

На правах рукописи



Липин Артем Вадимович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХКООРДИНАТНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ МАНИПУЛЯТОРОВ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Завьялов Валерий Михайлович

Официальные оппоненты:

Михальченко Геннадий Яковлевич доктор технических наук, профессор,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), профессор кафедры промышленной электроники

Котин Денис Алексеевич кандидат технических наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» ФГБОУ ВО (ИРНИТУ)

Защита состоится 30.06.2015 в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28. Факс (3842) 36-16-87, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте

<http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина
Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в мире наметились тенденции качественного развития сферы робототехники как общепромышленного, так и специализированного направления. Прогресс наблюдается как в области систем управления и программного обеспечения, так и в совершенствовании конструкции механизмов. В частности, большое значение приобретает разработка новых манипуляторов – исполнительных органов, в связи с повышением требований, предъявляемых к их подвижности. Это становится особенно важным при создании роботов с адаптивной системой управления.

Сервоприводы современных манипуляторов, при всех своих достоинствах, обладают только одной степенью свободы, что накладывает определенные ограничения на конструкцию установок, а именно, ограниченную подвижность. На каждую необходимую степень свободы требуется установка отдельного привода, что ведет к усложнению и удорожанию конструкции в целом, а также излишней вычислительной нагрузке на систему управления. Преодолеть эти ограничения возможно путем создания электромеханических систем, обеспечивающих управление движением исполнительного органа в многомерном пространстве.

В настоящее время в мире не существует общепринятой концепции создания таких систем, и многие исследовательские коллективы предлагают свои решения. При разработке мультикоординатных электромеханических преобразователей (МЭМП), определенную трудность представляют задачи, связанные как с пространственной геометрией, так и со схмотехникой преобразователя, а также с разработкой алгоритмов функционирования системы управления. Например, при создании сферических двигателей, криволинейность поверхности вынуждает отказаться от привычных схем расположения полюсов и способов управления, а большое количество полюсов вынуждает разрабатывать новые алгоритмы функционирования. Решение данных задач в контексте разработки МЭМП определяет актуальность темы исследований.

Степень разработанности темы исследования

В научной литературе развитие данной идеи прослеживается с восьмидесятых годов двадцатого века. Например, в 1986 году И.П. Копыловым было предложено теоретическое описание сферического асинхронного электродвигателя. В институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана при сотрудничестве с проф. Ричардом Валласом (Lehigh University, США) с 1993 года ведутся исследования по разработке и применению в робототехнике многокоординатных устройств на основе использования двигателей прямого управления.

В настоящее время разработка мультикоординатных электромеханических систем ведется как в ведущих европейских университетах, так и в ряде стран Азии. Предлагаются различные конструкции многокоординатных электродвигателей постоянного и переменного тока. Подходы к реализации данной идеи принципиально различаются, от объединения нескольких приводов в одном с использованием ряда оригинальных конструктивных решений, до разработки сферического асинхронного электродвигателя. Наиболее проработанным является проект германского университета Aachen при финансовой поддержке концерна Volkswagen, посвященный разработке и созданию прототипа многокоординатного двигателя «Planar

Motor». В ходе работ над проектом исследователи смогли не только описать, но и создать функциональный прототип. Однако он оказался сложным для управления, а также имел зоны, в которых позиционирование ротора было затруднено. На текущий момент задача создания мультикоординатных электромеханических систем не имеет окончательного решения.

Цели и задачи

Цель работы заключается в разработке трехкоординатного электропривода с мультикоординатным электродвигателем с постоянными магнитами, обеспечивающим сложное перемещение исполнительного органа.

Идея работы заключается в организации сложного движения исполнительного органа при помощи разработанного в ходе работы трехкоординатного электропривода, с использованием одного электромеханического преобразователя, конструкционно моделирующего шаровидный сустав.

Задачи работы:

1. Разработка и обоснование конструкции мультикоординатного электродвигателя для обеспечения его полной управляемости.
2. Разработка математической модели трехкоординатного электропривода.
3. Разработка алгоритмов управления трехкоординатным электроприводом, обеспечивающих движение исполнительного органа по заданной траектории.
4. Создание прототипа трехкоординатного электропривода, проведение экспериментальных исследований, подтверждающих его работоспособность.

Методы и методология исследований

В процессе выполнения работы использовались методы решения систем линейных алгебраических уравнений; теория электромагнитного поля; методы планирования эксперимента и обработки результатов при лабораторных испытаниях разработанных устройств. Реализация алгоритмов управления электроприводов производилась на базе микропроцессора Atmega с использованием языка программирования C/C++.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Равномерное распределение электромагнитов статора и постоянных магнитов ротора обеспечивает идентичный характер сил их взаимодействия для различных направлений движения ротора.
2. Зависимость полезной составляющей силы взаимодействия полюсов ротора и электромагнитов статора от расстояния между ними аппроксимируется функцией Гаусса с погрешностью, не превышающей 4 % от ее максимального значения.
3. Для формирования управляющего воздействия достаточно учитывать влияние электромагнитов статора, попадающих в зону эффективного взаимодействия с полюсами ротора.

Научная новизна

1. Предложен подход к математическому описанию электромагнитных процессов, протекающих в мультикоординатном электромеханическом преобразователе (МЭМП).
2. Получены формулы для расчета сил взаимодействия постоянных магнитов ротора и электромагнитов статора, в зависимости от их формы, взаимного расположения и тока, протекающего по обмотке.

3. Разработаны оригинальные алгоритмы управления электромагнитами для перемещения ротора МЭМП по заданной траектории.

Теоретическая и практическая значимость

Предложена и обоснована оригинальная конструкция мультикоординатного электромеханического преобразователя, отличающегося способом распределения постоянных магнитов на поверхности ротора и электромагнитов на поверхности статора, создан функциональный прототип.

Полученные научные результаты могут быть использованы как основа для дальнейших исследований при создании и совершенствовании электроприводов исполнительных органов робототехнических установок.

Предложенные подходы к математическому описанию электромеханических процессов в МЭМП, а также алгоритмы перемещения ротора МЭМП могут быть использованы для синтеза и настройки систем управления изменением положения исполнительного органа, приводимого в движение МЭМП.

Созданный прототип многокоординатного электромеханического преобразователя может быть использован для обучения студентов по дисциплинам: теория электропривода, автоматизация производственных процессов, преобразовательная и микропроцессорная техника направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Электропривод и автоматика», для повышения навыков программирования, практического ознакомления с элементной базой, а также для расширения кругозора в области построения современных электроприводов.

Степень достоверности

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью принятых допущений при постановке задач, использованием апробированных методов и фундаментальных положений механики, физики, математики и программирования.

Апробация работы

Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях:

– Четвертая Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 80-летию СибГИУ, 12-15.10.2010, г. Новокузнецк.

– Шестая Всероссийская конференция по автоматизированному электроприводу и пром. электронике АЭПЭ 2014 25-27.11.2014, г. Новокузнецк.

– Первая Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» -5.12.2014 г. Кемерово.

Работа проводилась при финансовой поддержке ООО «Центр внедрения инноваций» в рамках гранта правительства Российской Федерации по программе «У.М.Н.И.К.» (договор №067).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, при этом 3 работы опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, приложений и содержит 149 страниц текста, 101 рисунок, 7 таблиц и список литературы, содержащий 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

Обоснование конструкции электромеханического преобразователя.

К конструкции мультикоординатного электромеханического преобразователя предъявляется несколько важных требований, а именно, обеспечение управляемого перемещения ротора с тремя степенями свободы с достаточной точностью позиционирования. Конструкция должна давать возможность реализации как можно более простых алгоритмов управления, для снижения нагрузки на управляющую часть и упрощение математического аппарата. Ротор должен иметь полную управляемость, плавность хода и развивать нужный момент на валу. Конструкция МЭМП должна быть не только теоретически обоснованной, но и практически реализуемой.

Проанализировав идеи и наработки, встречающиеся в научной литературе, для основы формирования технического задания к прототипу трехкоординатного электропривода, был выбран проект группы ученых германского университета Aachen, отличающийся наилучшими характеристиками и проработанностью. Данный многокоординатный электродвигатель «Planar motor» (рис. 1) представляет собой сферическую электрическую машину с постоянными магнитами.

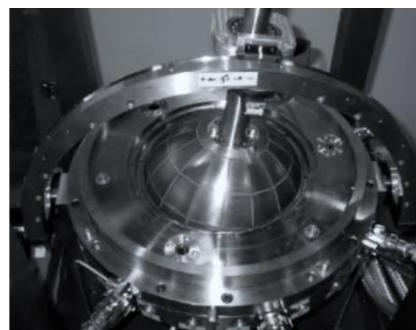


Рисунок 1 – Сферический двигатель «Planar motor»

Статор содержит 96 независимых обмоток, представляющих собой конические катушки, расположенные концентрическими кругами на внутренней поверхности полусферы. На роторе в виде сферы меньшего диаметра расположено 112 полюсов из постоянных магнитов различной конфигурации. Данная конструкция позволила добиться движения с двумя степенями свободы, однако привела к необходимости создания достаточно сложного математического описания, вследствие неравномерности распределения магнитного поля ротора и большого количества уникальных сценариев взаимодействия полей ротора и статора для различных положений. Вследствие подобного расположения полюсов прототип «Planar motor» не может функционировать без датчика положения.

Исходя из технических параметров рассмотренных в литературном обзоре прототипов, а также из назначения трехкоординатного электропривода были приняты следующие предполагаемые параметры МЭМП:

- потребляемая электрическая мощность: не более $P_{сп}=1,5$ кВт;
- развиваемый момент: не менее $M=40$ Нм;
- угловая скорость вращения: не более $\omega=6$ рад/с;
- абсолютная точность позиционирования: не менее 1 мм;
- задержка по каналу управления не должна превышать 10 мс.

Прототип должен обеспечивать движение ротора с тремя степенями свободы на угол поворота 360° при отсутствии исполнительного органа и не менее 150° при его наличии.

Одной из существенных особенностей прототипа МЭМП является равномерность распределения полюсов по поверхности ротора и статора по критерию равноудалённости соседних полюсов. Это позволило добиться сокращения количества сценариев взаимодействия полей до одного универсального сценария.

Решение задачи равномерного распределения полюсов ротора по сфере основано на методе вписанного правильного многогранника, позволяющего получить несколько частных решений распределения полюсов, в зависимости от вида многогранника. Суть метода заключается в расположении распределяемых объектов в вершинах вписанного в сферу правильного многогранника, либо в точках пересечения поверхности сферы с перпендикулярами, восстановленными из центра его сторон. Таким образом, было получено десять вариантов полюсности ротора – тетраэдр (4,6), куб (8,6), октаэдр (12,6), додекаэдр (30,20) и икосаэдр (30,12).

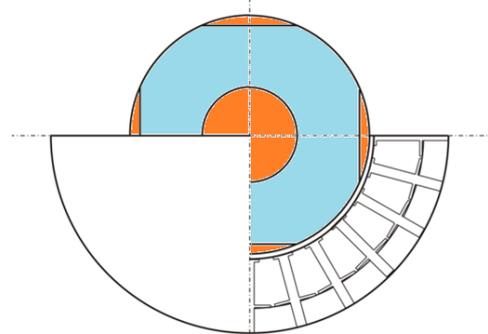


Рисунок 2 – Вариант конструкции МЭМП

Для повышения точности позиционирования ротора, количество полюсов статора должно превышать количество полюсов ротора. Задача распределения электромагнитов статора, вследствие их большого количества, решается приближенно, при использовании сформулированного критерия условной равномерности.

Критерий условной равномерности – при распределении по поверхности объектов с поперечным сечением радиуса r , в окружность радиуса $K \cdot r$, проведенную из центра произвольного объекта, должны попадать семь объектов, включая данный. Целочисленный коэффициент K зависит от радиуса поперечного сечения электромагнита и радиуса сферы внутренней поверхности статора:

$$K = \text{Int} \left(\sqrt{7 \left(4R^2 - 7 \text{Int} \left(\frac{4R^2}{7r^2} \right) r^2 / 7r \text{Int} \left(\frac{4R^2}{7r^2} \right) \right)} + 7r \right) + 1. \quad (1)$$

Для управляемого перемещения в нескольких направлениях на роторе должно соблюдаться чередование полюсов, причем согласно принятой концепции равномерности распределения и единообразия сценариев, чередование также должно иметь симметричную картину по всем направлениям движения ротора. Проблема чередования полюсов решается использованием магнитов нестандартной формы. Форма таких магнитов, выделенных разными цветами, на примере МЭМП с 6-ю полюсами, показана на рис. 2. Данное распределение позволяет добиться полной управляемости электропривода.

Математическое описание электромеханической системы.

На данном этапе следует выделить три основные задачи:

- получение зависимости силы взаимодействия электромагнита и постоянно-го магнита от их формы и взаимного расположения;
- получение математической модели, отражающей электромеханические процессы, протекающие в МЭМП;

– разработка математических приемов, позволяющих упростить пространственно-координатные вычисления, в целях снижения вычислительной нагрузки на систему управления МЭМП.

Для определения сил магнитного взаимодействия была получена формула расчета магнитной индукции, создаваемой прямоугольным витком в произвольной точке пространства на основе закона Био-Савара-Лапласа. Формула была применена для обеих пар противоположных сторон, параллельных ОХ и ОУ.

Для пары проводников, параллельной оси ОХ:

$$B_{r_0}^{y1} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi\sqrt{(r_{y1}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2}} \left(\frac{\sqrt{(r_{x2}-r_{0x})^2}}{\sqrt{(r_{x2}-r_{0x})^2 + (r_{y1}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2}} - \frac{\sqrt{(r_{x1}-r_{0x})^2}}{\sqrt{(r_{x1}-r_{0x})^2 + (r_{y1}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2}} \right); \quad (2)$$

$$B_{r_0}^{y2} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi\sqrt{(r_{y2}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2}} \left(\frac{\sqrt{(r_{x1}-r_{0x})^2}}{\sqrt{(r_{x1}-r_{0x})^2 + (r_{y2}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2}} - \frac{\sqrt{(r_{x2}-r_{0x})^2}}{\sqrt{(r_{x2}-r_{0x})^2 + (r_{y2}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2}} \right), \quad (3)$$

где r_{yi}, r_{xi} – координаты сторон рамки с током, м; r_{0x}, r_{0y}, r_{0z} – координаты точки, в которой рассчитывается магнитная индукция, м; I – ток, протекающий по рамке, А.

Используя принцип суперпозиции и теорему косинусов, получаем две составляющие результирующего вектора магнитной индукции в виде:

$$B_{r_0}^y = \sqrt{(B_{r_0}^{y1})^2 + (B_{r_0}^{y2})^2 - 2B_{r_0}^{y1}B_{r_0}^{y2} \frac{r_{y1}r_{y2} - r_{y2}r_{0y} + r_{0y}^2 - r_{y1}r_{0y} + r_{0z}^2}{\sqrt{((r_{y2}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2)((r_{y1}-r_{0y})^2 + r_{0z}^2)}}}; \quad (4)$$

$$B_{r_0}^x = \sqrt{(B_{r_0}^{x1})^2 + (B_{r_0}^{x2})^2 - 2B_{r_0}^{x1}B_{r_0}^{x2} \frac{r_{x1}r_{x2} - r_{x2}r_{0x} + r_{0x}^2 - r_{x1}r_{0x} + r_{0z}^2}{\sqrt{((r_{x2}-r_{0x})^2 + r_{0z}^2)((r_{x1}-r_{0x})^2 + r_{0z}^2)}}}. \quad (5)$$

После преобразований были получены проекции составляющих вектора магнитной индукции по трем осям.

$$B_{r_0,y} = B_{r_0}^x \cos \theta; B_{r_0,x} = B_{r_0}^y \cos \Delta; B_{r_0,z} = B_{r_0}^x \sin \theta + B_{r_0}^y \sin \Delta,$$

где $\angle \theta = B_{r_0}^y \hat{OY}, \angle \Delta = B_{r_0}^x \hat{OX}$.

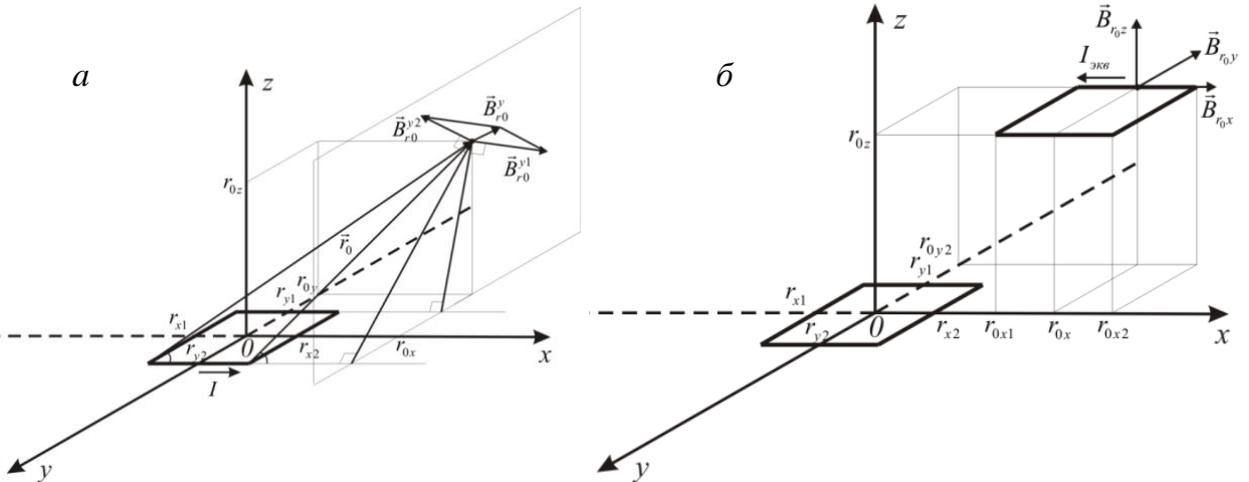


Рисунок 3 – Диаграммы формирования вектора магнитной индукции

Постоянный магнит был заменен одновитковым контуром с эквивалентным током, после чего, согласно закону Ампера, была рассчитана сила взаимодействия.

Для эквивалентного одновиткового контура, с площадью, равной площади постоянного магнита в плоскости XOY, эквивалентный ток определяется по формуле:

$$I_{\text{экв}} = JV / S = Jh, \quad (6)$$

где V – объем магнита, м^3 ; S – площадь эквивалентного контура, м^2 ; h – размер магнита по оси OZ, м; J – остаточная намагниченность магнита, А/м.

Уравнения составляющих силы Ампера, действующей на эквивалентный контур прямоугольной формы, примут вид:

$$F_x = I_{\text{экв}} \int_{r_{0y1}}^{r_{0y2}} B_{r_{0z}}^{r_{0x2}} dr_{0y} + I_{\text{экв}} \int_{r_{0y2}}^{r_{0y1}} B_{r_{0z}}^{r_{0x1}} dr_{0y}; \quad F_y = I_{\text{экв}} \int_{r_{0x1}}^{r_{0x2}} B_{r_{0z}}^{r_{0y2}} dr_{0x} + I_{\text{экв}} \int_{r_{0x2}}^{r_{0x1}} B_{r_{0z}}^{r_{0y1}} dr_{0x};$$

$$F_z = I_{\text{экв}} \int_{r_{0y2}}^{r_{0y1}} B_{r_{0x}}^{r_{0x2}} dr_{0y} + I_{\text{экв}} \int_{r_{0x2}}^{r_{0x1}} B_{r_{0y}}^{r_{0y1}} dr_{0x} + I_{\text{экв}} \int_{r_{0y1}}^{r_{0y2}} B_{r_{0x}}^{r_{0x1}} dr_{0y} + I_{\text{экв}} \int_{r_{0x1}}^{r_{0x2}} B_{r_{0y}}^{r_{0y2}} dr_{0x}.$$
(7)

Для расчета полезной составляющей силы Ампера, действующей на магнит цилиндрической формы, вдоль прямой, соединяющей центр электромагнита и проекцию центра постоянного магнита на ось OX, можно не проводить интегрирование для всех составляющих магнитной индукции. Полезная составляющая силы возникает под действием вертикальной составляющей вектора магнитной индукции $B_{r_{0z}}$, и находится путем интегрирования по эквивалентному контуру:

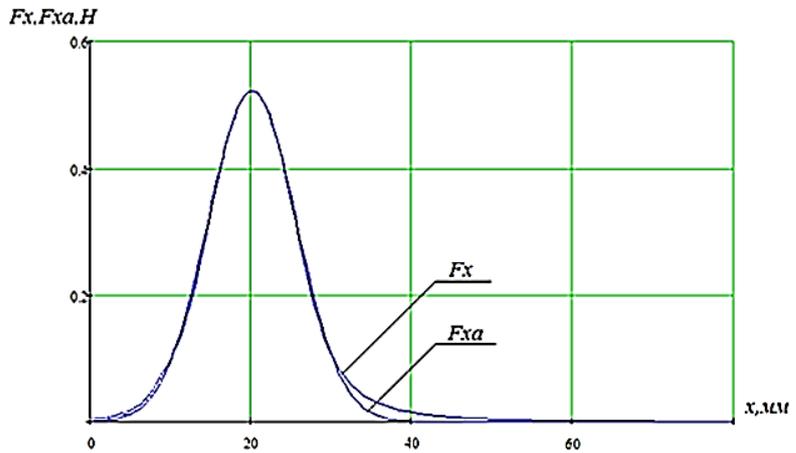


Рисунок 4 – График зависимости горизонтальной составляющей силы взаимодействия от расстояния между центрами магнитов

$$F_x = nI_{\text{экв}} \int B_{r_{0z}} dl, \quad (8)$$

где n – количество витков полюса статора; $B_{r_{0z}}$ – вертикальная составляющая магнитной индукции, Тл.

График зависимости горизонтальной составляющей силы ампера от расстояния между центрами магнитов представлен на рис. 4.

Для дальнейшего моделирования в среде ScicosLab зависимость F_x была аппроксимирована функцией Гаусса:

$$F_x = Ik_1 e^{-\frac{(x-a)^2}{k_2^2}}, \quad (9)$$

где I – ток, протекающий через катушку статора, А; $x = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ – расстояние между центрами катушки и постоянного магнита ротора, м; \vec{r}_1, \vec{r}_2 – радиус векторы для

центров катушки статора и магнита ротора, m ; a – сторона прямоугольного витка катушки, m ; k_1, k_2 – коэффициенты аппроксимации.

Погрешность аппроксимации определялась относительно максимального значения силы по приведенной ниже формуле и не превысила 4 %.

$$\delta = ((F_x - F_{xa}) / \max F_x) 100\%. \quad (10)$$

Полученный базовый набор формул позволяет проводить вычисления магнитной индукции, создаваемой электромагнитом, а также силы взаимодействия между электромагнитом и постоянным магнитом, для определения оптимальной конфигурации полюсов ротора и статора.

Для снижения вычислительной нагрузки на систему управления использовалось двухмерное представление сферической поверхности. Для этого был разработан метод разбиения на базовые сегменты. Сущность метода заключается в выделении на поверхности сферы элементарных участков, поверхность которых можно аппроксимировать плоскостью. Для системы управления, работающей с малыми перемещениями, величина которых не превышает величину базового сегмента, поверхность сферы составит набор плоских участков, образующих эквивалентную плоскость.

Распределенные на поверхности точки являются общими (реперными) для сферической и эквивалентной плоской поверхности. Привязка этих точек осуществляется посредством сопоставления групп точек на сферической поверхности с группами точек на плоскости при помощи угла β , определяемого по формуле:

$$\angle \beta = \arcsin\left(y_0 / \sqrt{x_0^2 + y_0^2}\right). \quad (11)$$

Объединение в группы, как на сферической поверхности, так и на плоскости, происходит по критерию равноудаленности от точки начала координат.

Во время работы МЭМП координатные преобразования между сферической поверхностью и эквивалентной плоскостью осуществляются следующим образом. Текущее положение полюса ротора определяются пересечением окружностей, с центрами в ближайших реперных точках, радиусов r_a, r_b, r_c , определенных при помощи системы уравнений.

$$\begin{cases} (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 + (z - z_a)^2 = r_a^2; \\ (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 + (z - z_b)^2 = r_b^2; \\ (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r_c^2, \end{cases} \quad (12)$$

где x, y, z – координаты полюса ротора, x_i, y_i, z_i – координаты трех ближайших реперных точек (электромагнитов) статора.

Из соответствующих точек на эквивалентной плоскости проводятся окружности радиусов r_a, r_b, r_c , а их пересечение дает точку нахождения полюса ротора на данной поверхности.

Для математического описания электромагнитных процессов, протекающих в катушке статора, был выделен базовый сегмент, образованный семью электромагнитами (рис. 5), так как при распределении катушек согласно критерию условной равномерности, каждая из них окружена шестью соседними. Пренебрегая влиянием катушек, лежащих за пределами базового сегмента, можно составить систему уравнений.

Принимая допущение, что расстояние между центрами катушек одинаково, а следовательно, равна их взаимная индуктивность, было записано уравнение электрического равновесия:

$$U_i = i_i R + \sum_{j=1}^6 L_m \frac{di_j}{dt} + L_i \frac{di_i}{dt} + k \frac{d\psi_m}{dt}. \quad (13)$$

Последнее слагаемое в (13) определяется по формуле:

$$k \frac{d\psi_m}{dt} \approx kBSn \frac{dl}{dt} \approx KI_{\text{эвб}} n \pi r^2 R_r \sqrt{\omega_\alpha^2 + \omega_\beta^2 + \omega_\gamma^2}, \quad (14)$$

где B – магнитная индукция постоянного магнита, Тл; $S = \pi r^2$ – площадь электромагнита, м²; r – радиус электромагнита, м; n – число витков электромагнита, шт; l – перемещение постоянного магнита относительно электромагнита, м; K – конструктивный коэффициент, определяемый параметрами сферического двигателя и величиной зазора; R_r – радиус ротора, м; $\omega_\alpha, \omega_\beta, \omega_\gamma$ – угловые скорости ротора в плоскостях XOY, XOZ и YOZ, рад/с.

Для конструктивных параметров проектируемого прототипа при значениях угловых скоростей 6 рад/с $k(d\psi_m / dt) = 0,217B$, что составляет 2,4% от номинального напряжения (9В). Это позволяет пренебречь данной составляющей в дальнейших расчетах и сделать допущение о том, что для скоростей ротора ~ 6 рад/с $k(d\psi_m / dt) = 0$.

Учитывая, что положение постоянных магнитов полюсов ротора не влияет на собственную индуктивность полюсов статора, и, таким образом, $L_i = \text{const} = L$, запишем систему дифференциальных уравнений, и, после преобразований, получим систему уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{L_m(-5U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7) - LU_1}{-5LL_m + 5L_m^2 - L^2} + \frac{R(L_m(5i_1 - i_2 - i_3 - i_4 - i_5 - i_6 - i_7) + Li_1)}{-5LL_m + 5L_m^2 - L^2}, \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{L_m(-5U_2 + U_1 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6 + U_7) - LU_2}{-5LL_m + 5L_m^2 - L^2} + \frac{R(L_m(5i_2 - i_1 - i_3 - i_4 - i_5 - i_6 - i_7) + Li_2)}{-5LL_m + 5L_m^2 - L^2}, \\ \quad \square \quad \square \quad \square \\ \frac{di_7}{dt} = \frac{L_m(-5U_7 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 + U_6) - LU_7}{-5LL_m + 5L_m^2 - L^2} + \frac{R(L_m(5i_7 - i_1 - i_2 - i_3 - i_4 - i_5 - i_6) + Li_7)}{-5LL_m + 5L_m^2 - L^2}, \end{cases}$$

Данные уравнения были использованы для моделирования в среде ScicosLab. Схема моделирования представлена на рис. 10, а. На входы системы подаются значения напряжений, соответствующие напряжениям силового модуля МЭМП. Выходной переменной данной модели является ток центрального электро-

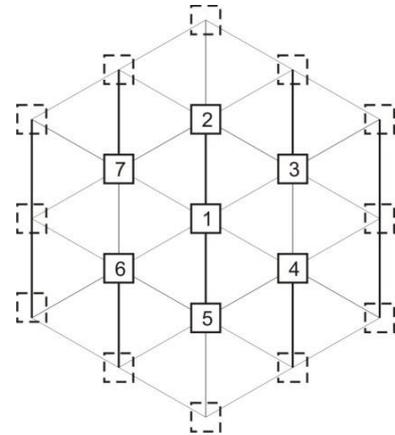


Рисунок 5 – Выделение базового сегмента

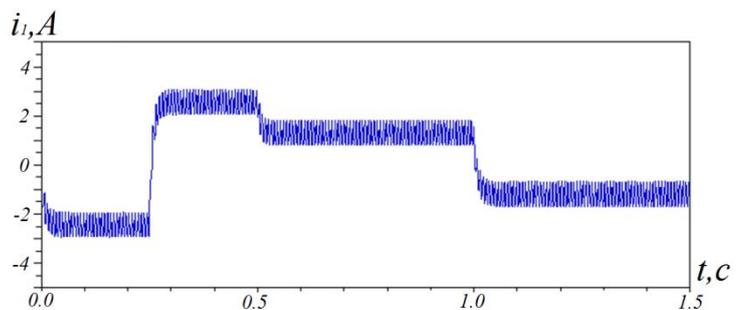


Рисунок 6 – График зависимости $i_1 = f(t)$ полученной из математической модели

магнита базового сегмента – i_l (рис. 6). Ток катушки статора, полученный экспериментально, представлен на рис. 7.

Ток i_l , в соответствии с полученными ранее формулами, преобразуется в силу взаимодействия между катушкой статора и постоянным магнитом ротора. Для получения графика зависимости силы от времени и расстояния между полюсами было получено 37 графиков $Fa=f(t)$ для разных значений x . По результатам экспериментов была построена зависимость $Fa=f(t,x)$ представленная на рис. 8.

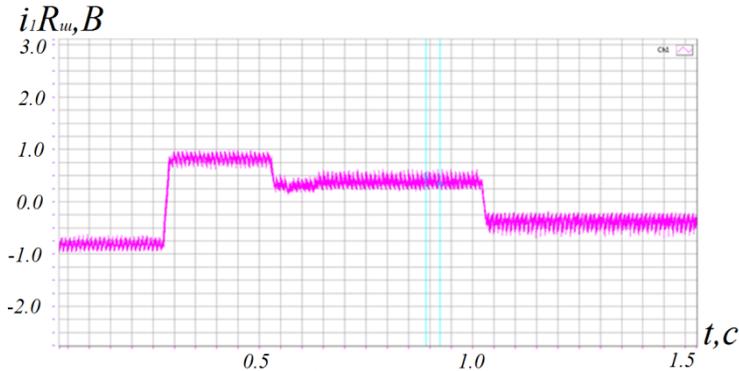


Рисунок 7 – График зависимости $i_l R_u = f(t)$ полученной экспериментальным путем

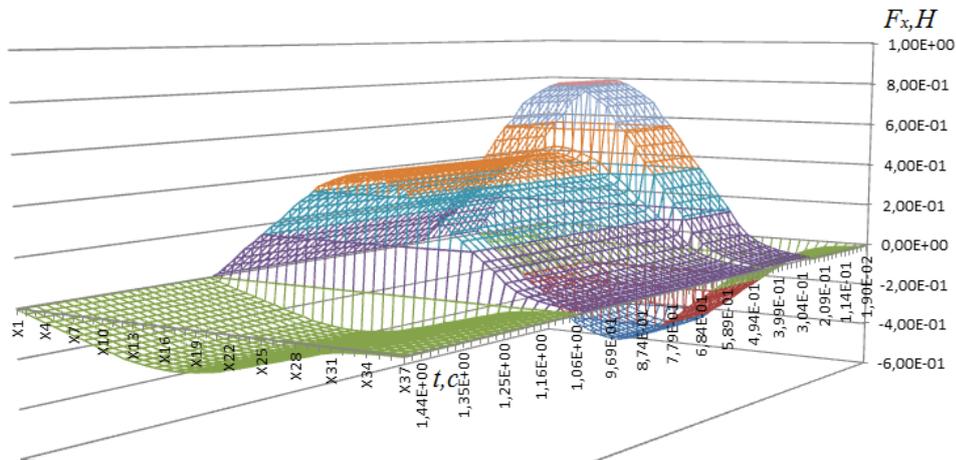


Рисунок 8 – Полезная составляющая силы взаимодействия магнитов при изменении тока электромагнита и расстояния между их центрами $F_x = f(t,x)$

Для расчета погрешности математической модели была предложена формула усредненной погрешности, необходимая для оценки погрешности высокочастотного сигнала программным методом:

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\max \left(\frac{I_M - I_{\text{э}}}{I_M} \right) + \min \left(\frac{I_M - I_{\text{э}}}{I_M} \right) \right) 100\%. \quad (15)$$

Отклонение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 10%, что подтверждает адекватность полученной математической модели, достаточную для практических расчетов.

Уравнения движения.

Перемещение ротора описывается изменением углов φ_α в плоскости XOY, φ_β – в YOZ и φ_γ – в XOZ. Угловые скорости ротора можно представить в виде:

$$\omega_\alpha = \frac{d\varphi_\alpha}{dt}; \omega_\beta = \frac{d\varphi_\beta}{dt}; \omega_\gamma = \frac{d\varphi_\gamma}{dt}. \quad (16)$$

Представим механизм удержания груза с массой переносимого объекта в виде цельного цилиндра массой m_z , радиуса r_z и длины l . Механическую связь между ним и ротором МЭМП представим стержнем массой m и длиной L . Ротор представлен сферой массой M и радиусом R (рис. 9). Стержень, захват и ротор образу-

ют систему с центром масс в точке, расположенной на расстоянии $R+q$ от центра ротора. Значение q определяется из уравнения равенства моментов силы тяжести относительно центра масс, представленного формулой:

$$M(R+q) + m_q \frac{1}{2}q = m_z \left(\frac{l}{2} + L - q \right) + m_{L-q} \frac{1}{2}(L-q), \quad (17)$$

где $m_q = q(m/L)$ – масса части стержня длиной q , кг; $m_{L-q} = (m/L)(L-q)$ – масса части стержня длиной $L-q$, кг.

Для данной системы можно записать уравнения движения:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_\alpha}{dt} = \sum F_\alpha R - F_{трст} R - \sum F_{трэм} R = F_{э\alpha} (R+l); \\ J \frac{d\omega_\beta}{dt} = \sum F_\beta R - F_{трст} R - \sum F_{трэм} R + (m + m_z + M)g \cos(\varphi_\beta)(R+q) = F_{э\beta} (R + L + \frac{l}{2}); \\ J \frac{d\omega_\gamma}{dt} = \sum F_\gamma R - F_{трст} R - \sum F_{трэм} R - (m + m_z + M)g \cos(\varphi_\gamma)(R+q) = F_{э\gamma} (R + L + \frac{l}{2}); \end{cases} \quad (18)$$

$$\cos \varphi_\gamma = \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi_\alpha \cos^2 \varphi_\beta}{\sin^2 \varphi_\alpha \sin^2 \varphi_\beta + \cos^2 \varphi_\alpha \cos^2 \varphi_\beta}}; \cos \varphi_\beta = \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi_\alpha \sin^2 \varphi_\gamma}{\sin^2 \varphi_\alpha \cos^2 \varphi_\gamma + \cos^2 \varphi_\alpha \sin^2 \varphi_\gamma}}; \quad (19)$$

$$J = \frac{2}{3}MR^2 + m\left(\frac{1}{3}l^2 + lR + R^2\right) + m_z\left(\frac{1}{2}r_z^2 + \frac{1}{12}l^2 + (R + L + \frac{1}{2}l)^2\right), \quad (20)$$

где F_α – суммарная сила, прикладываемая ко всем полюсам ротора в плоскости XOY по касательной к поверхности ротора (расчетная сила взаимодействия постоянных магнитов ротора и электромагнитов статора), Н; F_β – суммарная ZOY сила, прикладываемая ко всем полюсам ротора в плоскости XOY по касательной к поверхности ротора, Н; F_γ – суммарная сила, прикладываемая ко всем полюсам ротора в плоскости XOY по касательной к поверхности ротора, Н; $F_{трст}$ – составляющая силы трения, определяемая силой тяжести, Н; $F_{трэм}$ – составляющая силы трения, определяемая взаимодействием постоянных магнитов и железа статора, Н; F_γ – эквивалентная результирующая сила на конце стержня, Н; L – длина стержня, м; q – расстояние от поверхности ротора до центра масс системы ротор-стержень-цилиндр, м.

Граничное условие удержания ротора при отсутствии сдвигающего момента представлено в виде:

$$F_{трст} R + \sum F_{трэм} R = (m + m_z + M)g(R+q). \quad (21)$$

Согласно полученным уравнениям движения, а также формулам расчета полезной составляющей сил взаимодействия, было проведено комплексное моделирование в среде ScicosLab. Схема модели представлена на рис. 10, б.

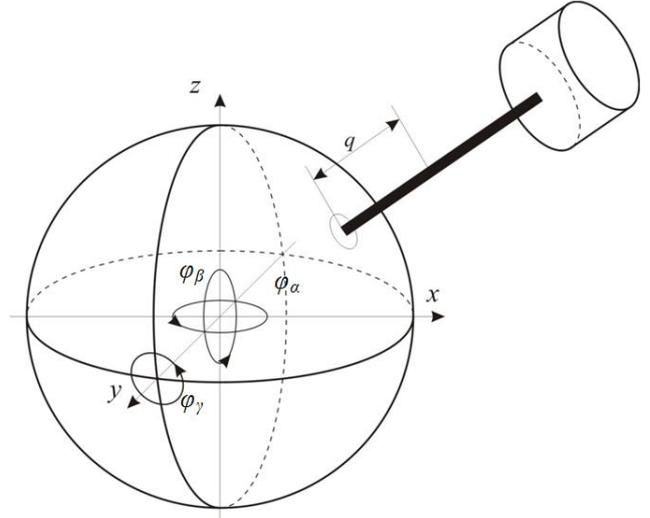
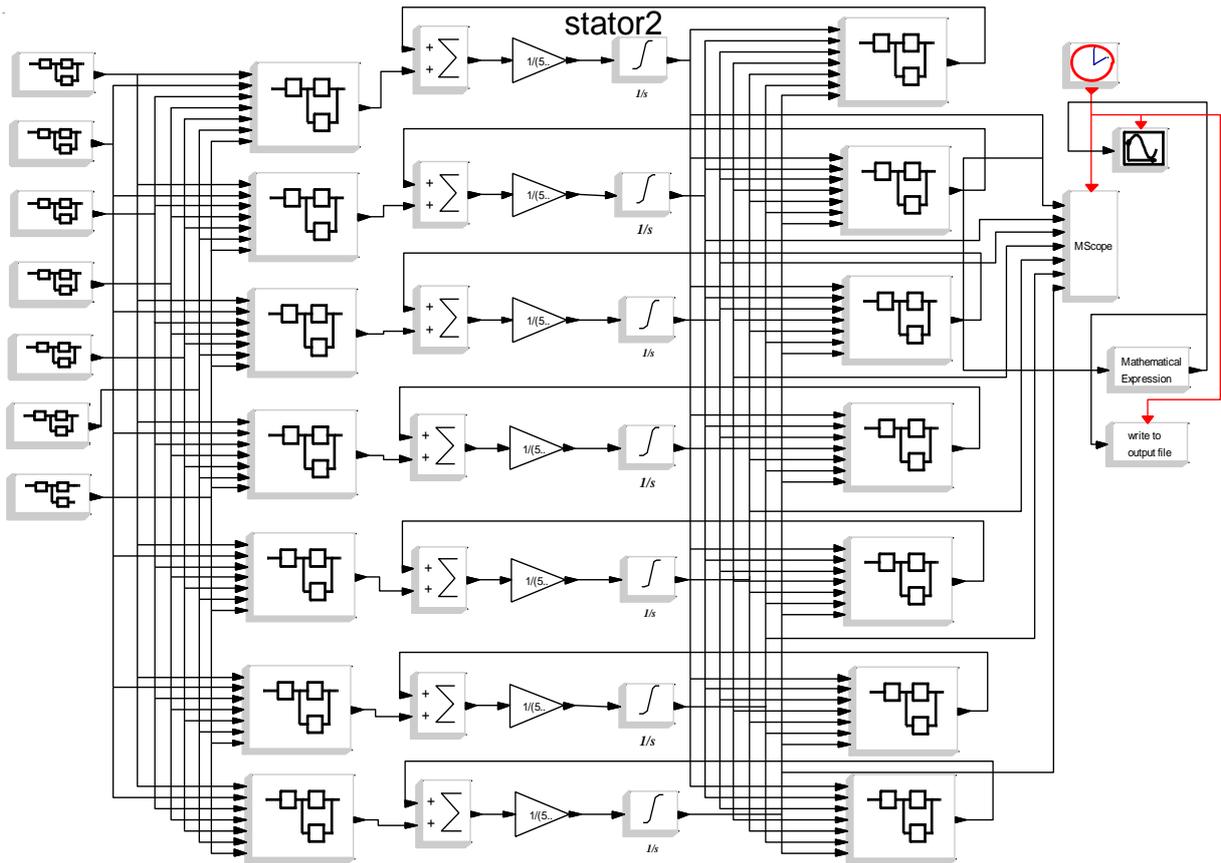
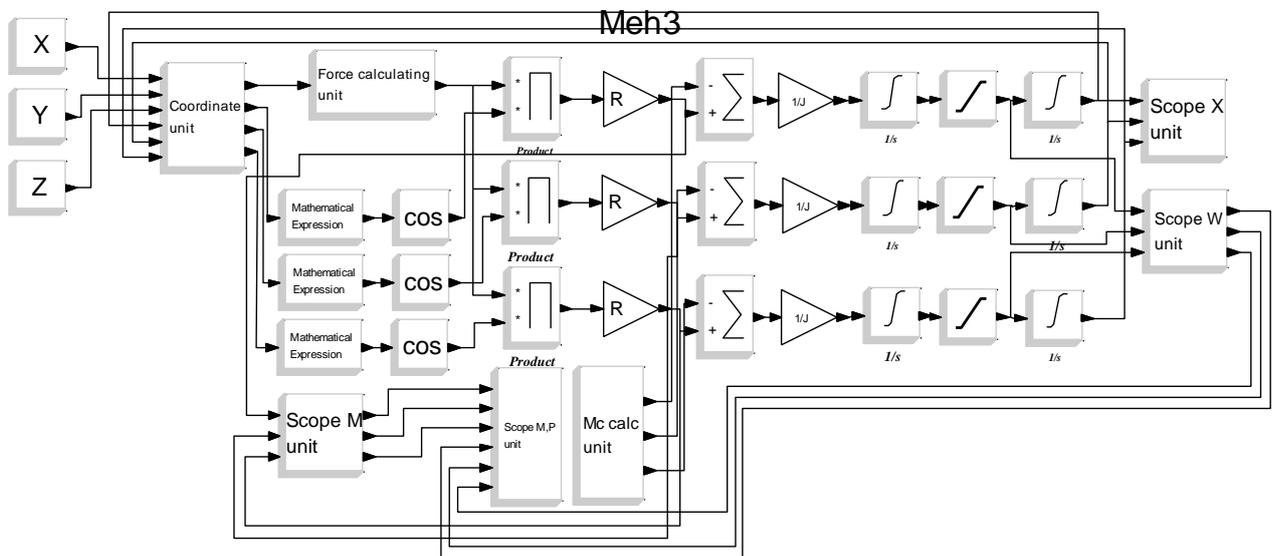


Рисунок 9 – Схема перемещений ротора



a



б

Рисунок 10 – Схема модели в среде ScicosLab

Алгоритмы управления

Траекторию перемещения ротора можно разбить на элементарные перемещения – шаги, размер которых в конечном итоге определяется геометрическими размерами базового сегмента. В ходе работы было сформулировано два подхода к формированию сигналов управления для совершения элементарного шага, в основе которых лежат алгоритмы, названные дискретным и векторным.

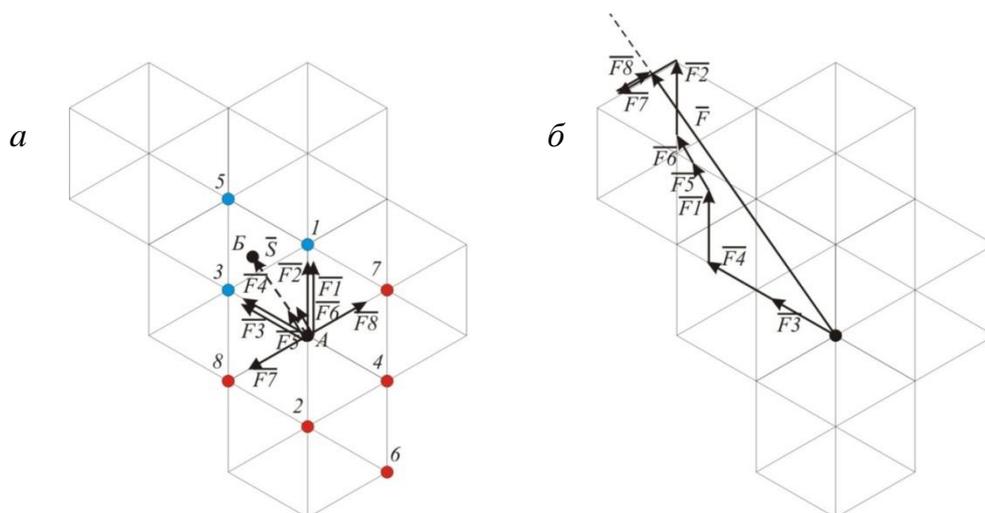


Рисунок 11 – Поясняющая схема для векторного алгоритма

При использовании обоих алгоритмов используется понятие элементарного шага – траектория перемещения ротора разбивается на отрезки величины, определяемой базовым сегментом, поверхность которого, согласно принятому выше допущению, аппроксимирована плоскостью. Элементарное перемещение в пределах базового сегмента является прямолинейным.

На рис. 11, а, для примера, показаны силы, действующие на полюс ротора во время совершения шага, со стороны восьми наиболее характерных полюсов, попадающих в зону эффективного взаимодействия. Зона эффективного взаимодействия определяется зависимостью полезной составляющей силы взаимодействия постоянных магнитов и электромагнитов от расстояния (рис. 4). В данную зону попадают электромагниты, модуль силы взаимодействия с постоянным магнитом полюса ротора, которых превышает 10% от максимального значения.

Оперировать необходимо векторами сил, изменение которых повлияет на полезную составляющую в меньшей степени, например, для данного случая, достаточно уменьшить силу F_8 (рис. 11, б). Таким образом, система управления формирует требуемый вектор силы из доступных векторов. Перемещение ротора при использовании векторного алгоритма носит плавный характер. Недостатком данного алгоритма является необходимость в датчике положения для расчета текущих значений векторов сил действующих на полюс ротора. Вследствие снижения количества эффективно действующих полюсов, задействованных в движении, уменьшается развиваемый момент.

Одним из способов, позволяющих добиться большего момента, является применение дискретного алгоритма. Данный алгоритм имеет много общего с принципом работы шагового двигателя. Изменяя полярность одного, либо группы электромагнитов статора относительно окружающих, мы создаем пространственный экстремум магнитного поля статора, при перемещении которого происходит смещение полюса ротора. В совершении шага задействованы электро-

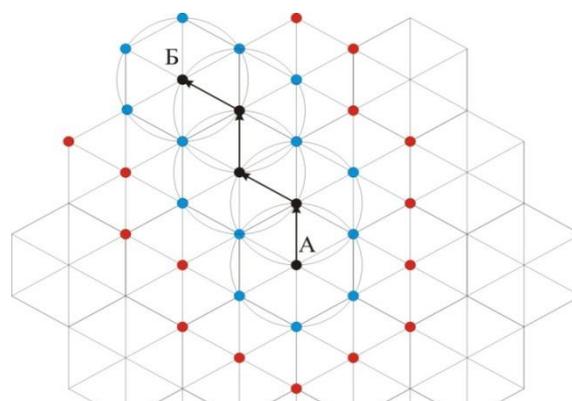


Рисунок 12 – Поясняющая схема для дискретного алгоритма

магниты, создающие наибольшую силу при перемещении, без ограничения тока для управления ее вектором.

При дискретном изменении тока, протекающего через электромагниты, и принятой конфигурации распределения катушек, без учета промежуточных положений (при которых в создании экстремума магнитного поля задействовано меньшее количество электромагнитов), существует ограниченное количество вариантов перемещения, часть из которых более эффективна по величине развиваемого момента. Это объясняется большим числом задействованных в перемещении электромагнитов. Дискретный алгоритм предполагает выбор из этих вариантов одного, наиболее близкого по направлению с рассчитанной ранее траекторией движения.

Так как при данном алгоритме каждый шаг ротора получает привязку к координатам полюсов статора, как и в шаговом двигателе, не требуется обратная связь по положению, для определения его текущей ориентации. Однако траектория перемещения становится ломаной (рис. 12), а быстродействие снижается из-за необходимости проведения расчетов перед каждым шагом. Недостатком данного алгоритма также является то, что промежуточные координаты, не совпадающие с координатами полюсов статора, становятся недостижимыми.

Разработка прототипа и проведение экспериментов

К управляющему преобразователю предъявляется ряд требований. Он не только должен обеспечивать функционирование МЭМП с заявленными параметрами, но и способствовать снижению нагрузки на систему управления. Для этого необходимо иметь возможность управления каждым электромагнитом статора при использовании одного дискретного управляющего сигнала. Это реализуется при помощи реверсивной схемы, имеющей на выходе два состояния, изменяющихся согласно значению входного дискретного сигнала. Для регулирования уровня напряжения предлагается использовать релейное регулирование (рис. 13).

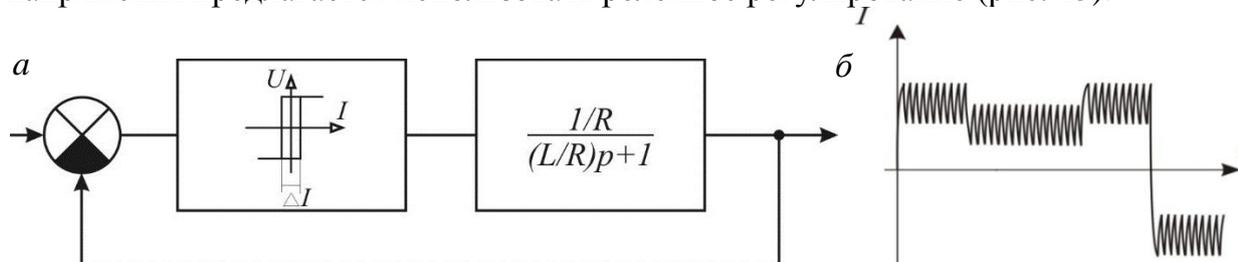


Рисунок 13 – Управление средним уровнем тока, протекающего через катушку

При выборе ширины зоны неоднозначности, на релейный регулятор накладывается ограничение, определяемое максимальной частотой коммутации силовых ключей, которая не должна быть ниже расчетной:

$$f = \frac{1}{t} = \frac{U}{L\Delta I}; \quad (22)$$

Для осуществления экспериментальных исследований и подтверждения выдвинутых положений был разработан и создан стендовой прототип МЭМП.

Конструкция МЭМП представляет собой сферический ротор с 6-ю полюсами – постоянными магнитами (рис. 14, а) и статор в виде полусферы, на которой размещен 61 электромагнит (рис. 14, б, 14, в). Станина статора выполнена частично из пластмассы PLA, внутренняя часть статора, контактирующая с электромагнитами – из пластмассы ABS, более устойчивого к нагреву. Для обеспечения замыкания

магнитного контура статор имеет внутреннюю полость, заполненную порошкообразным магнитопроводящим материалом – мелкодисперсным порошком из электротехнической стали.

Для измерения координат положения вала ротора прототип трехкоординатного электропривода был оснащен измерительным оборудованием. На МЭМП был закреплен координатный стол и боковая координатная шкала.

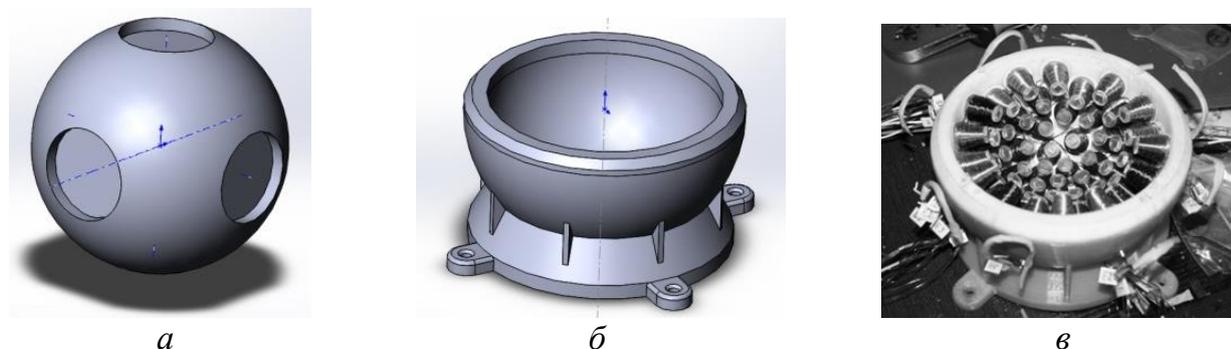


Рисунок 14 – Статор и ротор прототипа МЭМП

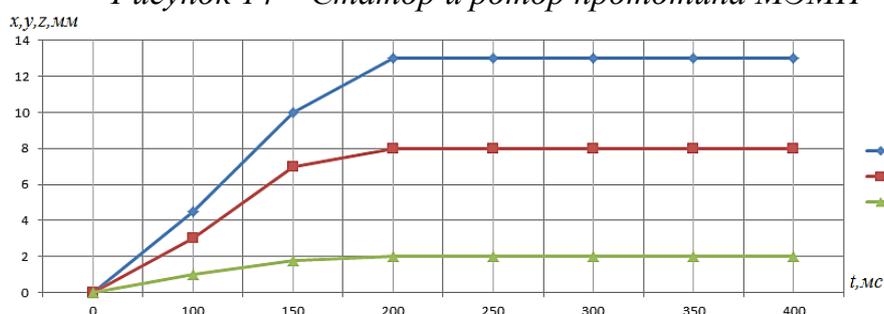


Рисунок 15 – Изменение координат вала МЭМП

Две видеокамеры фиксировали положение ротора через координатную сетку, после чего, по кадрам видеозаписи, снимались координаты положения точки ротора, обозначающей вал. Результаты представлены в виде графиков на рис. 15 (1 шаг) и рис. 16 (6 шагов). В данном случае был применен дискретный алгоритм.

После дополнения математической модели МЭМП уравнениями движения, были получены графики изменения координат полюса ротора, представленные на рис. 17. Параметры моделирования соответствовали параметрам созданного прототипа, при использовании дискретного алгоритма управления. Сравнение результатов моделирования и эксперимента представлено в таблице 1. Разница позиционирования между моделью и прототипом не превысила 11 % от задания. Графики угловых скоростей, суммарного момента и мощности приведены на рис. 18 и рис. 19. В таблице 2 приведены результаты моделирования трехкоординатных электроприводов с различными мощностями, которые позволяют сделать вывод об увеличении КПД с ростом мощности привода.

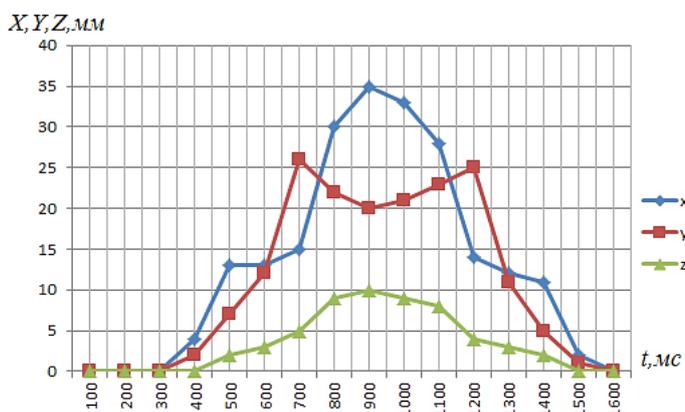


Рисунок 16 – Изменение координат вала

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования и эксперимента

		Модель	Прототип	Δ
$t_{пп}$, мс	x	164	195	31
	y	164	195	31
	z	164	195	31
δ , %	x	4	-7	11
	y	4	14	10
	z	11	0	11

Таблица 2 – Результаты моделирования

$P_{сн}$, Вт	$P_{вых}$, Вт	M , Нм	η , %
1300	155	45	12
1500	240	68	16
2000	400	134	20
3000	780	253	25

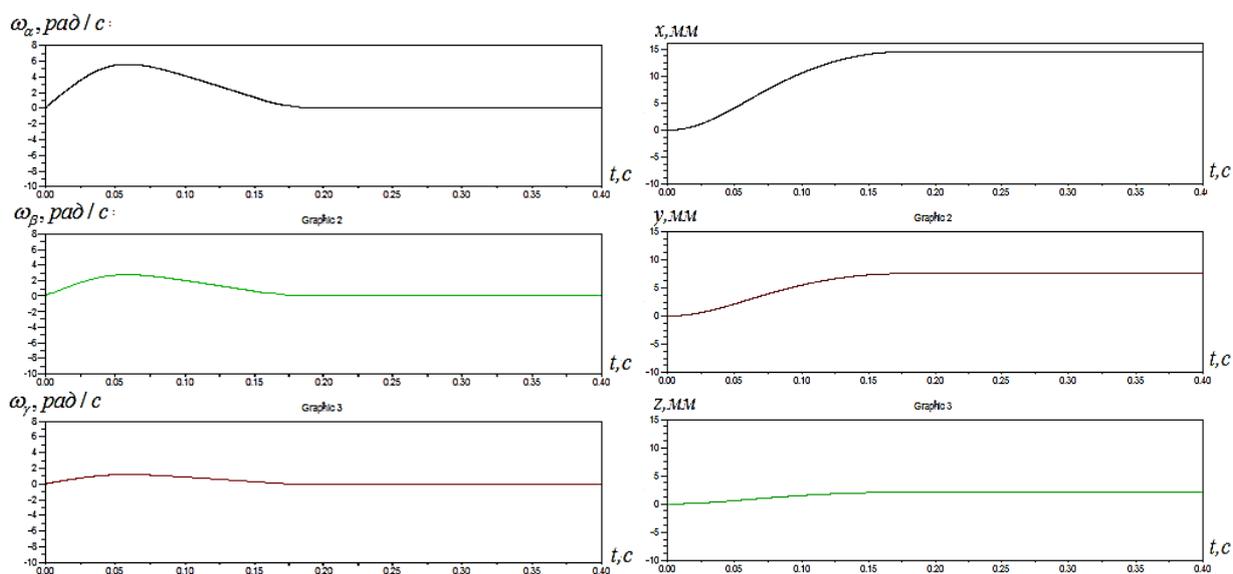


Рисунок 18 – Изменение угловых скоростей вала МЭМП

Рисунок 17 – Изменение координат вала МЭМП

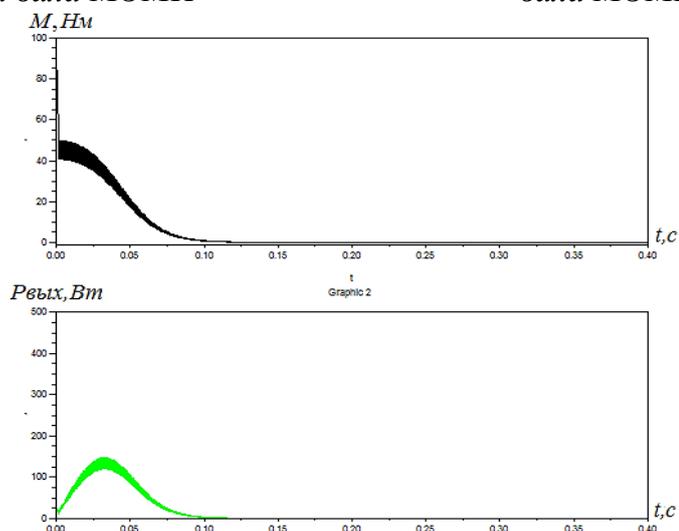


Рисунок 19 – Суммарный момент и мощность

Таким образом, в результате проведенных исследований, доказана работоспособность прототипа трехкоординатного электропривода с МЭМП. Моделирование показало, что при увеличении мощности прототипа увеличивается его КПД. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности данной разработки для применения в легких и средне легких манипуляторах сложной конструкции, причем особенно эффективно трехкоординатный электропривод может быть использован в качестве системы ориентации рабочего органа. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование алгоритмов управления, а также повышение компактности устройства и увеличения его КПД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача создания трехкоординатного электропривода, имеющая большое значение для развития и совершенствование манипуляторов, применяемых в робототехнике.

1. Разработана оригинальная конструкция мультикоординатного электромеханического преобразователя, отличающаяся схемой распределения полюсов на роторе и статоре.

2. Разработана математическая модель МЭМП, позволяющая рассчитать силу взаимодействия полюсов ротора и статора с достаточной степенью достоверности (погрешность составила не более 10% для определения тока и 8% – для расчета магнитной индукции).

3. Разработано два алгоритма управления, векторный и дискретный. Векторный алгоритм позволяет добиться плавной траектории перемещения, в то время как дискретный алгоритм позволяет развить больший момент. По результатам исследований средний показатель КПД при использовании дискретного алгоритма составляет 20%, развиваемый момент достигает 100 Нм.

4. Создан функциональный прототип трехкоординатного электропривода с потребляемой мощностью 1.3 кВт, на котором был поставлен ряд экспериментов, результаты которых подтвердили адекватность математической модели и работоспособность алгоритмов управления.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Липин А.В. Разработка математической модели взаимодействия постоянного магнита и электромагнита // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С. 65-68.

2. Липин А.В. Актуальность и принципы функционирования устройства «Многокоординатный электродвигатель» // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С. 68-69.

3. Липин А.В. Разработка алгоритмов управления устройством «Мультикоординатный электромеханический преобразователь» / А.В. Липин, И.Ю. Семькина, Г.А. Липина // Вестник кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №2. – С. 116-119.

Прочие публикации по теме исследования

4. Липин А.В. Автоматизация вспомогательных операций при ведении буровых работ / А.В. Липин, А.П. Носков, Д.Е. Калагур, В.А. Луценко, Е.А. Перминов // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-

преподавательского состава университета. По результатам III Всероссийской, 54 научно-практической конференции «РОССИЯ МОЛОДАЯ». – Кемерово: КузГТУ, 2009. – С. 222-224.

5. Липин А.В. Разработка методов и средств для повышения энергоэффективности складских мобильных роботов / А.В. Липин, А.П. Носков, Д.Е. Калагур // Сборник докладов студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава университета. По результатам III Всероссийской, 56 научно-практической конференции «РОССИЯ МОЛОДАЯ». – Кемерово: КузГТУ, 2011. – С. 101-102.

6. Липин А.В. Разработка математической модели устройства «Мультикоординатный электромеханический преобразователь» // Роль науки в развитии общества: сборник статей студентов аспирантов, молодых ученых и преподавателей. – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 21-23.

7. Липин А.В. Актуальность и принципы функционирования устройства «Многокоординатный электромеханический преобразователь» // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции. Под общей редакцией В.Ю. Островляника. — Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – С. 57-63.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве:

[3] – формулировка идеи публикации, разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов;

[4,5] – разработка компьютерных программ, проектирование технических решений.