

На правах рукописи

Логинов Сергей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА БЕСПОДШИПНИКОВОЙ ИНДУКТОРНОЙ
МАШИНЫ**

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Псковский государственный университет» (ПсковГУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Журавлев Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, ст. научный сотрудник
Антипов Виктор Николаевич
кандидат технических наук, доцент
Фиясь Иван Павлович

Ведущая организация: ОАО «Электропривод»,
610006, г. Киров, Октябрьский пр., 24

Защита состоится «__» декабря 2012 года в __. __ на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, главный учебный корпус, ауд ____ .

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » _____ 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук

Попов М.Г.

Актуальность работы.

В настоящее время в некоторых специфических областях электропривода используются двигатели и генераторы с подвесом роторов в активных магнитных подшипниках (АМП). Такая система, естественно, дороже, чем с применением обычных шарикоподшипников, однако она позволяет получить ряд неоспоримых преимуществ: практически неограниченный ресурс; снижение расходов на обслуживание; малый коэффициент трения; малая отдача теплоты в окружающую среду; возможность работы на высоких скоростях, в вакууме, при низких и высоких температурах, в условиях агрессивных сред, в сверхчистых технологиях; возможность создания контролируемых микроперемещений ротора в зазоре; возможность активного гашения колебаний ротора; способность вращения ротора вокруг оси инерции (самоцентрирование ротора) и отсутствие вибраций вследствие дисбаланса; отсутствие шума; контроль нагрузок на подшипники, положения дисбаланса ротора. Данные преимущества позволяют использовать их там, где применение шарикоподшипников невозможно.

В конце 1980-ых рядом ученых S. Williamson, R. Bosch, A. Chiba, T. Fukao была предложена новая концепция бесподшипниковых электрических машин (БЭМ). Идея БЭМ состоит в том, чтобы объединить электродвигатель и АМП. В этом случае в зазоре должно действовать такое электромагнитное поле, при взаимодействии которого с ротором возникали бы как вращающий момент, так и управляемые радиальные силы. Это позволяет уменьшить длину ротора, что главным образом сказывается на увеличении критических скоростей и расширении диапазона частот вращения, а также улучшении массогабаритных показателей и удешевлению по сравнению с АМП.

С середины 1990 разработка БЭМ проводится в США, Китае, Швейцарии, Австрии, Германии, Великобритании, Франции, Канаде, Корее. Развитие данной области исследования ведется весьма динамично: предлагаются новые конструктивные варианты машин, исследуются и

оптимизируются законы управления, совершенствуется и расширяется элементная база системы управления. Каждые два года проводятся симпозиумы, посвященные активным магнитным подшипникам (international symposium on magnetic bearings), на которых число докладов, посвященных бесподшипниковым машинам, постоянно растет. Большой вклад в развитие теории магнитного подвеса внесли: P. K. Hermann, J. Bichsel, Schoeb R. Работами прикладного характера в области БПМ занимаются: Satoh T., Mori S., Ohsawa M, Neff M., Barletta N., T. Masuzawa, T. Kita и Y. Okada. Различные конструкции БЭМ обладают как преимуществами, так и недостатками, поэтому дальнейшее рассмотрение и изучение возможных вариантов исполнения является актуальной задачей.

В 1989 г. сотрудниками псковского филиала СПбГПУ был предложен принцип работы новой бесподшипниковой машины (Киселев П.В., Комаров В.П., Кочевин Ф.Г. Индукторный разноименнополюсный генератор. А.с. SU 1534657 А1. 8 сентября 1989). В 2009 г. по данному принципу в ООО «Псковская Инженерная Компания» совместно с ОАО «Электропривод» г. Киров при участии автора настоящей работы разработана новая конструкция БЭМ – бесподшипниковая индукторная машина (БПИМ).

Цели и задачи работы.

Целью работы является разработка методики расчета и проектирования бесподшипниковой индукторной машины, как нового технического устройства. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать математическое описание БПИМ, включающее математические модели движения ротора и электромагнитной системы.
2. Произвести синтез системы управления БПИМ, позволяющей обеспечить необходимые режимы работы.
3. Провести компьютерное моделирование БПИМ, включая систему управления.

4. Разработать алгоритм расчета БПИМ по заданным входным параметрам скорости, момента и допустимым радиальным нагрузкам.

5. Оценить преимущества данной машины.

Методы исследования.

Методологические и теоретические основы исследования АМП и БЭМ заложены в трудах Ю.Н. Журавлева (Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206с.) и Chiba A. (Magnetic Bearings and Bearingsless Drives. / A.Chiba, T.Fykao, O.Ichikawa, M.Oshima, M.Takemoto, D.G.Dorrell.– ELSEVIER, 2005. – 381 pp.)

Математическое описание движений жесткого ротора составляется на основе уравнений Лагранжа-Максвелла и представлено в виде системы дифференциальных уравнений. Проводимости в магнитной цепи, необходимые для вычисления магнитной энергии, определяются по приближенным аналитическим выражениям. Достоверность полученных результатов подтверждается расчетами с использованием метода конечных элементов (программная среда FEMM). Средствами компьютерного моделирования (среда Simulink) по найденным дифференциальным уравнениям формируется математическая модель БПИМ вместе с системой управления. При моделировании используются численные методы решения дифференциальных уравнений.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработана новая конструкция электрической машины - бесподшипниковая индукторная машина, в которой совмещены функции привода и активного магнитного подвеса ротора.
2. Создана математическая модель электромеханической системы данной машины, включающая выражения для вращающего момента и радиальных сил подвеса.
3. Получена упрощенная аналитическая модель, описывающая электромеханические процессы с достаточной степенью точности.

4. Синтезирована система управления машиной, позволяющая снизить взаимное влияние радиальных сил и вращающего момента, а также радиальных сил в двух взаимоперпендикулярных направлениях.

Практическая значимость исследования заключается в следующем.

1. Проведенный анализ математической модели позволил получить законы управления токами обмоток статора, позволяющие осуществлять устойчивый подвес ротора.
2. Разработана методика расчета конструктивных параметров машины по заданным входным параметрам скорости, момента и допустимым радиальным нагрузкам.
3. На базе разработанной методики создана компьютерная программа, позволяющая осуществлять в диалоговом режиме практические расчеты геометрических и электрических параметров бесподшипникового модуля машины. Программа зарегистрирована в государственном реестре и предназначена для использования в конструкторских бюро.
4. Получены математические выражения, позволяющие определить области применения, в которых БПИМ имеет преимущества перед двигателем с АМП. С использованием указанных выражений выработаны практические рекомендации, определяющие области эффективного применения БПИМ.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы.

Разработана и внедрена в ООО «Псковская Инженерная Компания» методика расчета конструктивных параметров машины по заданным входным параметрам скорости, момента и допустимым радиальным нагрузкам, а также компьютерная программа для практических расчетов геометрических и электрических параметров бесподшипникового модуля машины.

С использованием полученной программы, ООО «Псковская Инженерная Компания» совместно с ОАО «Электропривод» (г.Киров), при непосредственном участии автора, был разработан проект бесподшипниковой индукторной машины оригинальной конструкции.

Методические разработки внедрены в курсы лекций по дисциплинам «Электрические машины» и «Электропривод в современных технологиях» для студентов Электромеханического факультета, а также в курс лекций «Активные магнитные подвесы и бесподшипниковые электрические машины» для аспирантов ПсковГУ.

На защиту выносятся следующие результаты работы:

1. Математическая модель электромеханических процессов машины.
2. Алгоритм управления вращающим моментом и радиальными силами в БПИМ.
3. Методика расчета и проектирования БПИМ.
4. Конструкция БПИМ.

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты исследования диссертации докладывались на научно–практических конференциях: «Математические методы в технике и технологиях» (XXII Международная научная конференция 2009г), «Время вперед» (Всероссийская выставка инноваций 2010г); научно-техническом совете ОАО «Электропривод» г.Киров; научно-техническом семинаре кафедры «Электропривод и систем автоматизации» ПсковГУ, заседании кафедры «Электрические машины» СПбГПУ. По результатам диссертации опубликовано 7 печатных работ в том числе: 4 в изданиях, включенных в перечень ВАК и 1 статья опубликована на английском языке. Кроме того, зарегистрирована программа для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержатся общие сведения о диссертации, актуальности выбранной темы, цели работы и методах исследования.

В первой главе рассмотрены принцип формирования магнитного поля в зазоре БЭМ, которое обеспечивает создание радиальных сил и вращающего момента и варианты ее реализации на различных типах двигателей, обозначены преимущества и недостатки каждого из них. Также обозначены

сферы применения и приведено краткое описание некоторых опытных образцов машин.

Для пояснения принципа работы рассмотрена простейшая модель машины, имеющая статор с 4-х полюсной обмоткой привода и 2-х полюсной обмоткой подвеса.

На рисунке 1 а) показаны магнитные потоки Φ_{4a} вокруг четырех проводников 4а, которые размещены в пазах статора.

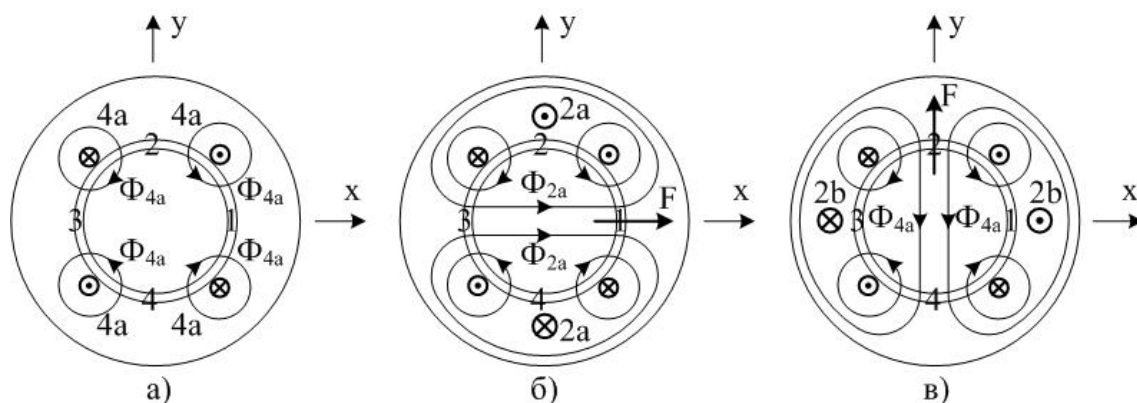


Рисунок 1 – Принципы создания радиальных сил: а) симметричный основной 4-полюсный поток; б) радиальная сила в направлении оси x ; в) радиальная сила в направлении оси y

Эти потоки образуют четыре полюса в секторах 1, 2, 3, 4 воздушного зазора с полярностями N, S, N, S. Каждый полюс создает силу магнитного тяжения ротора к статору. При центральном положении ротора относительно статора сумма этих сил равна нулю. Рисунок 1 б) показывает принцип создания радиальной силы в направлении оси x . Для этого в пазах статора размещаются два проводника 2а, которые создают магнитные потоки Φ_{2a} . При направлении тока, показанном на рисунке, магнитная индукция в секторе 1 увеличивается из-за совпадения направлений потоков Φ_{4a} и Φ_{2a} , и уменьшается в противоположном секторе 3 из-за противоположности направлений этих потоков. Сила магнитного тяжения в секторе 1 увеличивается, в секторе 3 – уменьшается. В результате возникает радиальная сила F в направлении x , величина которой регулируется силой тока в проводниках 2а. Очевидно, что при изменении направления тока в

проводниках 2а направление силы F будет противоположным. Рисунок 1 в) показывает создание радиальной силы в направлении y . На основе данного принципа возможно создание различных типов бесподшипниковых машин: асинхронный двигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами, синхронный реактивный (индукторный) двигатель, униполярный двигатель, вентильный реактивный (шаговый) двигатель. Каждый тип машины имеет как преимущества, так и недостатки.

Некоторые модели бесподшипниковых машин уже нашли практическое применение в следующих приложениях: турбодетандер, герметичный насос, биореактор, кровяной насос, шпиндельный привод, привод в производстве полупроводниковых приборов.

Вторая глава посвящена описанию предлагаемой конструкции бесподшипниковой индукторной машины (БПИМ) и составлению ее математической модели. Выбор объекта исследования обусловлен как преимуществами данного типа машин: высокий коэффициент «сила-ток», температурную независимость, простоту конструкции, относительно низкую стоимость, так и накопленным опытом в ООО «Псковская Инженерная Компания», где и проводилась разработка БПИМ. На рисунке 2 представлена компоновочная схема машины.

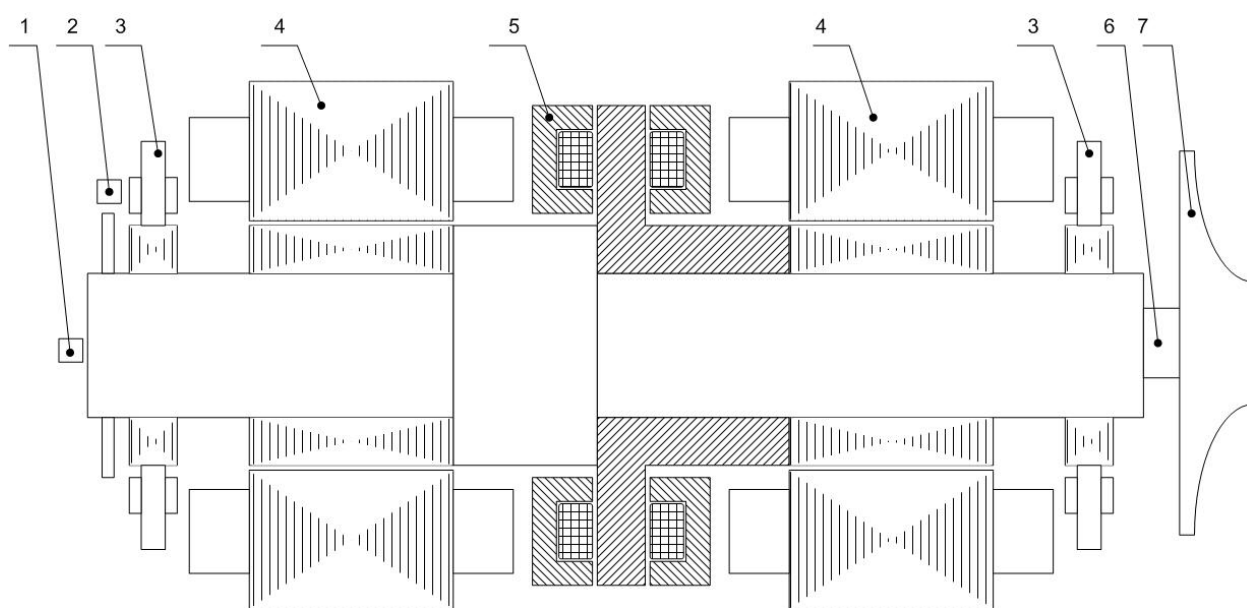


Рисунок 2 – Компоновочная схема машины

Здесь: 1-датчик осевого положения ротора, 2-датчик угла поворота, 3-датчики радиального смещения, 4-бесподшипниковые модули, 5-осевой АМП, 6-вал ротора, 7-нагрузочная машина.

Методика расчета и система управления осевого магнитного подшипника хорошо известны, поэтому обратим внимание на бесподшипниковый модуль.

Рассматривая принципы работы разноименно-полюсной индукторной машины и системы активного магнитного подвеса можно отметить идентичность картины замыкания магнитных потоков. Это позволяет говорить о возможности совмещения их в одно устройство – бесподшипниковую индукторную машину. По сути это разноименно-полюсная индукторная машина, имеющая четыре обмотки возбуждения, ток в которых изменяется системой автоматического управления таким образом, что обмотки подвеса, образованные полюсами статора, воздействуют на ротор по принципу работы АМП. Статор устройства можно условно разбить на четыре одинаковых электромагнита, в каждый из которых входит четное число полюсов с соответствующей управляемой обмоткой возбуждения (обмотки подвеса). Диаметрально-противоположно расположенные электромагниты образуют систему, с помощью которой можно управлять движением ротора по одной координате. Таким образом, совмещенное устройство является двухкоординатной системой активного магнитного подвеса. Разрез бесподшипникового модуля представлен на рисунке 3.

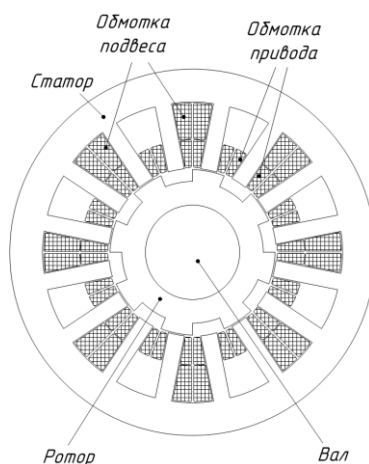


Рисунок 3 – Разрез бесподшипниковой индукторной машины

Обмотки привода располагаются в малых пазах статора. Все секции обмотки привода включаются последовательно, согласно или встречно, в зависимости от направления потоков возбуждения, так чтобы наводимые в них МДС складывались (рис. 4).

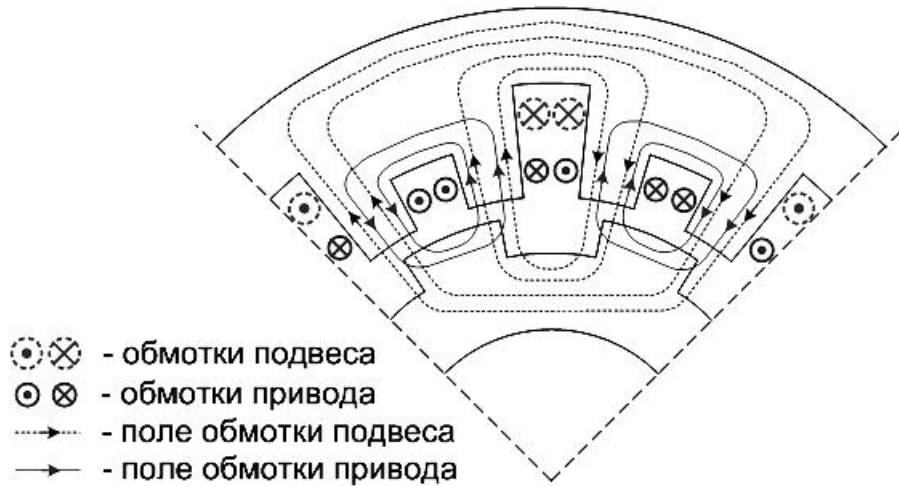


Рисунок 4 – Распределение обмоток привода и подвеса в БПИМ.

При смене полярности тока в обмотке привода изменяется поле, создаваемое этой обмоткой и, как следствие, изменяется и распределение МДС под зубцами, что приводит к созданию вращающего момента.

Для составления математической модели БПИМ были рассмотрены механическая система, описывающая движение ротора как жесткого тела, на которое воздействуют силы, и электромагнитная система статора, ротора и обмоток, в которой создаются эти электромагнитные силы. Такие системы описываются уравнения Лагранжа-Максвелла:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = R_j + Q_j, \quad R_j = \frac{\partial W}{\partial q_j}, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial W}{\partial i_k} + r_k i_k = u_k, \quad (j = 1, \dots, n), \quad (k = 1, \dots, m),$$

где T – кинетическая энергия, Π – потенциальная энергия, q_j – обобщенные координаты, R_j – обобщенные магнитные силы; Q_j – обобщенные нагрузки на ротор; W – магнитная энергия системы, содержащей m электромагнитных контуров с токами i_1, \dots, i_m , активными сопротивлениями r_1, \dots, r_m и входными напряжениями u_1, \dots, u_m .

Ротор, как твердое тело, имеет 6 степеней свободы, однако его линейное перемещение в осевом направлении можно рассматривать независимо от остальных, поэтому в дальнейшем оно не учитывается.

Рассматривается жесткий ротор массой m , вращающийся с угловой скоростью $\omega = \dot{\phi}$ в двух модулях БПМ (рис. 5)

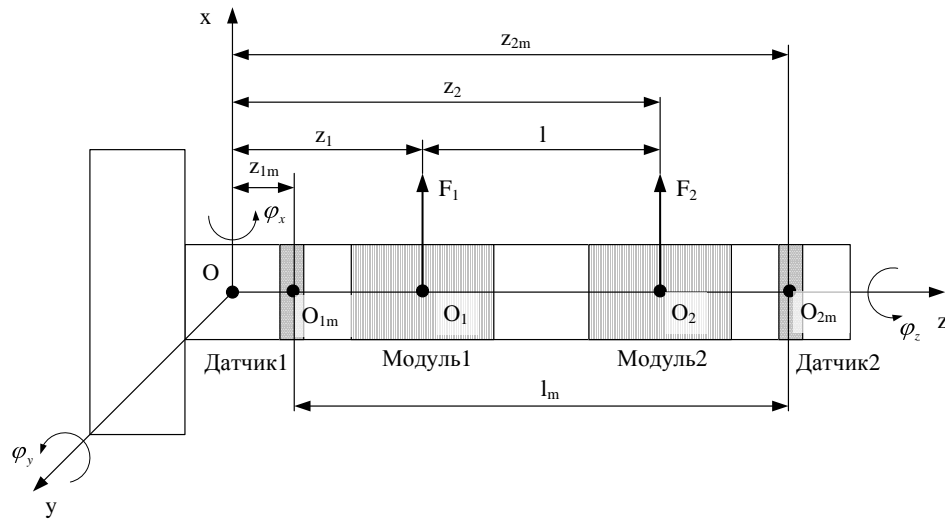


Рисунок 5 – Схема ротора

В качестве обобщенных координат, выбраны положения центров бесподшипниковых модулей и угол поворота вала: $q = (x_1, y_1, x_2, y_2, \phi)^T$.

Используя уравнения Лагранжа 2-го рода, получены дифференциальные уравнения движения ротора вида:

$$A \cdot \ddot{q} + B(\dot{q}, q) = Q + R, \quad (2)$$

где A и B матрицы коэффициентов, зависящих от параметров ротора; Q и R – вектор-столбцы нагрузок на ротор и магнитных сил.

Статор одного модуля БПИМ имеет 16 полюсов, ротор – 8 полюсов. Статор имеет 5 однофазных обмоток: обмотка привода m и обмотки подвеса $x1, x2, y1, y2$. Обмотку привода образуют 16 катушек привода с числом витков w_m каждая, с одинаковым током i_m и МДС $F_m = w_m i_m$. Подвес ротора в направлении оси x осуществляют обмотки $x1$ и $x2$, в направлении оси y – обмотки $y1$ и $y2$. Каждая из этих обмоток образована двумя катушками, намотанными на пару соседних полюсов с w_s витками. Токи в обмотках подвеса $i_{x1}, i_{x2}, i_{y1}, i_{y2}$ создают МДС $F_{x1} = w_s i_{x1}$, $F_{x2} = w_s i_{x2}$, $F_{y1} = w_s i_{y1}$,

$F_{y2} = w_s i_{y2}$. МДС катушек одной обмотки имеют противоположное направление. Зубцовая полярность этих МДС: N-N-N-N-S-S-S-S-....

Схема замещения магнитной цепи БПИМ приведена на рисунке 6.

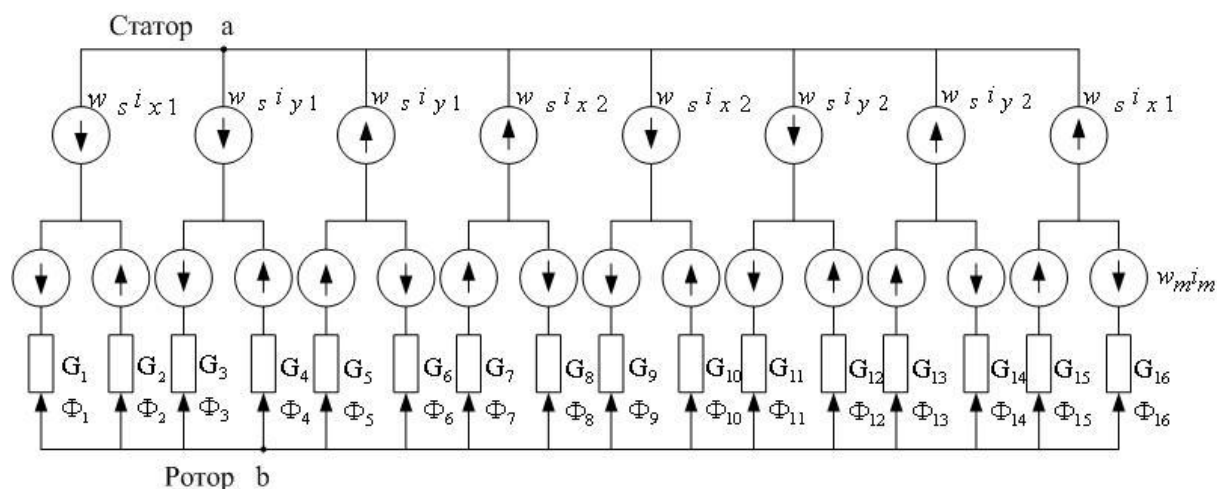


Рисунок 6 – Схема замещения магнитной цепи БПИМ

На рисунке Φ_1, \dots, Φ_{16} – магнитные потоки через полюса, G_1, \dots, G_{16} – магнитные проводимости под полюсами.

Используя данную схему замещения и известную процедуру, получаем зависимости собственных и взаимных индуктивностей от магнитных проводимостей: $L_{ks} = L(G_1, \dots, G_{16})$, $(k, s = 1, \dots, 5)$.

Исходя из геометрии магнитопровода машины и аналитических выражений для проводимости зазора были получены зависимости собственных и взаимных индуктивностей контуров от параметров машины и положения ротора при следующих допущениях: не учитывались сопротивление магнитопровода, вихревые токи, индуктивности рассеяния и индуктивности лобовых частей машины; зависимость проводимости воздушного зазора под зубцом статора аппроксимировалась косинусоидой, а минимальная проводимость считалась равной нулю; зависимость индукции от напряженности магнитного поля линейная, насыщение отсутствует. Слагаемые третьего порядка малости отбрасывались. В силу малости смещения ротора, величина, обратная высоте воздушного зазора, определяется выражением:

$$1/g = (1 + \bar{x} \cos(\phi) + \bar{y} \sin(\phi) + (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)/2 + \bar{x}\bar{y} \sin(2\phi) + (\bar{x}^2 - \bar{y}^2)/2) / g_0,$$

где g_0 - зазор при центральном положении ротора, \bar{x}, \bar{y} - смещения ротора в относительных единицах, ϕ - текущая угловая координата.

По известному выражению получена зависимость магнитной энергии от обобщенных координат, токов в обмотках и конструктивных параметров машины (количество витков обмоток, величина зазора, геометрические размеры магнитопровода). Вращающий момент M определяется как частная производная магнитной энергии по углу вращения ϕ , а радиальные силы F_x и F_y определяются как частные производные магнитной энергии по x и y соответственно.

Для оценки адекватности полученных результатов проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в программной среде FEMM. На рисунке 7 приведены графики, построенные по аналитическим выражениям и по компьютерной модели.

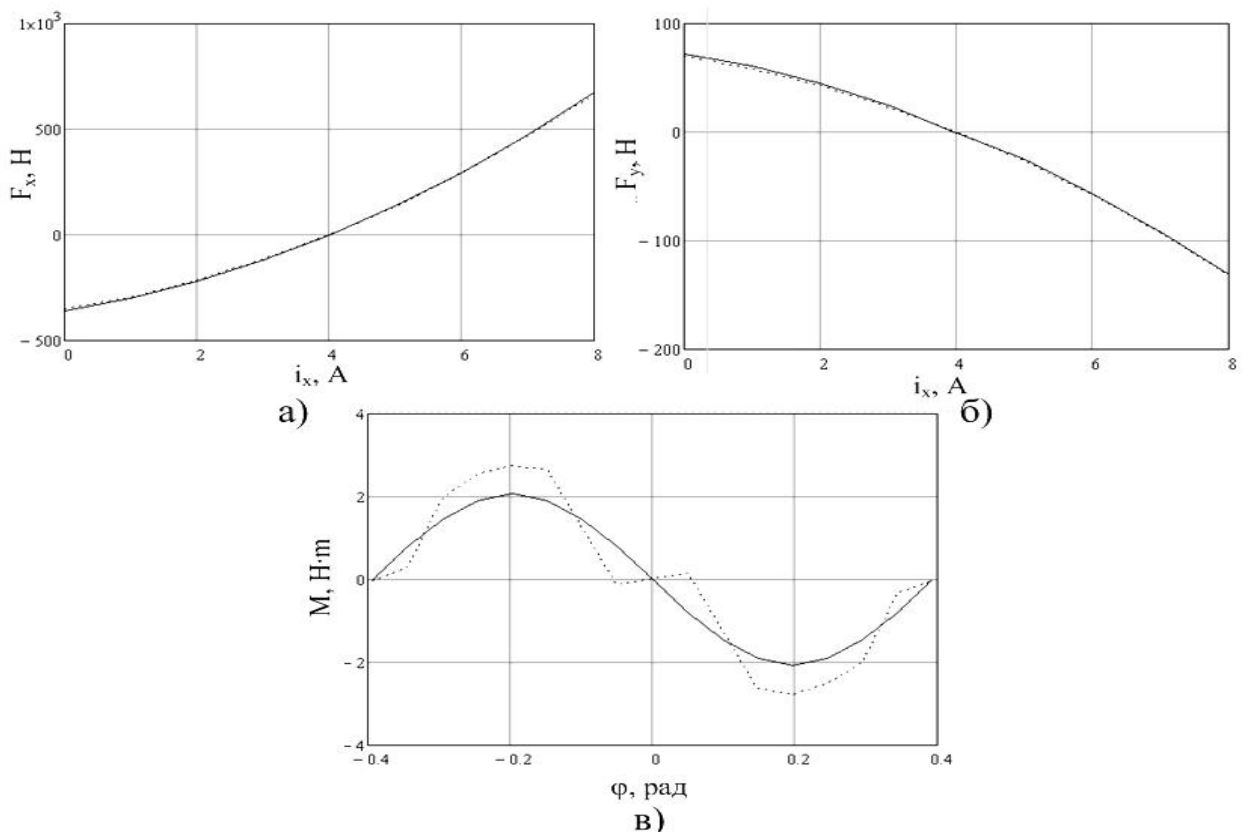


Рисунок 7 – Зависимости: а) силы F_x от тока i_x , б) силы F_y от тока i_x , в) момента M от угла поворота ротора ϕ . _____-построенные по аналитическим выражениям,-построенные по компьютерной модели.

Максимальное расхождение сил во всем диапазоне токов управления не превышает 4,4%. Расхождение среднеквадратичного значения момента достигает 20%. Поэтому с определенной степенью уверенности можно говорить об адекватности модели.

Третья глава посвящена синтезу системы управления (СУ) бесподшипниковой машиной, которая, как объект управления, является неустойчивой. СУ должна обеспечивать как заданную мощность привода, т.е. момент при номинальной скорости, так и устойчивый подвес ротора.

Функциональная схема разработанной СУ представлена на рисунке 8. В центральном положении ротора зависимость момента от угла поворота вала определяется по выражению: $\bar{M} = -16w_m w_s A_0 i_m (i_{x1} + i_{x2} + i_{y1} + i_{y2}) \sin(8\varphi)$, где A_0 – конструктивный коэффициент. Среднее значение момента за оборот равно нулю, однако, если запитывать обмотку привода синусоидальным током $i_m = I_m \sin(8\varphi)$, то зависимость момента от угла поворота примет вид: $\bar{M} = -16w_m w_s A_0 I_m (i_{x1} + i_{x2} + i_{y1} + i_{y2}) \sin^2(8\varphi)$.

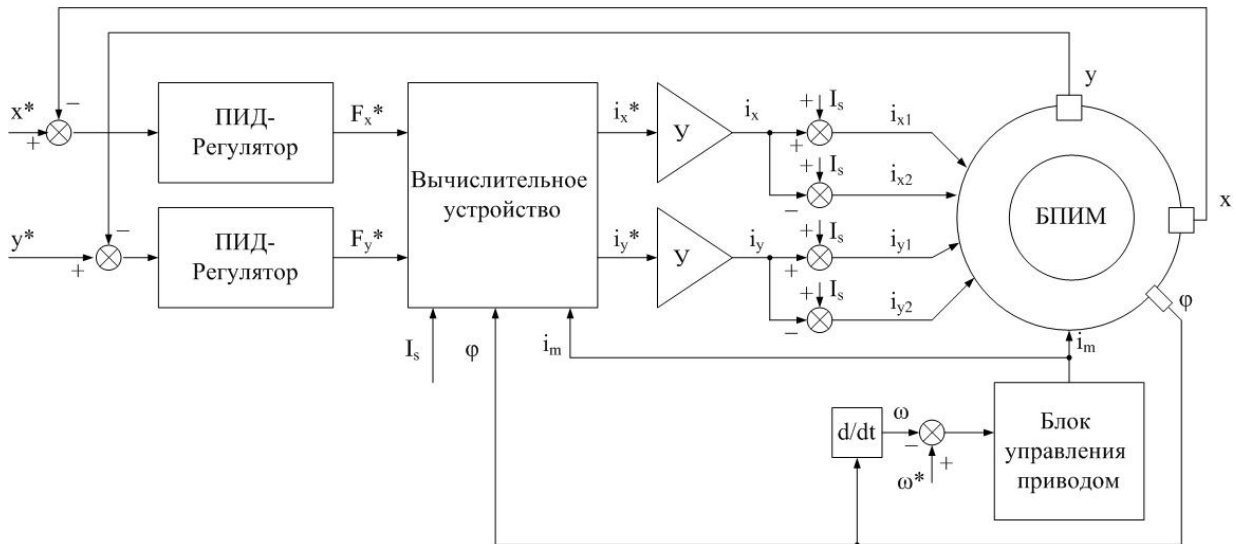


Рисунок 8 – Функциональная схема СУ БПМ

Для исключения пульсаций момента используем то обстоятельство, что БПМ состоит из двух модулей. В этом случае выражение для результирующего момента не будет зависеть от угла поворота ротора:

$$\bar{M}_{I+II} = 16w_m w_s A_0 I_m (i_{x1} + i_{x2} + i_{y1} + i_{y2}) . \quad (3)$$

На высоких скоростях формирование синусоидального тока затруднительно, поэтому целесообразно использовать прямоугольный сигнал. При этом момент будет иметь пульсирующий характер, однако не будет спадать до нуля: $\bar{M}_{I+II} = 16w_m w_s A_0 I_m (\sin(8\varphi) + \cos(8\varphi))$.

Магнитный подвес ротора БПИМ осуществляется по такому же принципу, что и АМП. Сигнал с датчиков положения подается на ПИД-регулятор, который формирует задающие силы F_x^* и F_y^* . По значениям этих сил формируются командные токи, подаваемые в обмотки подвеса:

$$\left. \begin{aligned} i_{x1} &= I_s + i_x \\ i_{x2} &= I_s - i_x \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} i_{y1} &= I_s + i_y \\ i_{y2} &= I_s - i_y \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $I_s = const$ - ток смещения, i_x и i_y - управляющие токи.

Различие в знаках управляющих токов соответствует дифференциальной схеме включения обмоток $x1$ и $x2$, $y1$ и $y2$. Из (3) с учетом (4) вытекает весьма важное обстоятельство – на вращающий момент ротора управляющие токи обмоток подвеса влияния не оказывают.

По составленной математической модели БПИМ с учетом (4) получены приближенные выражения для радиальных сил:

$$\begin{aligned} F_x &= ai_x + bi_y + cx, \\ F_y &= bi_x + ai_y + cy, \end{aligned} \quad (5)$$

где a, b, c - коэффициенты, зависящие от угла поворота, токов смещения и обмотки привода, конструктивных параметров.

Как видно из (5), на силу F_x по оси x влияет управляющий ток i_y по координате y и наоборот, что отрицательно сказывается на управляемость системы. Для уменьшения взаимовлияния по известным задающим силам из (5) определены командные токи:

$$\begin{aligned} i_x^* &= \frac{1}{a^2 - b^2} [aF_x^* - bF_y^* - c(ax - by)], \\ i_y^* &= \frac{1}{a^2 - b^2} [aF_y^* - bF_x^* - c(ay - bx)]. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом значения радиальных сил F_x и F_y практически совпадают с задающими силами F_x^* и F_y^* (расхождение обусловлено упрощениями при получении выражений (5)).

В четвертой главе приводится методика расчета БПИМ по заданным значениям скорости вращения, мощности и допустимым радиальным нагрузкам на ротор. Ограничивающими факторами для вращающего момента являются длина активной части машины и диаметр ротора, который в свою очередь на высоких скоростях ограничен механической прочностью стали. Увеличение длины вала и уменьшение его диаметра приводят к снижению критической скорости и, как следствие, частоты вращения. С учетом этого предложена следующая методика по расчету машины: выбирается диаметр ротора исходя из механической прочности стали при заданной скорости вращения; определяется требуемая длина модуля по заданной мощности и допустимой радиальной нагрузке; производится расчет магнитопровода статора – определяются его геометрические параметры и МДС обмоток; по известным МДС производится расчет обмоток – выбор соотношения числа витков и токов; независимо от статора, по заданному значению осевой нагрузки рассчитывается осевой подшипник; после расчета ротора, статора и осевого магнитного подшипника строится компоновочная схема машины и производится проверка ротора на критическую скорость (полная длина ротора определяется исходя из того, что он должен содержать два модуля, датчики радиального положения, страховочные подшипники, осевой подшипник и исполнительный механизм). Входными данными для проектирования СУ БПИМ служат токи обмоток машины, рассчитанные при проектировании электромеханической части, и желаемое быстродействие системы. По разработанной методике произведен расчет БПИМ на номинальную скорость вращения 50000 об/мин, мощность 10 кВт и допустимые радиальные нагрузки 100Н, а также построена компьютерная модель в среде Simulink. Структурная схема модели БПИМ представлена на рисунке 9.

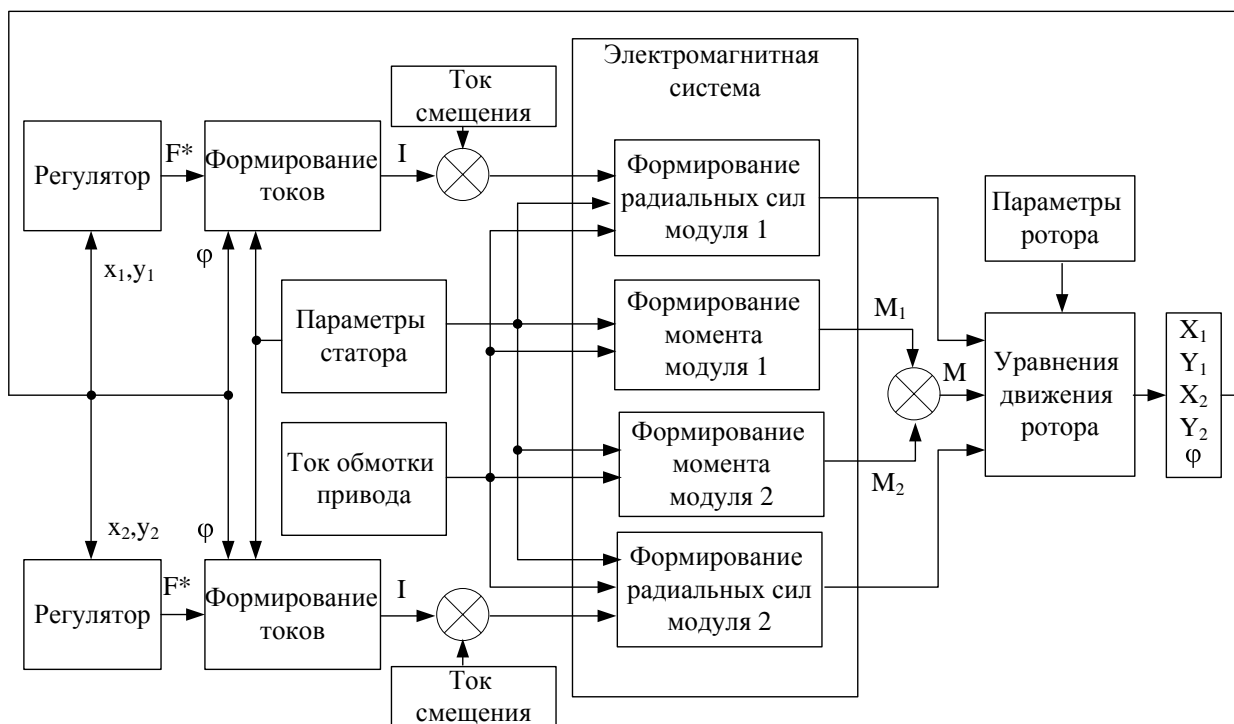


Рисунок 9 – Структурная схема БПИМ

Переходные характеристики радиального перемещения ротора по осям x и y при воздействии ступенчатого воздействия силы 100 Н по оси x показаны на рисунке 10.

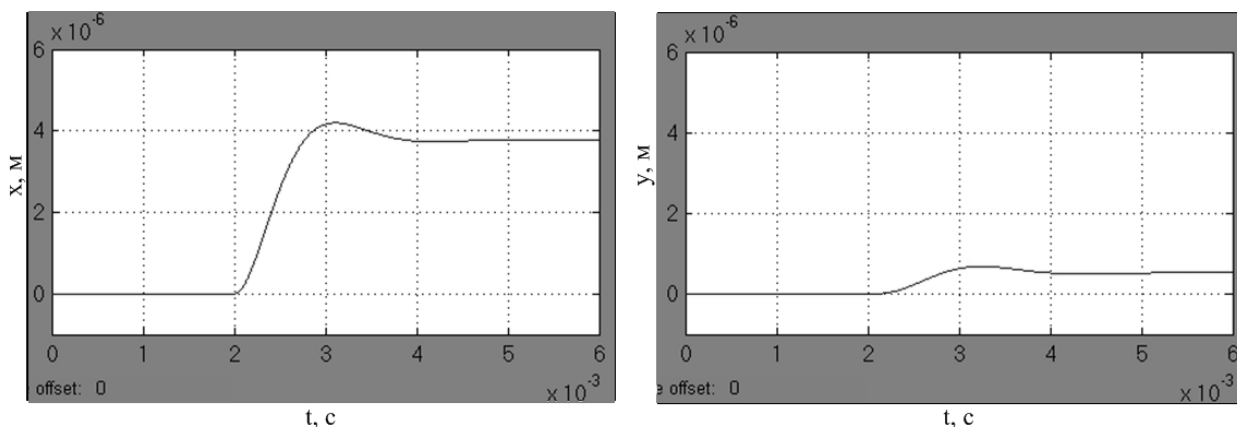


Рисунок 10 – Переходные характеристики радиального перемещения ротора

В ходе исследования компьютерной модели показана эффективность вычислительного устройства, формирующего командные токи согласно (6) и позволяющего снизить взаимовлияние радиальных сил, увеличить запас устойчивости и быстродействие системы, а также несущественность влияния радиальных сил на вращающий момент.

Кроме того, построенная модель позволяет решать задачи, не входящие в цель данной работы, такие как: исследование влияния коэффициентов

регулятора на переходные процессы положения ротора, моделирование работы компенсатора синхронной помехи, включающегося на высоких скоростях и позволяющего избежать насыщения усилителя и др.

Сравнительный анализ массово-габаритных показателей БПИМ и двигателя с АМП показывает преимущество бесподшипниковой машины данной конструкции в приводах с малым отношением радиальных нагрузок к вращающему моменту. Зависимость относительного уменьшения длины ротора $l_{АМП}/l_{БПИМ}$ от отношения F_x/M представлена на рисунке 11.

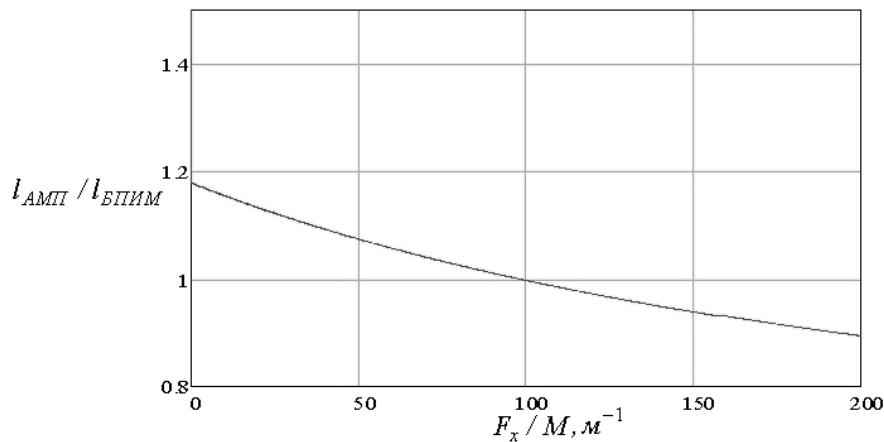


Рисунок 11 – Зависимость отношения длин роторов машины с АМП и БПИМ от отношения радиальной силы к моменту.

Из рисунка видно, что для принятых исходных данных применение бесподшипниковых модулей в машине позволяет сократить длину вала при отношении $F_x/M < 100 \text{ м}^{-1}$. Важной составляющей БПИМ является система управления (СУ). Стоит отметить, что СУ существенно не усложняется, а используемая элементная база остается той же, что и в АМП.

В заключении приведена общая характеристика работы и основные выводы по результатам диссертации.

Выводы

1. Изучены принципы работы и рассмотрены различные варианты исполнения бесподшипниковых машин. Определены достоинства и недостатки каждого типа.

2. Предложена новая конструкция бесподшипниковой индукторной

машины. Рассмотрены электромеханические процессы в ней. Получены зависимости радиальных сил и вращающего момента от параметров машины и токов в обмотках. Составлена математическая модель машины.

3. Синтезирована система управления БПИМ. Определен алгоритм снижения взаимовлияния радиальных сил, позволяющий увеличить запас устойчивости и быстродействие системы.

4. Составлена компьютерная модель БПИМ.

5. Разработан алгоритм расчета БПИМ по заданным входным параметрам скорости, момента и допустимым радиальным нагрузкам.

6. Произведено сравнение массово-габаритных показателей БПИМ и двигателя с АМП.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

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

2. Логинов С.Ю. Математическая модель бесподшипниковой индукторной машины // Известия ТулГУ – 2011. - №6 – С.58-66.

3. Логинов С.Ю. Снижение взаимовлияния радиальных сил в бесподшипниковой индукторной машине // Научно-технические ведомости СПбГПУ – 2012. - №1 – С.70-75.

4. Логинов С. Ю. Управление подвесом в бесподшипниковой индукторной машине без обратной связи по току // Электротехнические комплексы и системы управления 2010. - №4. – С. 33-37.

5. Domracheva Y, Loginov S, THE MODEL OF INDUCTION BEARINGLESS MACHINE // Low Voltage Electrical Machines: сборник трудов международной конференции электрические машины малой мощности Брно – 2009. – С. 78-80

Логинов Сергей Юрьевич

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА БЕСПОДШИПНИКОВОЙ ИНДУКТОРНОЙ
МАШИНЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Журавлев Юрий Николаевич

Подписано в печать: 25.10.2012 г. Формат 60x90/16

Гарнитура Times New Roman. Усл. п.л. 1,2.

Тираж 101 экз. Заказ №4445

Адрес издательства:

Россия, 180000, г. Псков, ул. Л.Толстого, 4,

Издательство ПсковГУ

