвёртой главе описывается экспериментальное исследование статических характеристик СИБМ: описана экспериментальная установка, приведены результаты эксперимента, оценены погрешности измерения экспериментальных значений.

Макет СИБМ (рисунок 6) изготовлен на основе асинхронного двигателя 4А71В4. В пазы статора уложено две трёхфазные обмотки: четырёхполюсная обмотка привода и двухполюсная обмотка подвеса. Ротор изготовлен из конструкционной стали. Ширина полюса явнополюсного ротора составляет половину полюсного деления.

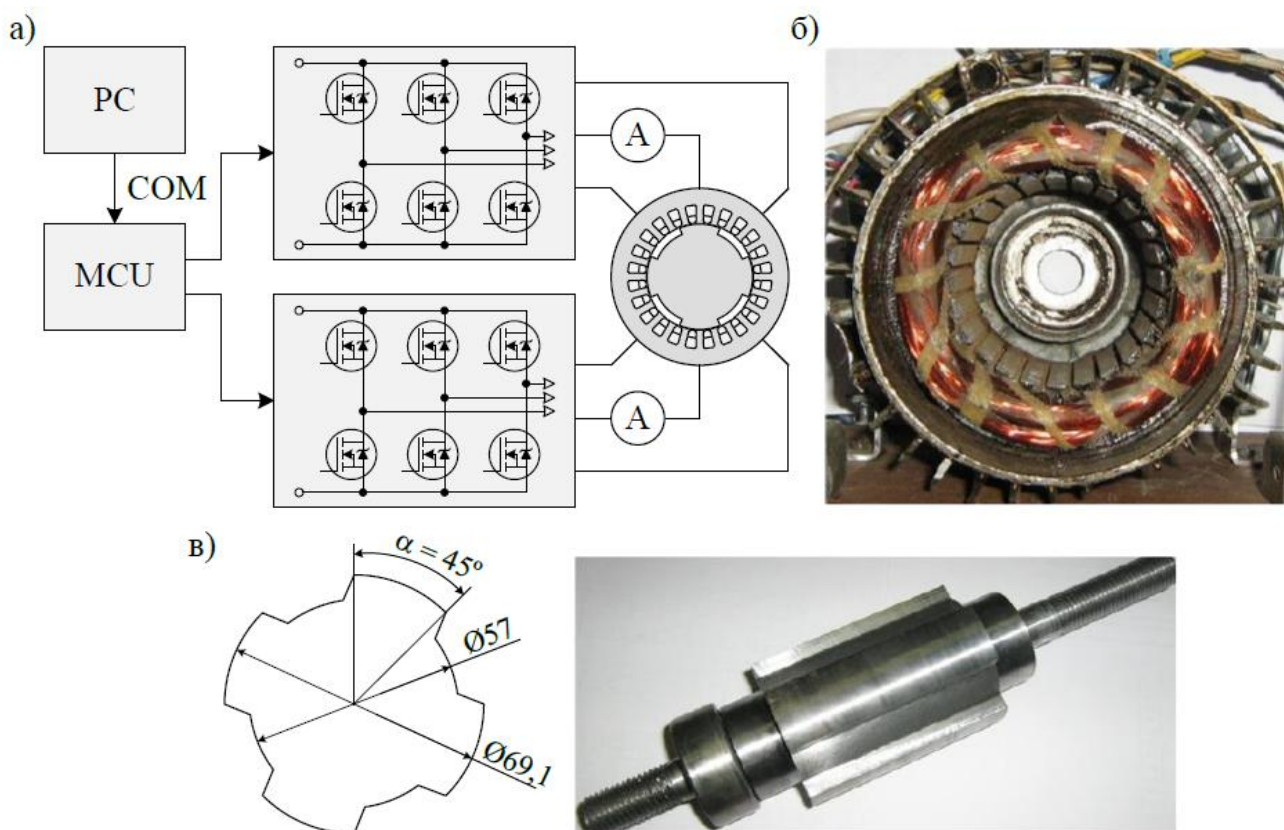


Рисунок 6 – Макет СИБМ: а) функциональная схема установки, б) внешний вид статора, в) размеры и внешний вид ротора

Токи в обмотках формировались при помощи трёхфазных усилителей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Обмотки запитывались постоянными токами, величины которых соответствовали определённой фазе трёхфазного тока. На рисунке 6 а) показана функциональная схема экспериментальной установки. Сигналы управления на усилитель поступали с микроконтроллера (MCU) через драйверы верхнего и нижнего плеча. Фаза и амплитуда токов передавалась с персонального компьютера (PC) по COM-порту.

Измерение радиальных сил и вращающего момента производилось для различных токов привода и подвеса I_4 и I_2 , смещений ротора x и y , угла нагрузки привода θ . На рисунке 7 приведены результаты измерения и расчёта радиальной силы и вращающего момента при центральном положении ротора.

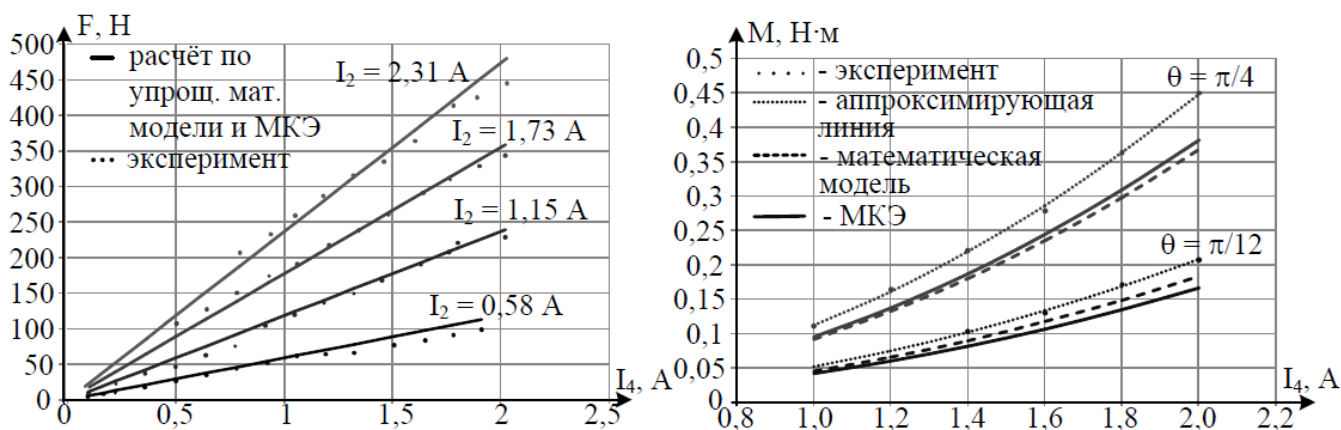


Рисунок 7 – Статические характеристики СИБМ

Расчёт радиальных сил и вращающего момента по математической модели производился с учётом корректирующих коэффициентов, полученных в третьей главе. По результатам расчётов и эксперимента определялись коэффициенты аналитической модели (7).

Результаты эксперимента подтвердили вид зависимостей (7) и (2). Точность расчёта характеристик по математической модели проверялась сравнением результатов с расчётом МКЭ. Погрешность расчёта коэффициента k_{yI} при центральном положении ротора составила доли процента, а при смещении на 20% от высоты зазора – 3,6 %.

Погрешность определения вращающего момента по сравнению с методом конечных элементов составила 10,6 %. Эта ошибка связана в первую очередь с несинусоидальной формой распределения МДС в зазоре.

В целом результаты экспериментального исследования и моделирования методом конечных элементов подтвердили адекватность математической модели. Точность расчёта по аналитическим выражениям достигнута за счёт использования корректирующих коэффициентов, полученных при помощи имитационной модели СИБМ.

Заключение

В итоге проведённого исследования получены следующие результаты:

1. Составлена математическая модель СИБМ, связывающая вращающий момент и радиальные силы с токами обмоток статора, угловым и радиальным по-

ложением ротора и основными параметрами конструкции. Адекватность модели подтверждена экспериментально и с помощью расчёта МКЭ.

2. Получены упрощённые выражения для радиальных сил СИБМ. Сформулированы условия, при которых они могут быть использованы для расчёта в пределах определённой погрешности.

3. Предложены принципы построения имитационной модели, которая позволяет исследовать влияние параметров конструкции, неучтённых при математическом моделировании, на характеристики электрической машины.

4. Составлена имитационная модель СИБМ, с помощью которой получены корректирующие коэффициенты для аналитического описания электромагнитных усилий, учитывающие особенности конструкции СИБМ. Введение корректирующих коэффициентов в математическую модель существенно повысило точность расчёта вращающего момента и радиальных сил.

5. Получен линейный закон управления фазой тока подвеса, обеспечивающий установку заданного направления радиальной силы независимо от угла поворота ротора и угла нагрузки привода.

6. Исследовано влияние тока подвеса на вращающий момент. Ток подвеса увеличивает пульсации вращающего момента и не влияет на его среднее значение.

Дальнейшая разработка темы включает создание методики проектирования и разработку системы управления СИБМ (структуры, алгоритма работы и методики расчёта параметров регуляторов).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Журавлев Ю.Н. Сферы применения и перспективы развития магнитного подвеса роторов / Ю.Н. Журавлев, С.Ю. Логинов, Ю.В. Домрачева // Газотурбинные технологии - 2011. – №2. – С. 22-26.

2. Логинов С.Ю. Сравнение габаритных показателей бесподшипниковой индукторной машины и двигателя с активными магнитными подшипниками / С.Ю. Логинов, Ю.В. Домрачева // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2012. – №2 – С. 20-24.

3. Домрачева Ю.В. Математическое моделирование модуля синхронной индукторной бесподшипниковой машины / Ю.В. Домрачева, Ю.Н. Журавлёв // Фундаментальные исследования №10. – 2013 – №10 (часть 9) – С. 1917 – 1921.
4. Domracheva Y. Simulation technique of synchronous reluctance bearingless machine / Y. Domracheva, S. Loginov // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources” (20-22 June 2013). – Rezekne, 2013. – vol. 2, pp. 101-105.
5. Домрачева Ю.В. Имитационное моделирование синхронной индукторной бесподшипниковой машины / Ю.В. Домрачева, С.Ю. Логинов // Вестник Псковского государственного университета №4. – 2014 – №4 – С. 173 – 182.
6. Loginov S. Research of radial forces and torque of bearingless synchronous machine / S. Loginov, Y. Domracheva, V. Smirnov, D. Fedorov // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference “Environment. Technology. Resources” (18-20 June 2015). – Rezekne, 2015. – vol. 1, pp. 128-132.
7. Домрачева Ю.В. Статические характеристики синхронной индукторной бесподшипниковой машины / Ю.В. Домрачева, С.Ю. Логинов // Электротехнические комплексы и системы управления №3. – 2015. – №3 – С. 39-42.
8. Домрачева Ю.В. Особенности проектирования модуля синхронной индукторной бесподшипниковой машины / Ю.В. Домрачева // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №9. – 2015. – №9 – С. 31-34.
9. Домрачева Ю.В. Математическая модель синхронной индукторной бесподшипниковой машины как объекта управления / Ю.В. Домрачева, С.Ю. Логинов // Электротехника. – 2016. – №3 – С. 18-23.
10. Свид. 2017613708 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Имитационная модель синхронной индукторной бесподшипниковой машины / Ю.В. Домрачева; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ПсковГУ (RU). – №2016662312/69; заявл. 15.11.16; опубл. 27.03.17, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Подписано в печать 04.04.2018. Формат 60x90/16.

Гарнитура Times New Roman. Усл. п. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ № 5545.

Изготовлено на Versant 2100.

Адрес издательства:

Россия, 180000, г. Псков, ул. Л. Толстого, д. 4а, корп. 3а.
Издательство Псковского государственного университета

