

05.09.03
Т19



На правах рукописи

Таранов Игорь Николаевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
В ПОЛЕВОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ**

*Специальность 05.09.03 — «Электротехнические комплексы
и системы»*

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени *12*
кандидата технических наук

Челябинск 2001

Работа выполнена на кафедре "Электрооборудование и автоматизация производственных процессов" Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Воронин С.Г.
Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Исмагилов Ф.Р.;
кандидат технических наук,
Ганджа С.А.

Ведущая организация – ОАО "Электромашина" (г. Челябинск)

Защита состоится ___ октября 2001г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 Южно-Уральского государственного университета по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЮУрГУ, ауд. 380.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Ваш отзыв в двух экземплярах, скрепленных печатью, просим направлять по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЮУрГУ, Тел. (3512) 39-91-23.

Автореферат разослан ___ сентября 2001г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



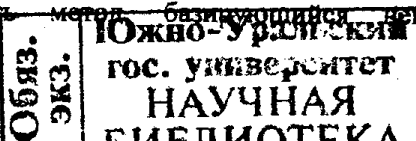
Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При разработке приводов промышленного электротранспорта, автономных средств перемещения и передвижения встает задача поиска новых технических решений, позволяющих полнее удовлетворять потребности заказчика, а во многих случаях вообще не представляется возможным применить электропривод классического типа. Свойства и параметры электропривода в значительной степени определяются параметрами и свойствами его исполнительного органа — электродвигателя, в общем понимании электромеханического преобразователя (ЭМП). При проектировании и оптимизации последнего на первый план выдвигается задача электромагнитного расчета. В настоящее время существует два альтернативных подхода к решению этой задачи: аналитические и численные методы, основанные на уравнениях теории поля. Аналитические методы исследования электромагнитного поля требуют для своего применения допущений, существенно упрощающих и искажающих реальные процессы, что приводит к значительным погрешностям расчета. Поэтому дальнейшее развитие и совершенствование методов расчета устройств с использованием ЭМП, в настоящее время, возможно только на основе численного расчета магнитного поля.

В то же время, широко распространенная вариационная формулировка задачи численного расчета магнитного поля, требует от исследователя обязательного доказательства взаимосвязи функционалов с дифференциальными или интегральными уравнениями поля, записи функционалов специального вида для задания граничных условий, что в конечном счете ограничивает круг решаемых задач и уводит исследователя от физической стороны проблемы.

Для устранения вышеуказанных недостатков и ограничений необходимо развивать метод, базирующийся непосредственно на



уравнениях теории поля. Применение такого метода для расчета характеристик моментных вентильных электродвигателей, содержащих в своем составе синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов, имеет ряд особенностей, связанных с дробным числом пазов на полюс и многополюсного намагничивания.

В частности, для этой цели требуется разработка методики расчета электромагнитного момента вентильного двигателя, базирующейся на мгновенной картине магнитного поля и учитывающей наличие, распределение и величину реактивных моментов в ЭМП, нелинейность свойств магнитотвердых и магнитомягких материалов. Требуют уточнения и исследования также вопросы сокращения времени и повышения точности расчета электромагнитных сил.

Целью данной работы является разработка методики расчёта пусковых характеристик вентильного электродвигателя, позволяющей достаточно точно и с небольшими затратами времени рассчитывать пусковой момент вентильного двигателя и его характеристики с учётом реальной конфигурации и свойств магнитопроводов, реактивных составляющих момента и прогнозировать изменение характеристик двигателя при изменении конструкции и алгоритмов управления, а также развитие численного метода расчета магнитного поля, базирующегося непосредственно на уравнениях теории поля.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие научно-технические задачи.

1. Разработана методика определения пускового момента и характеристик вентильного электродвигателя на основе мгновенной картины магнитного поля, учитывающая реактивные составляющие момента, позволяющая сократить время расчета и повысить точность вычисления электромагнитного момента.

2. Обоснован интегро-интерполяционный метод получения

математической модели магнитного поля и показаны его преимущества по сравнению с вариационным подходом.

3. Разработана математическая модель расчета неоднородного нелинейного плоскопараллельного магнитного поля в устройствах электромеханики, использующая преимущества вышеуказанного метода и позволяющая, в отличие от известных моделей, основанных на том же методе, проводить расчет в областях со сложной конфигурацией.

4. Разработана система расчета магнитного поля в электрических машинах со стандартным интерфейсом, позволяющая изменять взаимное положение подвижных частей без ручного изменения геометрической модели.

5. Проведено экспериментальное исследование магнитного поля в воздушном зазоре физической модели, подтверждающее результаты численных расчётов.

Методы исследования. В работе использовались: элементы теорий матричного и интегрального исчислений; векторный анализ; методы численного решения систем нелинейных и линейных уравнений; сплайновая аппроксимация; методы физического моделирования и экспериментальных исследований.

Научная новизна

1. Предложена методика расчета пусковых характеристик вентильного электродвигателя, имеющая в основе численный расчет магнитного поля, позволяющая сократить время вычислений за счет исключения расчетов в повторяющихся элементах конструкции ЭМП и предоставляющая информацию о реактивном моменте, действующем на отдельные зубцы двигателя:

2. На основе интегро-интерполяционного метода, свободного от недостатков вариационной формулировки задачи, разработана математическая модель расчета неоднородного нелинейного

плоскопараллельного магнитного поля в устройствах электромеханики, позволяющая проводить расчеты в областях со сложной конфигурацией;

3. Предложена интерполяция поведения магнитной индукции в пределах одного элемента и всей расчетной области, по аналогии с векторным магнитным потенциалом, что позволяет повысить точность расчета составляющих электромагнитной силы, а также проводить контур интегрирования без учета расположения и конфигурации элементов;

4. Предложен принцип определения качественного и количественного отклонения свойств материалов от заявленных, на основе сравнения экспериментальных и расчетных пусковых характеристик моментного вентильного двигателя;

Практическая ценность. Полученные соотношения, разработанные алгоритмы и программы моделирования позволяют рассчитывать пусковые характеристики вентильного электропривода, а также неоднородное нелинейное плоскопараллельное магнитное поле с учетом особенностей электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов.

Математическая модель реализована в виде прикладных программ и может быть использована при проведении проверочных и различного рода оптимизационных расчетов в ходе практического проектирования ЭМП.

Предложены меры по увеличению производительности расчетов и повышению точности определения интегральных характеристик магнитного поля.

Практическая реализация. Практическая ценность диссертации подтверждается решением ряда практических задач создания новой техники. Результаты диссертационной работы и комплекс программ использовались при проверочных расчетах магнитоэлектрического возбудителя упругих колебаний. В частности, было определено распределение индукции в магнитопроводе статора и изменение тягового

усилия при перемещении подвижной части преобразователя.

Результаты теоретических исследований вентильного электродвигателя инвалидной коляски были использованы при выработке рекомендаций по повышению мощности электропривода при оптимальном использовании объема магнитотвердого материала индуктора, в результате чего момент двигателя увеличился на 20%. Полученные результаты диссертации использованы в учебном процессе и научной работе Златоустовского филиала ЮУрГУ, в частности на кафедре электропривода и автоматизации производственных процессов. Разработана лабораторная работа по исследованию магнитного поля в зазоре магнитной системы с магнитом $NdFeBr$ методом физического и численного моделирования. Эффективность математической модели и методик подтверждена соответствующими актами внедрения.

Обоснованность и достоверность. Обоснованность результатов и выводов диссертации обеспечена корректным использованием методов интегрального и дифференциального исчисления, современных математических моделей, принятием признанных допущений. Достоверность научных положений и рекомендаций подтверждена экспериментальными исследованиями индукции и характеристик вентильных двигателей, измерением тягового усилия возбудителя упругих колебаний.

Основные научные и практические результаты, выносимые на защиту.

Методика расчета пусковых характеристик вентильного электродвигателя, имеющая в основе численный расчет магнитного поля, позволяющая сократить время вычислений за счет исключения расчетов в повторяющихся элементах конструкции ЭМП и предоставляющая информацию о реактивном моменте, действующем на отдельные зубцы двигателя.

Математическая модель неоднородного нелинейного плоскопараллельного магнитного поля на основе интегро-интерполяционного метода, свободная от недостатков вариационной формулировки задачи, позволяющая проводить расчеты в областях со сложной конфигурацией, упрощающая задание граничных условий и реализующая меры по повышению точности расчета составляющих электромагнитного момента.

Результаты численных и физических исследований магнитных полей и характеристик электромеханических преобразователей различных типов и исполнений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технической конференции “Электротехнические комплексы автономных объектов” (Москва, 1997г.), 51, 52 и 53 научно-технических конференциях ЮУрГУ (1999 – 2001г.), 1-й научно-практической конференции г. Челябинск 2000г., на заседании научного Совета Златоустовского филиала ЮУрГУ. Работа в целом докладывалась, обсуждалась и получила одобрение на заседании кафедры электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ. Результаты выполненных теоретических исследований, численных и практических экспериментов, а также аспекты программной реализации отражены в 2 отчетах по НИР.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 186 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 141 наименования, 21 страницы приложений, включает 57 рисунков и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана ее общая характеристика, сформулированы задачи и цели исследования, выделена научная и практическая ценность.

В первой главе содержится анализ существующих методов расчета характеристик вентиляльного электродвигателя. Обосновано преимущество и перспективность методов, имеющих в своей основе расчет магнитного поля электромеханического преобразователя. Расчет магнитного поля, в свою очередь, может быть произведен одним из следующих методов: аналитическим, конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). Достоинство аналитического метода заключается в получении точного решения исходного уравнения, недостаток состоит в сложности, а иногда и невозможности его применения для расчета областей со сложной конфигурацией, поэтому далее рассматриваются математические модели, имеющие в своей основе численный расчет магнитного поля. Достоинства и недостатки методов МКР и МКЭ рассмотрены на примере получения математической модели магнитного поля в плоскопараллельной постановке задачи.

Метод конечных разностей имеет в своей основе уравнения теории поля, записанные в дифференциальной форме, однако он трудоемок для расчета областей сложной конфигурации, поэтому практически его применяют при прямоугольной форме границ исследуемого объекта.

Метод конечных элементов является наиболее применяемым в последнее время для расчета магнитного поля в областях произвольной конфигурации, недостаток состоит в замене задачи теории поля вариационной и необходимости доказательства связи получаемых функционалов с уравнениями теории поля.

Также рассмотрен интегро-интерполяционный метод и обосновано его преимущество перед вариационной формулировкой задачи МКЭ, как основанного непосредственно на интегральных уравнениях теории поля. Кроме того, в отличие от МКР, эти уравнения записаны в дивергентной форме, следовательно, полученная разностная схема имеет

консервативный характер, а вычислительный процесс будет устойчивым. Однако, вывод разностного уравнения для произвольного расположения узлов сетки не проводился.

Поставлена задача получения математической модели магнитного поля интегро-интерполяционным методом, позволяющая проводить расчет магнитного поля в областях со сложной конфигурацией границ.

Вторая глава посвящена разработке математической модели магнитного поля на основе интегро-интерполяционного метода. Для описания сложных границ эффективна сетка с треугольными ячейками и произвольным расположением узлов. Причем, расположение узлов определяется конфигурацией границ объектов, и при линейной интерполяции поведения функции векторного магнитного потенциала интерполяционные полиномы имеют достаточно простой вид, определяющий производительность вычислительного процесса.

Рассматривается задача расчета магнитного поля при следующих допущениях: поле плоскопараллельное, стационарное; среда кусочно-неоднородная; область расчета поля ограничена; расчет проводится относительно векторного магнитного потенциала.

Для получения математической модели магнитного поля интегро-интерполяционным методом использованы уравнения теории поля, записанные в интегральной форме, в частности, закон полного тока:

$$\oint_l \vec{H} dl = i + \int_S \text{rot } \vec{M} dS, \quad (1)$$

где \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля; i — полный ток протекающий через площадь S , ограниченную контуром интегрирования l ; \vec{M} — вектор намагниченности. Учитывая соотношение $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ и закон Стокса, выражение (1) записывается в следующем виде:

$$\oint_l \frac{1}{\mu_0} \vec{B} dl = i + \int_l \vec{M} dl. \quad (2)$$

Расчетная область покрывается сеткой с треугольными ячейками произвольной формы (рис.1). Магнитные проводимости в ячейках равны

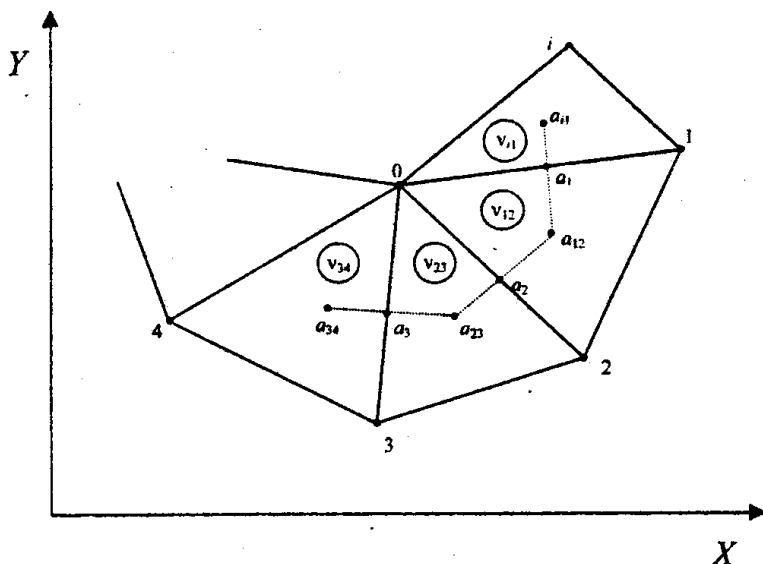


Рис. 1. Узел сетки с примыкающими элементами и узлами

соответственно $V_{12}, V_{23}, V_{34} \dots V_{11}$ и постоянны в пределах ячейки. Интегрирование проводится по контуру, образуемому пересечением некоторой поверхности S и плоскости расчетной области. В качестве поверхности S принимается такая, следом сечения которой плоскостью $Z = const$ является линия $a_{12}a_{23}a_{34} \dots a_{11}$, образующая многоугольник с вершинами $a_{12}a_{23}a_{34} \dots a_{11}$ в центрах тяжести треугольных ячеек сетки. Точки пересечения поверхности S со сторонами ячеек обозначаются через a_i , где i и $i+1$ — индексы, соответствующие номерам первого и второго узла ячейки в направлении обхода контура. Следует отметить, что этот многоугольник содержит внутри себя только один узел 0, относительно потенциала которого выводится конечно-разностное уравнение. Очевидно, последовательно рассчитывая интеграл (2) для каждого треугольника примыкающего к расчетному узлу i , затем, просуммировав полученные интегралы, найдем полный интеграл (1) расчетной области. Для

определения составляющих индукции B_x, B_y , как функции векторного магнитного потенциала и декартовых координат, предлагается два способа. первый из которых основан на использовании теоремы о полном дифференциале. а второй заключается в определении частных производных линейной функции, интерполирующей потенциал внутри треугольного элемента.

После подстановки выведенных выражений для составляющих индукции в уравнение (2) и группировки коэффициентов при одноименных узлах получен окончательный вид уравнения:

$$\sum_{n=1}^m A_n t_n - A_0 t_0 = i_0 + M_0, \quad (3)$$

где t_n — коэффициент при потенциале с индексом n ; t_0 — коэффициент при потенциале узла, относительно которого составляется разностное уравнение; M_0 — намагниченность области, ограниченной контуром l ; i_0 — ток через поверхность, ограниченную контуром интегрирования.

Если в МКЭ с линейной аппроксимацией произвести суммирование функционалов по всем прилегающим элементам и сгруппировать коэффициенты при потенциалах, то получим уравнение абсолютно аналогичное уравнению (3). Таким образом, данное уравнение является основным для МКЭ с линейной аппроксимацией при составлении системы уравнений относительно узлов. Также показано, что уравнения для равномерной и неравномерной прямоугольной сетки МКР являются частными случаями выведенного более общего уравнения (3).

Задание граничных условий в указанной постановке задачи представляет собой естественный процесс записи интегрального уравнения (2) вдоль границы при известном значении плотности тока, векторного магнитного потенциала, либо поведения составляющих вектора магнитной индукции. Рассмотрены вопросы моделирования постоянных магнитов и определения локальных характеристик магнитного поля. Предложена линейная интерполяция поведения магнитной индукции в пределах ячейки

и всей расчетной области, снижающая погрешность расчета интегральных параметров магнитного поля.

В третьей главе предлагается следующая методика определения пусковых характеристик вентильного электропривода из мгновенной картины магнитного поля.

1. Определение минимального количества и конфигурации взаимных положений зубцов и полюсов, исходя из конструкции электромеханического преобразователя и алгоритма работы системы управления.

2. Ввод геометрических и электромагнитных параметров модели в программу моделирования магнитного поля в устройствах электромеханики, для каждого взаимного положения зубцов и полюсов.

3. Численный расчет магнитного поля и определение локальных и интегральных параметров модели при отсутствии токов в обмотках, определение реактивного момента.

4. Задание токов в обмотках с учетом режима и алгоритма работы системы управления при пуске.

5. Численный расчет магнитного поля и определение локальных и интегральных параметров модели, определение электромагнитного момента.

6. Расчет интегрального пускового момента электродвигателя с учетом реактивных моментов и получение зависимостей пускового момента от тока в обмотках.

Далее по тексту диссертации раскрываются основные этапы и особенности применения предлагаемой методики на примере вентильного электродвигателя (рис. 2), включающего в себя устройство управления (УУ), инвертор (И), электромеханический преобразователь (ЭМП) и датчик положения ротора ДПР. Для определения повторяющихся взаимных положений зубцов и полюсов определяют положение якоря и индуктора в

середине межкоммутационного интервала.

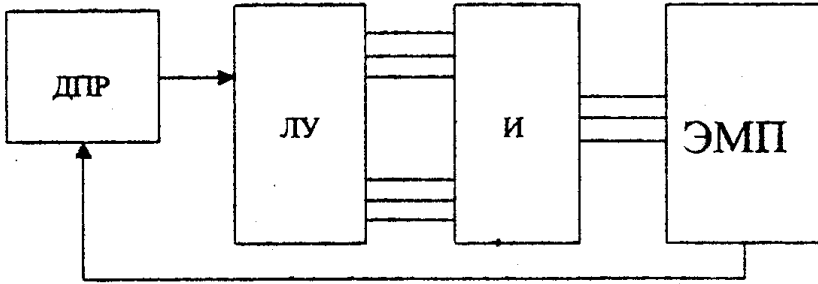


Рис. 2. Структурная схема вентильного электродвигателя

Определение электромагнитных сил и момента производится из

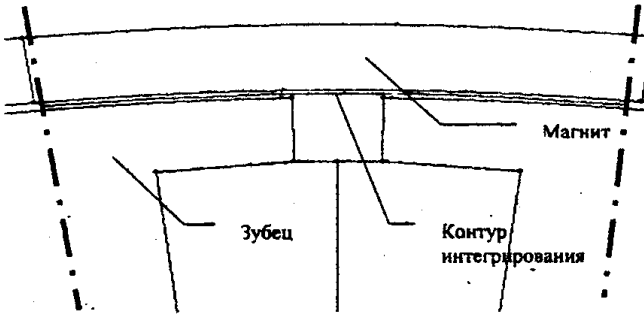


Рис. 3. Проведение контура интегрирования в воздушном зазоре

мгновенной картины магнитного поля, путем интегрирования тензора натяжения по контуру (рис. 3) в воздушном зазоре двигателя, охватывающему

одно зубцовое деление двигателя:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_0} \oint ((\vec{B}\vec{n})\vec{B} - \frac{1}{2}B^2\vec{n})dS, \quad \vec{M} = \frac{\vec{r}}{\mu_0} \oint ((\vec{B}\vec{n})\vec{B} - \frac{1}{2}B^2\vec{n})dS.$$

При расчетах по п.6 предлагаемой методики из полного момента вычитается (или складывается, в зависимости от знака) реактивный момент и определяется момент электромагнитный. Приведенные в тексте диссертации соотношения позволяют учитывать различие алгоритмов коммутации и схмотехнические особенности построения вентильных двигателей.

В четвертой главе описаны алгоритмы и программная реализация расчета магнитного поля и его характеристик. На основе единого подхода

разработан интерфейс формирования задачи и расчета магнитного поля. Формирование геометрии задачи осуществляется специализированным графическим редактором в котором пользователь задает блоки и ребра, ограничивающие подобласти с различными физическими свойствами, задаваемыми в виде таблиц или графиков. Генерация исходных данных для формирования матрицы осуществляется при триангуляции области с начальным фронтом в виде границ подобластей. Разработанное программное обеспечение позволяет проводить расчет плоскопараллельных стационарных магнитных полей в линейной или нелинейной постановке задачи и реализующее дополнительные возможности, позволяющие проводить расчеты по предложенной в гл. 3 методике. В частности, поворот статора относительно ротора на произвольный угол. Для облегчения анализа информации и ее наглядности разработан постпроцессор, позволяющий путем задания контура интегрирования выводить информацию в виде таблицы, графической зависимости и интегральных значений. В приложении приведен интерфейс программной реализации.

В пятой главе приведены примеры численного моделирования и поверочных расчетов тягового усилия магнитоэлектрического возбудителя упругих колебаний и пусковых характеристик вентильных электродвигателей.

На базе описанной методики был проведен расчет электродвигателя инвалидной коляски. По своей конструкции ЭМП представляет собой трехфазную синхронную машину. Поток возбуждения создается магнитом из магнитопласта на основе материала $NdFeBr$. По результатам численных расчетов и данным экспериментального определения пускового момента электропривода были построены пусковые характеристики привода (рис.4). Из сравнения характеристик видно существенное расхождение данных численного расчета и эксперимента (более чем в два раза)

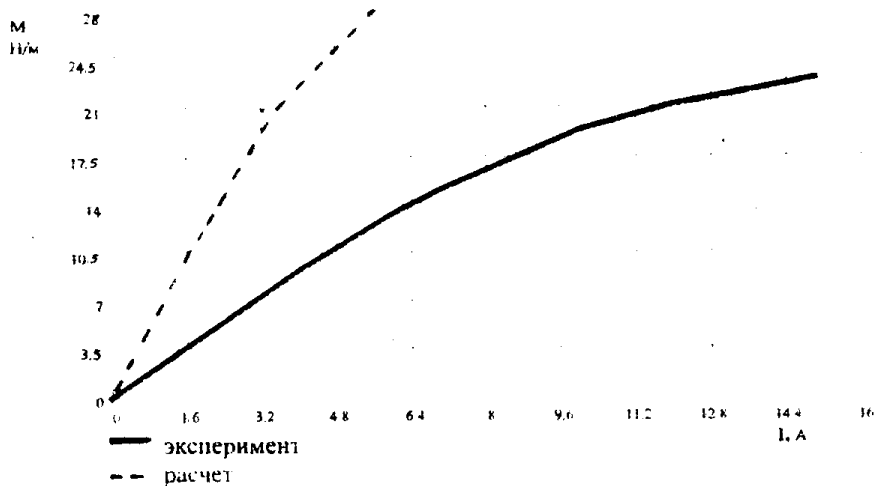


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные пусковые характеристики вентильного двигателя инвалидной коляски

вследствие несоответствия параметров магнита индуктора заявленным. Изменение технологии намагничивания индуктора привело к увеличению пускового момента на 20%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о достаточно высокой точности предложенной математической модели и ее эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлена совокупность новых теоретических результатов и практических решений научной проблемы расчета пусковых характеристик вентильного электродвигателя. Основные научные, теоретические и практические результаты диссертационной работы:

1. Разработана методика расчета пусковой характеристики вентильного электродвигателя с определением электромагнитных сил из мгновенной картины магнитного поля, учитывающая реактивные моменты, реальную конфигурацию и свойства магнитопроводов. Исключение расчетов в повторяющихся элементах конструкции электромеханического

преобразователя позволяет уменьшить объем вычислений.

2. На основе аппроксимации интегральных уравнений магнитного поля интегро-интерполяционным методом разработана новая математическая модель магнитного поля, свободная от ограничений вариационного подхода, не требующая доказательства адекватности дифференциальным или интегральным уравнениям теории поля и упрощающая задание граничных условий.

3. Предложенный метод расчета магнитного поля позволил получить новое решение задачи повышения точности определения составляющих электромагнитной силы на основе интерполяции поведения магнитной индукции в пределах расчетной области.

4. Выведены расчетные соотношения, позволяющие на основе заданных параметров системы управления электродвигателем, таких как алгоритм коммутации обмоток двигателя, значение функции ШИМ и принципиальной электрической схемы, определить исходные данные для расчета пускового момента электродвигателя.

5. Создан пакет прикладных программ, позволяющий рассчитывать неоднородное нелинейное плоскопараллельное магнитное поле, проводить расчет пусковых характеристик вентильного электродвигателя по предложенной выше методике, и реализующий автоматизированное изменение взаимного положения статора относительно ротора.

6. Показано, что проведение поверочных расчетов по предлагаемой математической модели магнитного поля и методике определения пусковых характеристик вентильного электродвигателя позволяет проводить работы по оптимизации конструкции ЭМП и выявить количественное и качественное отклонение свойств материалов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Таранов И.Н. Определение магнитных полей методом конечных

разностей в случае наличия границ сложной конфигурации // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Тезисы докладов международной молодежной научно-технической конференции. – Уфа, 1999.

2. Таранов И.Н., Трофимова С.Н. Анализ и перспективы развития методов расчета устройств электромеханики // Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы межвузовской науч.-техн. конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2000.

3. Таранов И.Н. Вентильные электродвигатели для медицинских установок // Вклад молодых ученых и специалистов в развитие науки и культуры г. Челябинска. Состояние. Проблемы. Перспективы: Сб. научн.статей. – Челябинск, 2000. – Ч. 2.

4. Таранов И.Н. Расчет магнитного поля интегро-интерполяционным методом и определение электромагнитных сил // Автоматизация и информатизация в машиностроении. (АИМ 2000): Сб. трудов Первой международной электронной науч.-техн. конференции. – Тула: ТулГУ, 2000.

5. Таранов И.Н. Определение пусковых характеристик вентильного электропривода в полевой постановке задачи // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики: Материалы международной науч.-практ. конф.: В 10 ч. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000.

6. Таранов И.Н., Воронин С.Г., Тиманов А.В. Определение параметров магнитоэлектрического возбудителя упругих колебаний по результатам расчета магнитного поля в зоне преобразования // Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия: Сб. материалов международного научного симпозиума. – Орел, 2000.

7. Таранов И.Н. Применение интегро-интерполяционного метода к решению задач магнитного поля // Электромеханика, – 2001, №3. – С. 12-15.

