

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Самарский государственный  
технический университет»

*На правах рукописи*



Ратцев Ярослав Алексеевич

**ЛИНЕЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
БОРТОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И  
МЕТОДИКА ЕГО ОПТИМИЗАЦИОННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Макаричев Юрий Александрович

Самара 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ .....	11
1.1 Длинноходовые электромагниты .....	17
1.2 Линейные двигатели переменного тока .....	20
1.3 Линейные двигатели постоянного тока с ограниченным перемещением якоря.....	25
2. РАСЧЕТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛДПТ.....	32
2.1. Определение главных размеров .....	33
2.2. Расчет параметров якоря .....	36
2.3. Расчет магнитной системы.....	39
2.4. Тепловой расчет .....	42
2.4.1. Расчёт двигателя методом тепловых схем замещения.....	43
2.4.2. Численное моделирование температурного поля.....	49
2.5. Алгоритм расчетной математической модели ЛДПТ .....	52
2.6. Выводы по главе 2.....	55
3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	57
3.1. Постановка задачи и критерии оптимальности. ....	57
3.2. Варьируемые переменные.....	68
3.3. Параметры ограничителя.....	70
3.4. Поверхности отклика частных и обобщенных параметров.....	72
3.4.1. Зависимости массы магнитов от варьируемых переменных.....	72
3.4.2. Зависимости потребляемой мощности ЛДПТ от варьируемых переменных .....	77
3.5. Выбор метода оптимизации .....	80

3.5.1. Алгоритм метода Бокса-Уилсона.....	82
3.6. Выводы по главе 3.....	91
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ.....	92
4.1 Обобщенный параметр оптимизации .....	92
4.2 Полный факторный эксперимент .....	94
4.3 Расчет коэффициентов линейной регрессии и крутое восхождение по поверхности отклика.....	98
4.4 Верификация аналитической математической модели численными методами моделирования .....	106
4.4.1 Моделирование электромагнитного поля оптимального варианта ЛДПТ .....	106
4.4.2. Результаты численного моделирования поля .....	108
4.5 Выводы по главе 4.....	110
5. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	112
5.1. Испытания опытного образца ЛДПТ .....	112
5.2. Анализ результатов аналитического расчета, численного моделирования и эксперимента.....	117
5.3. Выводы по главе 5.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	123
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	126
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	137

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Линейные электрические машины с ограниченным ходом якоря находят применение в механизмах, осуществляющих возвратно-поступательное движение рабочего органа или стабилизацию его положения в следящих системах. Использование линейных электромеханических преобразователей вместо двигателей вращательного движения с механизмом в виде кривошипно-шатунного преобразователя, винтовой пары или других подобных механических систем, приводит к существенному упрощению кинематической схемы, повышению КПД и, как правило, повышению точности работы комплекса и его надежности. Исключение дополнительного механического звена компенсирует такие известные недостатки линейных двигателей, как наличие краевых эффектов и более низких удельных массогабаритных показателей по сравнению с двигателями вращательного движения.

Однако, существует ряд проблем при создании линейных двигателей, которые сдерживают использование этих перспективных электрических машин в некоторых специальных приложениях. Например, электромагнитные демпферы систем позиционирования и виброзащиты прецизионных комплексов кроме обеспечения заданного номинального усилия должны иметь стабильную силовую характеристику во всем диапазоне рабочего хода якоря. Кроме этого, двигатель должен обладать высоким электромагнитным и электромеханическим быстродействием. Остаётся актуальной для двигателей и минимизация массогабаритных характеристик. Для обеспечения конкурентных преимуществ двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением должны обеспечивать заданные характеристики при минимальной массе (объёме) постоянных магнитов. Именно стоимость постоянных магнитов в большой мере определяет себестоимость всей машины. Применение линейных двигателей в бортовых системах летательных аппаратов накладывает жесткие ограничения на величину потребляемой мощности. Поэтому разработка и

исследование усовершенствованных специальных электрических машин с линейным перемещением исполнительного элемента, обладающих высокими удельными энергетическими и эксплуатационными показателями, является весьма актуальной задачей.

**Степень разработанности проблемы.** Электрическим машинам с линейным перемещением подвижного элемента - транслятора (Translator), как двигателям, так и генераторам, посвящены научные исследования российских и зарубежных ученых. Большая часть этих работ описывает теорию и практическое применение линейных двигателей высокоскоростного транспорта. Двигателям с ограниченным перемещением транслятора, предназначенным, например, для активной подвески автомобиля, или систем стабилизации прецизионных систем посвятили свои работы отечественные и зарубежные ученые Н. А. Серков,

Э. М. Берлинер, Р. Л. Пушков, В. А. Полянский, М. Pajor, R. Ramesh, J.-P. Kruth, P. Vanherck, S. M. Wu, H.-W. Huang, S. Ibaraki, T. Yokawa и др. Большой вклад в развитие теории линейных электродвигателей внесли Баль В.Б., Веселовский О. Н., Геча В.Я., Дамм Э.К., Павленко А.В., Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф., Коняев А. Ю., Соколова Е. М, Скороспешкин А.И., Freeman E. M., W. Plodpradistha.

Однако существует ряд вопросов и проблем в теории и практике линейных двигателей, которые ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не освещены в полной мере. В первую очередь, отсутствует методика проектирования линейных двигателей постоянного тока (ЛДПТ) с ограниченным перемещением якоря, основанная на современных математических моделях, базирующихся на методах численного моделирования электромагнитных и температурных полей. Во-вторых, при разработке новых и совершенствовании существующих ЛДПТ не решены задачи параметрической оптимизации по различным критериям, определяемым назначением устройства. В-третьих, отсутствует методология

экспериментальных исследований для верификации аналитических теоретических положений, лежащих в основе проектирования такой специфической электрической машины, как ЛДПТ.

Указанные проблемы позволяют сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

**Цель диссертации** – создание линейного двигателя постоянного тока с улучшенными массогабаритными и энергетическими характеристиками для электромагнитного демпфера бортового электротехнического комплекса и методики его оптимизационного проектирования.

**Объект исследования** – магнитоэлектрический линейный двигатель постоянного тока с полым якорем.

**Предмет исследования** – математическая модель и методы оптимизационного проектирования линейного двигателя с постоянными магнитами и полым якорем.

**Задачи исследования:**

1. Анализ существующих технических решений, используемых при построении электротехнических систем позиционирования и демпфирования колебаний прецизионных бортовых комплексов.
2. Разработка расчетной математической модели линейного двигателя постоянного тока с полым немагнитным якорем.
3. Создание алгоритма и методики оптимизационного расчета линейного двигателя, основанных на современных методах численного моделирования электромагнитных и тепловых полей.
4. Техническая реализация и экспериментальные исследования двигателя с целью верификации теоретических положений диссертации.

**Методы исследования.** Теоретические исследования проведены с использованием методов теории электромеханики. Расчетные исследования выполнены в программах Mathcad и Excel, численное моделирование физических полей - в комплексах ELCUT и ANSYS, экспериментальные

исследования - с использованием физического моделирования и натурального эксперимента, обработка результатов исследований и оптимизация – с использованием методов планирования эксперимента.

### **Научная новизна**

1. Установлено, что по совокупности технических параметров магнитоэлектрический линейный двигатель постоянного тока с полым якорем для системы позиционирования и демпфирования оптического комплекса бортового исполнения, превосходит электроприводы с двигателями вращательного движения и механизмами типа «винт-гайка», длинноходовыми электромагнитами, линейными шаговыми двигателями, пневмо- и гидроприводами.
2. Предложена расчетная математическая модель линейного двигателя, отличающаяся учетом функциональных соотношений в беспазовой конструкции якоря и уточненная результатами численного моделирования электромагнитного и теплового полей.
3. Разработаны алгоритм и программа оптимизационного расчета линейного двигателя на основе метода крутого восхождения по поверхности отклика, позволяющие оптимизировать машину по различным частным критериям и (или) их совокупности.

### **Практическая значимость работы**

1. Предложены аналитическая и численная математические модели расчета, которые используются при разработке новых линейных двигателей постоянного тока.
2. Оптимизация двигателя на основе разработанных моделей позволила по сравнению с прототипом уменьшить массу постоянных магнитов на 36,5% и потребляемую мощность на 35,4% при обеспечении заданного тягового усилия.

3. Линейный двигатель, спроектированный и изготовленный по результатам исследований, показал требуемые характеристики и был рекомендован к серийному производству.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты сравнительного анализа типов и конструкций электродвигателей систем позиционирования и демпфирования бортовой оптической системы.
2. Расчетная математическая модель линейного двигателя, отличающаяся учетом функциональных соотношений в беспазовой конструкции якоря и уточненная результатами численного моделирования электромагнитного и теплового полей.
3. Алгоритм и программа оптимизационного расчета линейного двигателя на основе метода крутого восхождения по поверхности отклика, позволяющие оптимизировать машину по различным критериям и исходным данным.
4. Результаты экспериментальных исследований и верификации теоретических положений диссертации.

**Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.2 - «Электротехнические комплексы и системы» по п. 2 «Разработка научных основ проектирования, создания ...электротехнических комплексов, систем и их компонентов...»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов».**

**Обоснованность и достоверность результатов и выводов** обусловлена использованием строгих математических методов, компьютерным моделированием на основе применения сертифицированных программных средств, экспериментальных методов проверки теоретических положений на опытном образце, качественным совпадением полученных результатов с данными, приведенными в трудах других ученых.

### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты исследования диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Инжиниринг и прикладные науки: новые технологии, инновационные решения» (ТЕЕAS 2024), на XVI международной научно-практической конференции «Наука – промышленности и сервису». ПовГУС, Тольятти. 2021, на Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета ИГЭУ. Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). Иваново, 2023.

**По материалам диссертации опубликованы 8 работ**, из них: 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ. Общий объем опубликованных работ 3,63 п.л. с авторским вкладом 1,67 п.л.

**Результаты диссертации внедрены** в виде алгоритма и программы расчета линейного двигателя постоянного тока для бортовой системы позиционирования и стабилизации электротехнического комплекса. (Приложение Ж), и используются в учебном процессе СамГТУ (Приложение З).

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений.

В первой главе проведен анализ принципов реализации возвратно-поступательного движения и стабилизации рабочих органов за счет электромеханического преобразования энергии и технических решений для осуществления этого преобразования. Определены основные требования к электротехническим комплексам и их компонентам для решения поставленной задачи. На основании проведенного анализа определен круг технических решений и обоснован выбор типа и конструкции линейного двигателя. Сформулированы нерешенные проблемы, цель и задачи исследования.

Во второй главе на основе базовых теоретических положений электромеханики и конструктивных особенностей магнитоэлектрического двигателя с полым якорем представлена аналитическая расчетная модель,

позволяющая получить геометрические размеры активных частей машины, параметров и характеристик с исходными данными на проектирование. Модель усовершенствована за счет уточнения априорных значений коэффициентов и параметров результатами численного моделирования электромагнитного и температурного полей методом конечных элементов.

В третьей главе сформулирована и решена задача параметрической оптимизации двигателя. Алгоритм и программа оптимизации построены по гибкой схеме, позволяющей изменять параметры и критерии оптимальности в зависимости от постановки цели исследования.

В четвертой главе проведен анализ результатов оптимизационных расчетов. В результате параметрической оптимизации методом Бокса-Уилсона получены оптимальные значения выходных параметров и соответствующие им значения варьируемых переменных (факторов).

В пятой главе приведены описание стенда для испытания опытного образца линейного двигателя и результаты его экспериментальных исследований. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных параметров и характеристик двигателя.

В заключении подведены основные результаты работы, сделаны краткие выводы по диссертации и сформулированы перспективные направления продолжения и развития темы исследования.

## 1. АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

Существует широкий ряд электротехнических комплексов и систем, в которых рабочий орган совершает линейное перемещение или возвратно-поступательное движение. Обеспечить линейное перемещение с заданными параметрами движения – линейными значениями скорости и ускорения, позиционирования и удержания рабочего элемента при определенных внешних воздействиях, можно различными техническими решениями. Это могут быть приводы без использования электромеханических преобразователей: гидравлические и пневматические. Такие комплексы могут обеспечить очень высокие значения развиваемых усилий. Гидропривод может обеспечить точность до десятых долей миллиметра, имеет возможность фиксации в любом промежуточном положении рабочего органа. Пневматический привод обладает низкой точностью, а в промежуточных положениях точность фиксации рабочего органа осуществляется достаточно сложно [79]. Широко известно применение гидро- и пневмосистем в качестве амортизаторов транспортных средств. Однако, подобные технические решения уже не всегда удовлетворяют возрастающим требованиям к современным автомобилям. Поэтому многие ведущие автопроизводители включают в систему подвески кроме традиционных амортизаторов еще и блоки активных электромагнитных демпферов, обладающих возможностью настройки жесткости и позиционирования «поддресоренных» масс [20].

Другим способом получения линейного перемещения рабочего органа является использование электродвигателя вращательного движения с кинематическими схемами преобразования вращательного движения в поступательное, или возвратно-поступательное, например, кривошипно-шатунного механизма, червячной пары, план-шайбовой передачи, или кулачкового механизма. Подобные решения могут применяться для многих

механизмов, обеспечивающих линейное движение, но неприменимы для демпфирования возмущающих механических воздействий.

Широкое распространение в приводах линейного перемещения робототехнических систем, в том числе авиационного применения, получили передачи типа «винт-гайка» [84]. Передачи «винт-гайка» разделяются на передачи скольжения и передачи качения. У передач скольжения низкий КПД, на уровне 0,1-0,4 по сравнению с 0,8-0,95 у передач качения. На рисунке 1.1 показана передача «винт-гайка» с телами качения. Основным недостатком таких передач является их недостаточная механическая жесткость и невозможность эффективной работы в режиме демпфирования возмущающих воздействий.

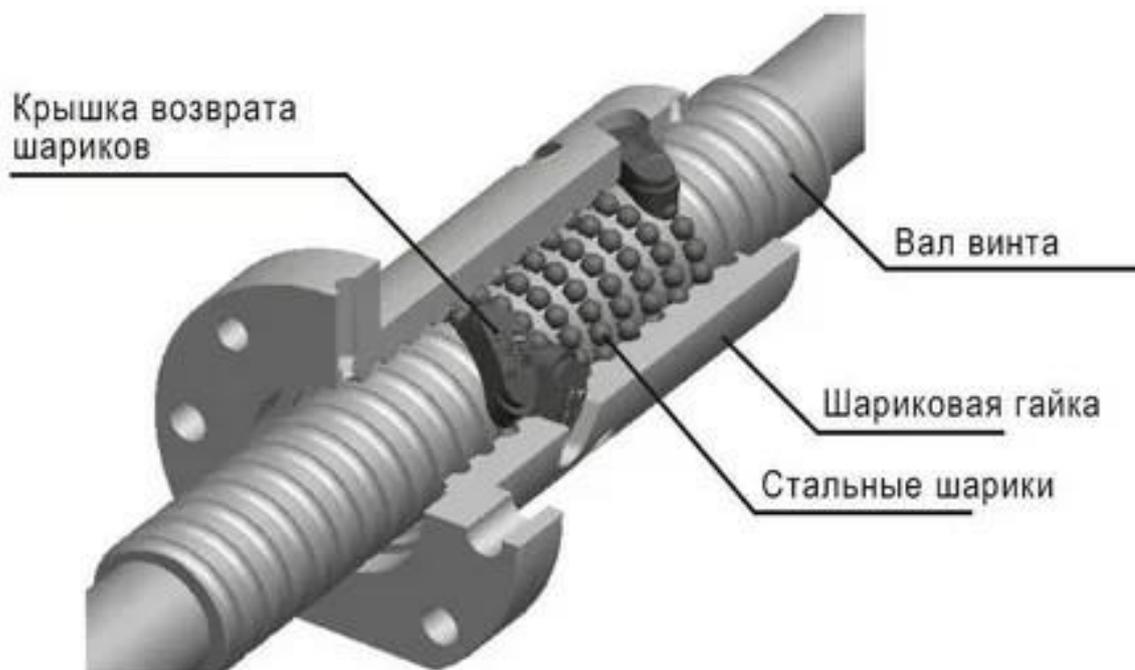


Рисунок 1.1 – Передача «винт-гайка» с телами качения.

Очевидно, что для задачи точного позиционирования рабочего органа и последующей его стабилизации от внешних механических воздействий,

наиболее перспективным видится использование электромеханических систем с непосредственным преобразованием электрической энергии в линейное перемещение. К таким электромеханическим преобразователям относятся длинноходовые электромагниты и линейные электродвигатели различных типов. У каждого из этих преобразователей есть свои достоинства и недостатки, определяющие области их применения. Рассмотрим, какие из этих систем наиболее применимы для достижения поставленной в работе цели. Для этого опишем комплекс, для которого планировалось использовать разрабатываемый линейный электродвигатель и основные технические требования к нему.

На рисунке 1.2 схематично изображено устройство электротехнического комплекса ориентации и стабилизации положения платформы, на которой расположены оптические приборы. Комплекс предназначен для работы на борту летательного аппарата (ЛА) и имеет три степени свободы подвижной платформы: две угловых и одну линейную. Оптический прибор 1 находится на платформе 2, которая может менять своё положение во время полёта ЛА. Для фото или видеосъёмки необходимо, чтобы аппарат сохранял фиксированным положение своей оптической оси относительно цели, либо земли. Для этого система из четырех двигателей-демпферов 4, закреплённых на опоре 3 и питающихся от регулируемых источников тока (ПИТ), должна регулировать положение платформы и демпфировать колебания основания опоры. Используя сигналы датчиков положения (ДП) 5, а также ускорения и скорости (ДУС) 6, система управления двигателями (СУ) 7, задаёт требуемую скорость перемещения штоков различных двигателей в нужный момент времени, для стабилизации аппарата относительно заданного положения. На рисунке показана блок схема одного канала управления.

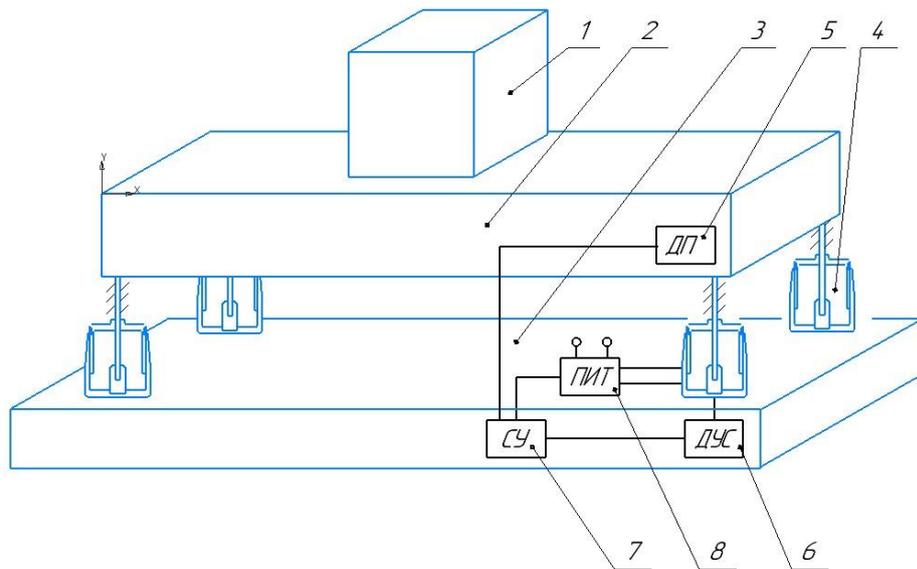


Рисунок 1.2. Трехступенной электротехнический комплекс ориентации и стабилизации платформы. 1- оптический прибор, 2- платформа, 3- основание, 4- двигатель-демпфер, 5- датчик положения, 6- датчик ускорения и скорости, 7- система управления, 8- источник тока.

Более сложной и совершенной системой ориентации прецизионных объектов является гексапод – устройство, обеспечивающее перемещение прибора, расположенного на его подвижной платформе относительно основания по шести степеням свободы (Рис.1.3). Перемещение осуществляется путем изменения линейных размеров приводов [32]. Для функционирования гексапода необходимы шесть линейных двигателей.

В работе [73] положение центра подвижной платформы  $O_1$  задается в декартовых координатах  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в системе  $Oxyz$ , а для задания угловой ориентации платформы автор использовал систему углов Эйлера  $\varphi$ ,  $\xi$ ,  $\psi$ . Поворот на угол  $\varphi$  вокруг оси  $x_1$  учитывался переходом к промежуточной системе координат  $O'x''y''z''$ ; поворот на угол  $\xi$  вокруг оси  $y''$  переходом к промежуточной системе координат  $O'x''y''z''$ ; поворот на угол  $\psi$  вокруг оси  $z''$  и переходом к системе координат подвижной платформы с объектом  $O'x'y'z'$ .

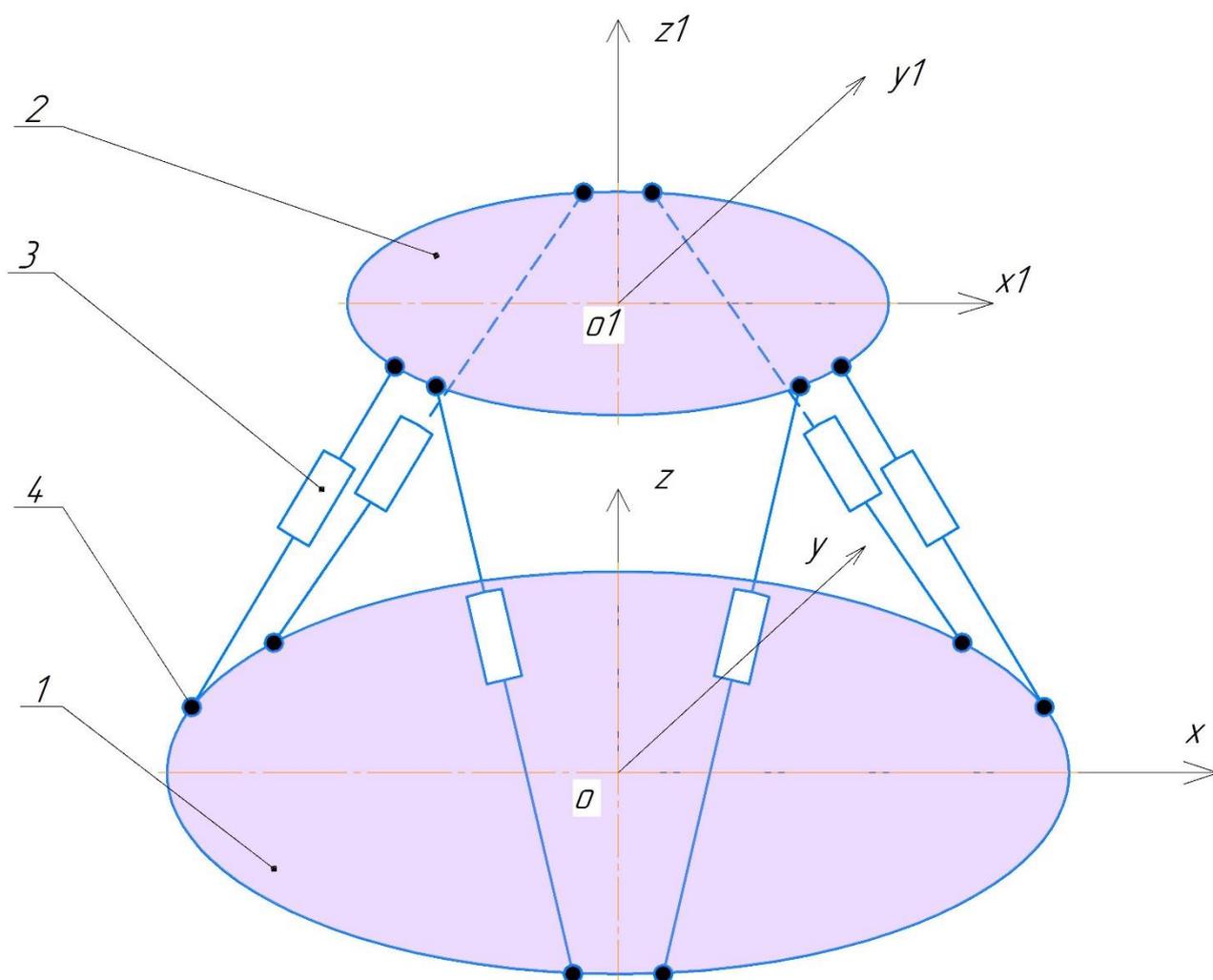


Рисунок 1.3 – Схема гексапода. 1 - основание; 2- подвижная платформа; 3 - линейный двигатель; 4 - шарнир.

Отметим, что решение кинематической задачи по ориентации и поворотам объекта выходит за рамки целей и задач представляемой диссертационной работы.

Для обеих систем ориентации основные требования к линейным приводам идентичны:

- обеспечение номинального усилия при всех положениях якоря;
- перемещение штока в заданном интервале рабочего хода;
- гашение вибраций в широком диапазоне частот;
- минимальное потребление мощности;
- минимальные массогабаритные показатели;

- максимальное быстродействие системы;
- отсутствие люфтов и явления механического гистерезиса.

Задачу перемещения и стабилизации положения платформы можно решить разными способами, например используя гидравлический привод. Несмотря на относительно высокую удельную мощность, этот вариант будет проигрывать системе линейных двигателей в простоте и энергетических показателях. Это же можно сказать и про пневматические приводы, где КПД системы даже меньше, чем при использовании гидравлического привода. С учётом современных тенденций «более электрического самолёта» в ЛА, системы пневмо- и гидроприводов всё чаще заменяются на электроприводы, более соответствующие тенденциям современного авиационного производства.

Применение для рассматриваемой задачи системы, использующей традиционные вращающиеся электрические машины, проигрывает системе прямого привода по нескольким причинам. Для преобразования вращательного движения в поступательное требуется дополнительная система передачи, например «винт-гайка». Несмотря на высокую нагрузочную способность она проигрывает прямому приводу по потерям на трение и по быстродействию. Кроме того, существенно усложняется кинематическая схема. Поэтому для данной задачи будем рассматривать варианты систем прямого преобразования электроэнергии в линейное перемещение.

Прямой привод линейного движения – это электрическая машина или аппарат с непосредственным преобразованием электромагнитной энергии в линейное перемещение. Область применения прямого привода очень разнообразна – системы перемещения предметов, медицинская техника, оборудование для робототехники и др. В приложении к поставленной задаче целесообразно рассмотреть варианты силового органа на основе линейных двигателей переменного и постоянного тока, а также электромагнитов и магнитов с комплексным возбуждением поля постоянными магнитами и управляющими электромагнитами.

### 1.1 Длинноходовые электромагниты

В поставленной задаче стабилизации платформы одним из условий было обеспечение рабочего хода якоря 16 мм. Электромагниты с таким ходом якоря относятся к длинноходовым. Основной особенностью электромагнитов является обратная квадратичная зависимость усилия от величины воздушного зазора между подвижным якорем и неподвижным статором.

В [67] автором было проведен анализ характеристик длинноходовых электромагнитов методом моделирования электромагнитных процессов, происходящих в устройствах с различной конструкцией якоря. В качестве объектов исследования были выбраны электромагниты с прямой и конической формой якоря. Сравнение проводилось при равенстве намагничивающей силы катушки, одинаковых материалах и геометрии магнитной системы. Результаты моделирования представлены на рис.1.4.

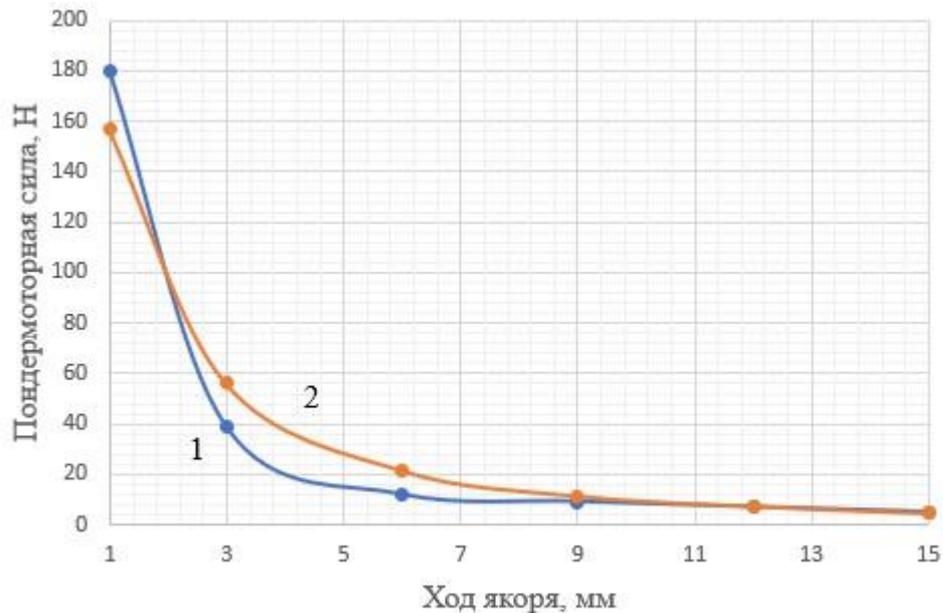


Рисунок 1.4. Зависимость пондеромоторной силы от величины хода якоря.

1 - прямой якорь, 2 - конический якорь.

Из графиков на Рисунок 1. видно, что при использовании прямого якоря, пондеромоторная сила больше при больших значениях хода якоря, при зазоре 2 мм значения примерно равны, а во всех остальных случаях значение силы

больше при коническом якоре. Из графиков также следует, что при перемещении якоря на 15 мм, значение пондермоторной силы уменьшается более чем на порядок от 180 до 5 Н. Такая неравномерность тягового усилия в зависимости от положения якоря является существенной проблемой для построения линейной системы стабилизации.

Для решения этой проблемы различными авторами предлагается ряд технических решений, направленных на обеспечение номинального тягового усилия в широком диапазоне рабочего хода якоря.

В статье [97] предлагается конструкция однокатушечного длинноходового привода на постоянных магнитах для высоковольтного выключателя, применяемого на железнодорожных воздушных линиях. Учитывалось требование об очень длинном ходе подвижного элемента, значительно превышающего традиционный диапазон ходов 10 ... 30 мм. Электромагнитное усилие, и соотношение массы перемещаемой детали были адаптированы в конструкции для обеспечения требуемых рабочих характеристик привода. Конструкция была направлена на достижение средней скорости открытия 1,4 м/с и средней скорости закрытия 0,9 м/с при половине полного хода выключателя нагрузки.

Для задачи, рассматриваемой в данной работе, такой вариант конструкции не может быть применен из-за невозможности фиксации якоря в произвольной точке рабочего хода, что является необходимым условием работы привода в демпфирующем режиме.

В статье [100] описывается проектирование и анализ плоского линейного станка с магнитным редуктором для работы с большим рабочим ходом, подчеркивается его преимущество, заключающееся в низких материальных затратах. В статье анализируются две конструкции машины со специфическими комбинациями пар полюсов (4-15-19 и 4-17-21), и их характеристики сравниваются с традиционным линейным синхронным двигателем с постоянными магнитами. Показано, что у машины с комбинацией пар полюсов

4-15-19 общее гармоническое искажение обратной электродвижущей силы уменьшилось на 90%, пульсации тяги — на 46%, а средняя тяга — на 4% по сравнению с традиционным линейным синхронным двигателем.

Авторы доказывают, что система подходит для применения в механизмах с длинным ходом, благодаря своим преимуществам с точки зрения стоимости материалов по сравнению с линейными синхронными двигателями с ПМ и подвижными элементами в виде катушки и магнитов.

Основным недостатком предложенной конструкции привода является то, что действие электромагнитов невозможно реверсировать. Для возвратного движения используется пружинный механизм, жесткость которого определяется выбранной пружиной. Поэтому регулирование усилия возможно лишь при прямом ходе якоря. Остается нерешенной и задача обеспечения постоянства усилия во всем диапазоне рабочего хода.

В патенте [90] представлено устройство линейного привода, использующее постоянный магнит и печатную плату, используемую как датчик положения. Постоянный магнит закреплен на подвижном элементе и перемещается вместе с ним линейно, а плата обнаружения определяет положение магнита в реальном времени. Плата обнаружения состоит из матрицы магнитных датчиков, многоканального шлюзового модуля и микропроцессорного модуля. Матрица магнитных датчиков позволяет избежать ошибок, вызванных гармоническими волнами магнитного поля и внешними магнитными полями, что обеспечивает высокую линейность системы.

Данный патент не затрагивает энергетические характеристики устройства, концентрируясь на элементах печатной платы. Указанные же характеристики быстродействия проигрывают линейному двигателю постоянного тока с полым якорем, так как подвижный элемент представляет собой массивную конструкцию, содержащую ПМ.

Проведенный анализ показывает, что длинноходовые магниты для системы ориентирования и демпфирования колебаний подвижных объектов малопригодны из-за невозможности реверса и нелинейности тяговой характеристики в функции перемещения якоря

### 1.2 Линейные двигатели переменного тока

В системах позиционирования широкое распространение получили пьезодвигатели — устройства, в которых механическое перемещение достигается за счёт обратного пьезоэлектрического эффекта. Пьезоэлектрические двигатели бывают как с вращающимся ротором, так и с линейным перемещением рабочего органа (актуаторы). Пьезоэлектрические двигатели специального исполнения производятся отечественной компанией АО «НИИ «Элпа», а также рядом иностранных фирм (PiezoMotor и др.). На рисунке 1.5 показаны пьезоэлектрические двигатели шведской фирмы PiezoMotor.



Рисунок 1.5 – Пьезоэлектрические двигатели фирмы PiezoMotor. 1 – с вращающимся ротором; 2 – линейные двигатели (актуаторы)

Главными достоинствами пьезодвигателей являются малая дискретность позиционирования (единицы микрометров), высокое пондеромоторное и

удерживающее усилие, сравнительно большой КПД. Основным недостатком таких двигателей заключается в необходимости высокочастотного и высоковольтного источника питания. Кроме этого, пьезодвигатели отличаются нестабильностью параметров материалов во времени и при изменении температуры окружающей среды [15], а также быстрый износ деталей, контактирующих в процессе движения.

Работа линейных двигателей переменного тока основана на использовании переменного тока для создания бегущего магнитного поля, взаимодействующего с полем постоянных магнитов (синхронные машины) или с индуцированным полем обмотки ротора (вторичного элемента или бегунка) в асинхронных двигателях. Это позволяет двигателю производить линейное движение или создавать усилие вдоль определенной оси в режиме упора.

*Линейный асинхронный двигатель* (ЛАД) состоит из магнитопровода статора, статорной обмотки и подвижного вторичного элемента. Подвижным вторичным элементом двигателя может выступать по аналогии с вращающимся двигателем сердечник с короткозамкнутой обмоткой или любое ферромагнитное тело, например стальной лист.

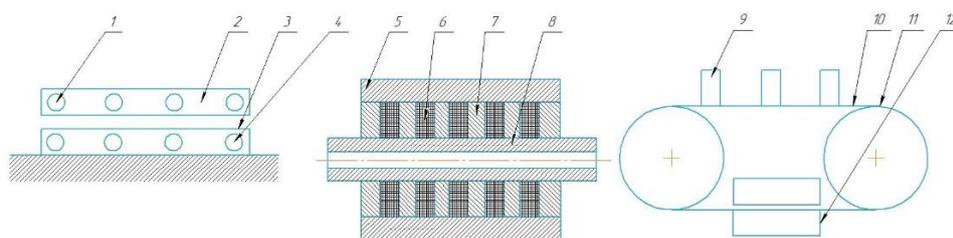


Рисунок 1.6 – ЛАД плоской (а), трубчатой (б) конструкций и схема электропривода транспортёра с ЛАД (в). 1 – обмотка ротора; 2 – ротор (бегунок); 3 – магнитопровод статора; 4 – обмотка статора; 5 – трубчатый статор; 6 – катушка статора; 7 – металлические шайбы; 8 – подвижный элемент; 9 – перемещаемые изделия; 10 – металлическая лента; 11 – барабаны; 12 – статор.

Линейные двигатели ещё называются актуаторами, при помощи которых можно передвигать большие грузы точным и надёжным способом. Актуаторы являются хорошей заменой гидравлическим или пневматическим приводам. ЛАД обычно применяются в высоконагруженных механизмах, таких как конвейеры, траволаторы, транспортеры. В приложении к поставленной задаче ЛАД имеет существенный недостаток: на низких частотах управление им становится малоэффективным, а чаще, вообще невозможным.

*Линейные синхронные двигатели* как правило имеют возбуждение от постоянных магнитов. Это могут быть двигатели классической конструкции или построенные по принципу шаговых двигателей с постоянными магнитами.

Одной из ключевых характеристик линейных синхронных двигателей является их высокая скорость и точность перемещения. Это делает их незаменимыми в условиях, требующих исключительной производительности и точности управления. Ещё одним преимуществом линейных синхронных двигателей является их способность работать в условиях высоких нагрузок. Благодаря своей конструкции они способны развивать большие удельные усилия, что позволяет использовать их в автомобилестроении, высокоточных станковых комплексах, робототехнике. К таким машинам относится синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ), имеющий синусоидальное распределение магнитодвижущей силы в воздушном зазоре, а, следовательно, и ЭДС обмотки.

На базе СДПМ можно построить вентильный привод, у которого коммутация токов фазных обмоток осуществляется в зависимости от текущего углового положения его ротора. Механические характеристики привода в этом случае линейны и идентичны характеристикам двигателя постоянного тока [11]. Производством таких машин занимается ряд отечественных (ОАО «Машиноаппарат») и иностранных компаний (Maxon Motor и др.).

На рис. 1.7 показан вид модуля цилиндрического вентильного двигателя с постоянными магнитами для погружного насоса, разработанного в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский университет» [83].

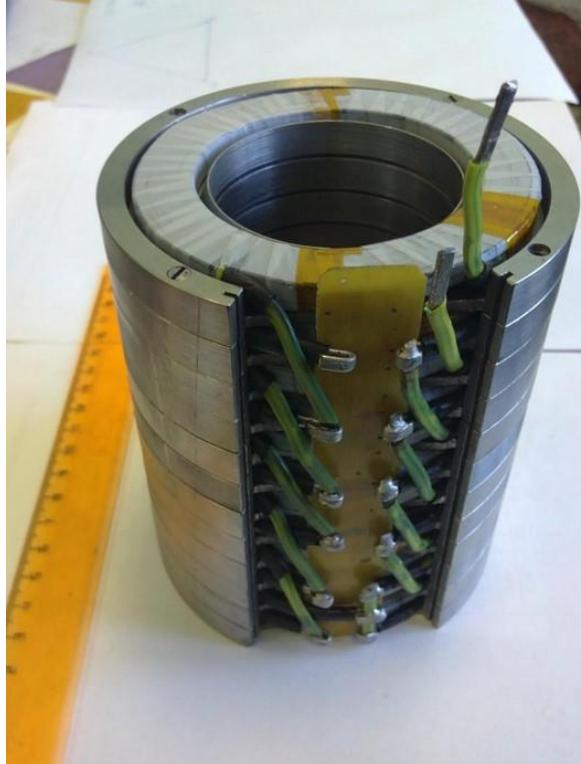


Рисунок 1.7 – Линейный вентильный двигатель погружного насоса

Одной из разновидностей линейного синхронного двигателя является шаговый двигатель (ЛШД) — машина с дискретным перемещением ротора, осуществляемым за счет попеременной подачи импульсов на фазные обмотки. Шаговый двигатель является более предпочтительным для устройств позиционирования в случае движения с небольшой скоростью. В ЛШД для большей дискретизации шага применяют микрошаговое управление, при котором каждый целый шаг дробится на 4, 8, 16, 32 и более микрошагов. В этом режиме можно осуществить квазинепрерывное позиционирование штока шагового двигателя. Один из типов ЛШД — гибридный двигатель — имеет полюсную фиксацию момента на вторичном элементе при отсутствии импульсов управления.

Достоинством ЛШД является возможность работы без датчика положения, стабильность характеристик, наличие остаточного тормозящего момента при отключении питания. Так, даже при выходе из строя датчика положения, управление шаговым двигателем может осуществляться без обратной связи с точностью в пределах дискретности одного шага двигателя.

На рис.1.8 показан внешний вид шагового двигателя с постоянными магнитами и линейным перемещением подвижного элемента фирмы IAI America [73].



Рисунок 1.8 – Линейный шаговый двигатель RCS4

Как отмечалось выше, ЛШД могут эффективно применяться в системах с относительно медленным перемещением вторичного элемента. В быстродействующих комплексах в шаговых двигателях начинает проявляться их практически неустранимый недостаток – пропуск шага. Вторичный элемент «не успевает» за сигналом на обмотке управления из-за механической инерционности. Существуют попытки программно компенсировать эту ошибку, но кардинально решить проблему пока не удается [39].

По конструктивным особенностям различают линейные двигатели с односторонней и двухсторонней магнитной системой. Линейные двигатели "Mars" серии 1ML –двигатели с односторонней магнитной системой. Между якорем и магнитопроводом существует сила притяжения – идеальный вариант для систем, где необходимо создать предварительное натяжение подшипника с целью исключения люфты. Предварительное натяжение убирает люфты в

направляющих. Особенностью двигателей данной серии являются малые габариты и легкая интеграция в имеющиеся конструкции. Они применяются в робототехнических системах, высоко динамичном оборудовании, станках, системах оптического контроля и лазерной резки.

Главным минусом данного технического решения является сложность конструкции и ее практической реализации. Подобные двигатели мало приспособлены для использования в бортовой автоматике ЛА.

В последние годы были ведутся разработки электрических машин, в том числе и линейных двигателей с использованием высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. Эти материалы обладают абсолютной электропроводностью при температурах жидкого азота. Их применение может значительно улучшить энергетические характеристики машин.

Однако на практике такие двигатели ещё не применяются, и высокие затраты для их создания не позволяют использовать их в серийном производстве. К тому же система криообеспечения высокотемпературных проводников имеет высокую энергоёмкость и массу, что идёт в противоречие с основными требованиями к системе, описанной в цели данной работы.

### **1.3 Линейные двигатели постоянного тока с ограниченным перемещением якоря**

В электроприводах с ограниченным перемещением рабочего органа не требуется использования скользящего контакта для подвода тока к якорю – главного недостатка машин постоянного тока. С этой целью в линейных двигателях постоянного тока (ЛДПТ) используют гибкий токоподвод к подвижному элементу. Как и во вращающихся машинах постоянного тока малой мощности, основной магнитный поток в ЛДПТ рационально создавать постоянными магнитами (ПМ). Магнитоэлектрические двигатели выигрывают у двигателей с электромагнитным возбуждением как по массогабаритным, так и по энергетическим показателям.

На рис.1.9 схематично показана конструкция двухполюсного двигателя с зубцово-пазовой конструкцией якоря. Такие двигатели могут быть как прямого (*a*), так и обращенного исполнения (*б*). ЛДПТ могут быть с плоским или цилиндрическим воздушным зазором. Последние, как правило выигрывают у плоских машин по степени использования активных материалов и, в первую очередь по объёму ПМ.

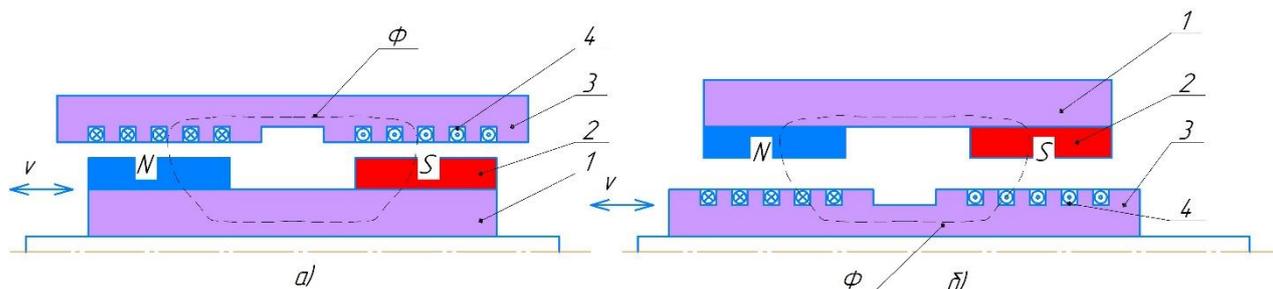


Рисунок 1.9 – Цилиндрический линейный двигатель постоянного тока.

*a* – традиционного исполнения и (*б*) – обращенная конструкция

Главным достоинством представленных двигателей является возможность создания высокого значения удельного тягового усилия при относительно малых габаритах активной части. Это объясняется значениями магнитной индукции в воздушном зазоре, достигающими 1,0 Тл и высокой величиной линейной токовой нагрузки (до 20000-30000 А/м). Зубцовая конструкция якоря позволяет эффективно отводить тепло электрических потерь.

Разновидностью ЛДПТ с ферромагнитным зубцовым якорем является униполярная машина, схематично представленная на рис.1.10. В этой конструкции якорь в виде полого цилиндра 4 находится между внутренним 1 и внешним 5 магнитопроводами и перемещается линейно. Кольцевая обмотка якоря 4 лежит в пазах магнитопровода якоря 3. Постоянные магниты могут располагаться как внутри якоря, (рис.1.10), так и на наружном магнитопроводе.

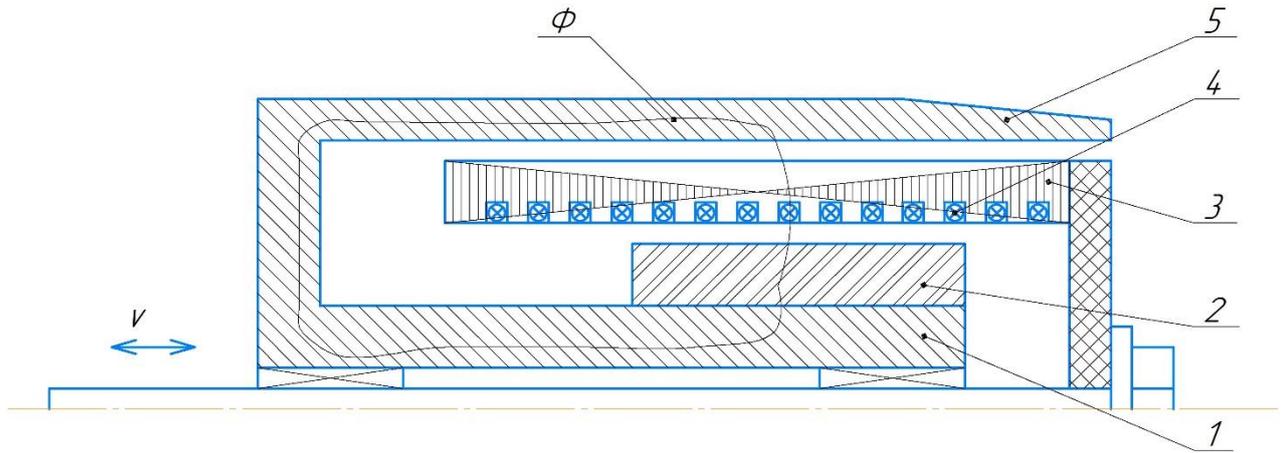


Рисунок 1.10 – Униполярный ЛДПТ с внутренним индуктором и зубчатым якорем. 1 – внутренний магнитопровод; 2 – постоянные магниты; 3 – сердечник якоря; 4 – паз якоря с обмоткой; 5 – наружный магнитопровод.  $\Phi$  – магнитный поток.

Недостатками перечисленных конструкций являются две проблемы, которые невозможно решить в рамках применимости их к электроприводу ориентации и стабилизации объекта, исследуемого в данной работе. Во-первых, зубцовая структура магнитопровода якоря создает неравномерность (пульсации) электромагнитной силы при линейном перемещении якоря. В ЛДПТ невозможно, по аналогии с вращающимися машинами, выполнить для снижения зубцовых гармоник скос пазов, или сделать профилирование ПМ. Во-вторых, ферромагнитный сердечник якоря обладает большой массой, что не позволяет достичь предельного электромеханического быстродействия, а значит и точности позиционирования в динамике.

Лишенным перечисленных недостатков является линейный двигатель постоянного тока (ЛДПТ) с беспазовым (полым) якорем и возбуждением от постоянных магнитов (Рисунок 1.1). Этот тип машины отличает высокое электромагнитное быстродействие, обусловленное тем, что обмотка якоря находится не в пазах ферромагнитного сердечника, а непосредственно в воздушном зазоре. Поэтому собственная индуктивность якоря минимальна.

Она почти на порядок меньше, чем в аналогичных двигателях с зубчатым якорем.

Еще одна выгодная характеристика этого двигателя заключается в малом весе и инерции полого якоря. Подвижный компонент двигателя не содержит стальной магнитопровод, а состоит исключительно из самой катушки и легких конструктивных элементов. Это значительно повышает электромеханическое быстродействие двигателя. Беспазовая конструкция якоря исключает зубцовые пульсации электромагнитного усилия, так как обмотка якоря многослойная, состоящая из нескольких сотен относительно тонких витков. Однако недостатком этого двигателя является наличие значительного немагнитного зазора между внешним и внутренним статорами. Этот зазор включает в себя не только два воздушных зазора, но и толщину слоя обмотки якоря. Следовательно, для достижения приемлемого уровня индукции в зазоре требуется мощная система возбуждения. Очевидным решением проблемы является применение высокоэнергетических постоянных магнитов для индуктора.

Таким требованиям отвечают магниты на основе Sm-Co или Nd-Fe-B. Причем самарий-кобальтовые магниты хотя и имеют меньшую магнитную энергию, но отличаются лучшей температурной стабильностью.

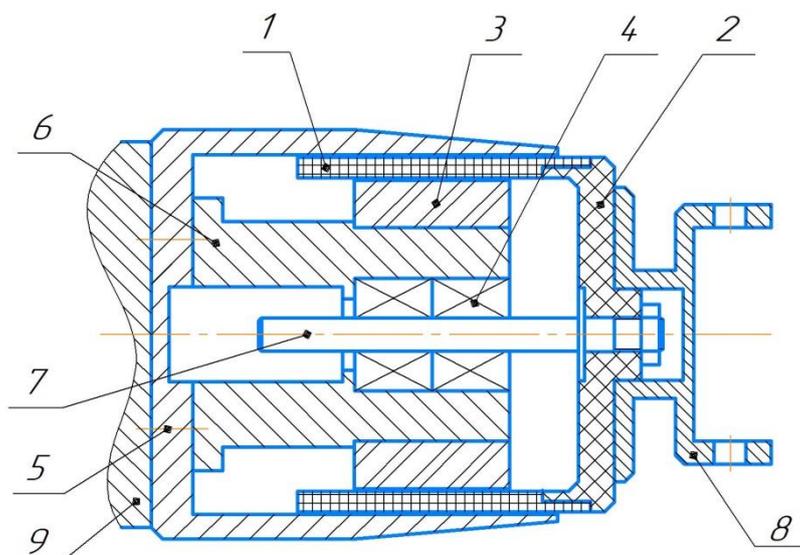


Рисунок 1.11. Конструкция линейного двигателя постоянного тока с полым якорем. 1- катушка якоря; 2- основание якоря; 3- магнит; 4- линейный подшипник; 5- наружный магнитопровод; 6-внутренний магнитопровод; 7- шток; 8- крепление исполнительного механизма; 9- основание платформы.

За счет использования прямого привода на основе ЛДПТ достигается устранение люфта, отрицательно влияющего на точность позиционирования в схемах с приводами, содержащими промежуточную механическую передачу. Тяговые характеристики двигателя, исследованные методом численного моделирования в главе 3 и экспериментально в главе 4 настоящей работы, имеет линейный вид и сохраняют свою стабильность во всем диапазоне рабочего хода якоря. Линейный двигатель обладает собственным электромагнитными и электромеханическим быстродействием, близким к предельно возможному для выбранных материалов магнитов и допустимых по тепловым ограничениям значений линейной токовой нагрузки. Это дает ему преимущество по сравнению с другими типами приводов при синтезе систем управления комплексами, требующими повышенной точности позиционирования в динамических режимах.

## Выводы по главе 1

1. Системы позиционирования и стабилизации оптико-механических комплексов летательных аппаратов в зависимости от назначения бывают с тремя и с шестью степенями свободы (гексаподы). В первом варианте для функционирования системы требуется четыре линейных привода, а во втором, более совершенном, – шесть. К силовым элементам системы предъявляется ряд специфических требований по обеспечению заданного усилия и его постоянства в пределах рабочего хода, высокого уровня механического и электромагнитного быстродействия, минимальных энергетических затрат и массогабаритных параметров.
2. Анализ возможных вариантов силовых элементов исследуемого комплекса определил следующие типы, применяемые при решении сходных задач:
  - гидравлические и пневматические приводы;
  - электроприводы на основе вращающихся двигателей с механизмами преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное;
  - электроприводы прямого действия: длинноходовые электромагниты и линейные двигатели различных типов.
3. Несмотря на относительно высокую удельную мощность гидравлических приводов, они проигрывают системе линейных электродвигателей в простоте и энергетических показателях. Это же можно сказать и про пневматические приводы, где КПД системы даже меньше, чем при использовании гидравлического привода. С учётом современных тенденций «более электрического самолёта» в ЛА, системы пневмо- и гидроприводов всё чаще заменяется на электроприводы, более соответствующие тенденциям современного авиационного производства.
4. Электроприводы на основе вращающихся двигателей с механизмами преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное,

например, с передачей «винт-гайка» с телами качения, имеют отличные силовые энергетические показатели. Основным недостатком таких передач является их недостаточная механическая жесткость и невозможность эффективной работы в режиме демпфирования возмущающих воздействий.

5. Электроприводы прямого действия строятся на основе использования электромагнитов или линейных двигателей. Длинноходовые электромагниты были исключены из дальнейшего анализа по причине значительной зависимости тягового усилия от положения якоря, а также невозможности реверсирования пондеромоторной силы. Линейные асинхронные двигатели нестабильно работают при низких частотах. Основным недостатком одной из разновидностей синхронного двигателя – шагового линейного двигателя, является его склонность к «пропуску шага» в режимах, когда от него требуется высокое быстродействие.
6. По результатам анализа в качестве базового объекта исследования был выбран линейный двигатель постоянного тока с полым якорем и магнитоэлектрическим возбуждением. Этот тип двигателя отвечает в полной мере основным требованиям к силовому элементу электротехнической системы позиционирования и стабилизации бортового оптико-механического комплекса летательного аппарата.

## 2. РАСЧЕТНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛДПТ

Во введении и первой главе диссертации были сформулированы основные требования к разрабатываемому линейному двигателю, предназначенному для позиционирования и демпфирования колебаний платформы, расположенной на борту летательного аппарата (ЛА). Линейная электрическая машина должна работать как в двигательном (позиционирование), так и в генераторном (демпфирование) режимах. Свойство обратимости линейных электрических машин часто используется в комплексах, где допускается изменение режима работы с двигательного на генераторный, например, в электромагнитных демпферах, которые являются частью активной подвески современных автомобилей, или систем стабилизации космических и авиационных систем [65]. К таким машинам предъявляется ряд специальных требований, основные из которых [51]:

- стабильность усилия во всем диапазоне хода якоря;
- отсутствие гистерезисных явлений;
- недопустимость зубцовых (шаговых) пульсаций электромагнитной силы;
- отсутствие люфта;
- максимальное электромагнитное и электромеханическое быстродействие.

В наиболее полной мере этим требованиям, как показали исследования (Гл.1) отвечает линейный двигатель постоянного тока с беспазовым (полым) якорем и возбуждением от постоянных магнитов.

Конструкция ЛДПТ с полым якорем существенно отличается от других типов линейных двигателей и, следовательно, расчетная математическая модель имеет ряд специфических особенностей, не позволяющих без корректировки использовать известные [42] методики проектирования электрических машин.

В научно-технических публикациях практически полностью отсутствует информация о методах и алгоритмах проектирования короткоходовых

линейных двигателей с полым немагнитным якорем. Поэтому одной из задач исследования является разработка методики расчета ЛДПТ с полым якорем. Математическая модель, построенная на известных электромагнитных соотношениях из теории электрических машин и общей электротехники с учетом особенностей конструкции, предназначена для инженерных расчетов и основы для оптимизации ЛДПТ.

### 2.1. Определение главных размеров

В классической теории проектирования вращающихся электрических машин главные размеры  $D$  - диаметр якоря и  $l_\delta$  - его расчетная длина, связаны с расчетной мощностью  $S$  и электромагнитными нагрузками:  $B_\delta$  - индукцией в зазоре и  $A$  - линейной токовой нагрузкой, уравнением Арнольда [42]

$$D^2 l_\delta = \frac{2 \cdot S}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A \cdot B_\delta \cdot \Omega}, \quad (2.1)$$

где  $\alpha_\delta$  - коэффициент полюсного перекрытия;

$k_{об}$  - обмоточный коэффициент;

$k_B$  - коэффициент формы кривой индукции в воздушном зазоре;

$\Omega$  - угловая скорость, рад/с.

Произведение  $D^2 l_\delta$  определяет, так называемый, активный объем машины.

В линейном двигателе, работающем «на упор», полезная механическая мощность равна нулю, а вся подведенная электрическая мощность рассеивается в виде потерь. Поэтому формула Арнольда к ЛДПТ не применима.

Основным исходным параметром для расчета ЛДПТ выступает максимальное усилие  $F$ , которое должен развивать двигатель.

Существуют две разновидности конструкции активной зоны ЛДПТ с полым якорем. В первой длина катушки больше, чем осевая длина магнитов (Рис.2.1 а), во-второй – длина катушки меньше длины магнита (Рис.2.1 б).

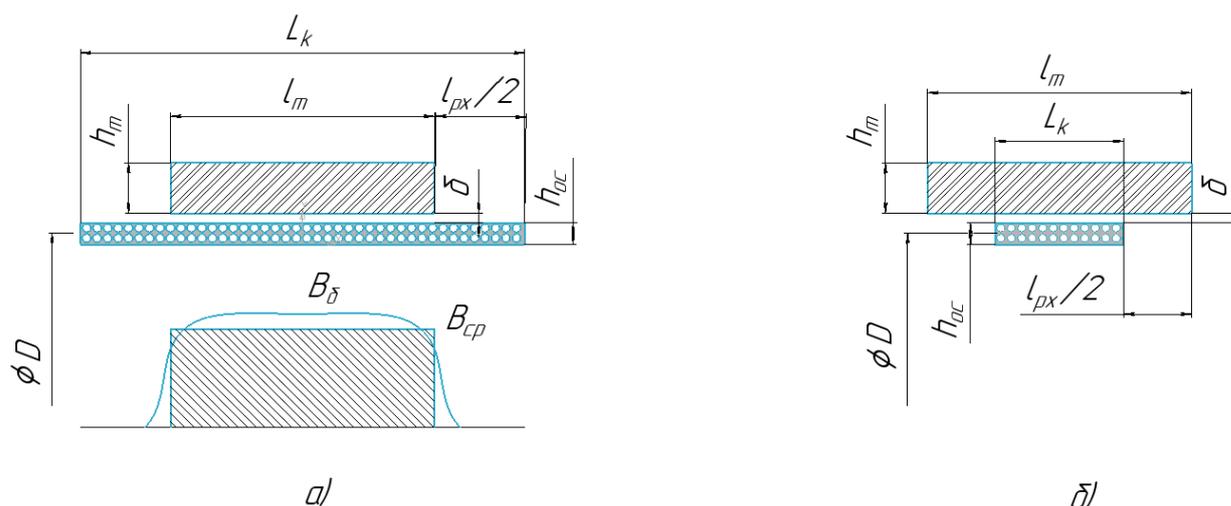


Рисунок 2.1 – Конструкции активной части ЛДПТ с полым якорем.  
 а) машина с «длинным» якорем; внизу кривая индукция в зазоре; б)  
 конструкция с «коротким» якорем.

Очевидно, что во втором случае значительная часть магнита не участвует в создании усилия. Поэтому этот вариант проигрывает первому по коэффициенту использования ПМ. В дальнейшем будем рассматривать конструкцию с «длинной» катушкой (рис.2.1 а).

Для получения основных уравнений математической модели примем следующие допущения:

- характеристика размагничивания материала индуктора (сплав КС-37) линейная;
- рассеяние магнитного потока учитывается постоянным коэффициентом  $k_{\sigma}$ , величина которого не зависит от положения якоря;
- падение магнитного потенциала в стальных участках магнитопроводов учитывается постоянным коэффициентом  $k_{\mu}$ , не зависящим от реакции якоря;
- в электромагнитном взаимодействии участвуют только проводники, находящиеся непосредственно под полюсом.

Как показало дальнейшее численное моделирование магнитного поля, сделанные допущения не вносят значительных погрешностей в расчет.

Исходными параметрами при расчете являются, как правило, значения, определяемые техническим заданием: номинальное усилие  $F$ , Н; номинальное напряжение питания  $U$ , В; рабочий ход якоря  $l_{рх}$ , м. Кроме этого в ТЗ могут быть ограничены габариты и потребляемая мощность двигателя. Параметрами ограничителями могут выступать тепловые нагрузки и некоторые технологические ограничения.

Основное уравнение, связывающее усилие, развиваемое якорем с электромагнитными параметрами, может быть получено из закона Ампера:

$$F = \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot I \cdot w_{\text{эф}} \cdot \pi \cdot D, \quad \text{Н} \quad (2.2)$$

где  $\alpha_{\delta}$  – коэффициент полюсного перекрытия, который по аналогии с вращающимися машинами определяется отношением

$$\alpha_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{B_{\text{ср}}}$$

$I$  – ток якоря;  $w_{\text{эф}}$  – число эффективных проводников якоря, взаимодействующих с полем магнитов

$$w_{\text{эф}} = N \frac{l_m}{L_k}$$

$N$  – полное число витков катушки якоря;

$D$  – средний диаметр полого якоря, м (рис.2.1).

Исходя из (2.2) можно получить уравнение, связывающее основные геометрические размеры ЛДПТ с электромагнитными нагрузками и расчетным усилием:

$$D \cdot l_m = \frac{F}{\pi B_{\delta} \cdot h_{oc} \cdot j \cdot k_{\text{зм}} \alpha_{\delta}} = \frac{F}{\pi \cdot \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A}, \text{ м}^2 \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) получено, исходя из соотношений:

$$A = h_{oc} \cdot j \cdot k_{\text{зм}}, \frac{\text{А}}{\text{М}}$$

Объёмный коэффициент заполнения обмоточного слоя медью

$$k_{\text{зм}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot N}{4 \cdot h_{oc} \cdot L_k}$$

$l_m$  – активная длина якоря (длина магнита), м;

$h_{oc}$  – высота обмоточного слоя якоря, м;

$d_{пр}$  – диаметр проводника обмотки, м;

$j$  – плотность тока в обмотке, А/м<sup>2</sup>.

Формула (2.3) является по сути аналогом формулы Арнольда для линейного двигателя. Главное ее отличие от выражения (2.1) заключается в том, что расчетный диаметр в (2.3) в первой степени, а не в квадрате, как для вращающихся машин.

Выражение (2.3) определяет расчетное активное продольное сечение линейного двигателя в функции требуемого пондеромоторного усилия и электромагнитных нагрузок. Эта зависимость может служить основой для расчета обмоточных параметров гладкого якоря, размеров и характеристик постоянных магнитов, геометрических размеров магнитной цепи и всего двигателя.

Из произведения  $D \cdot l_m$  можно определить либо расчетный диаметр якоря, задавшись длиной магнита  $l_m$ , либо наоборот, если определяющим является диаметральный размер, то можно  $l_m$  рассчитать, как функцию диаметра.

Как правило, задаются значением относительной длины машины  $\lambda$ , которая, как и в традиционных вращающихся машинах находится из опыта проектирования

$$\lambda = \frac{l_m}{D}$$

В этом случае

$$D = \frac{F}{\pi B_\delta \cdot h_{oc} \cdot j \cdot k_{зм} \cdot \alpha_\delta \cdot \lambda} = \frac{F}{\pi \cdot \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot \lambda}, \text{ м} \quad (2.3a)$$

## 2.2. Расчет параметров якоря

Полая конструкция якоря накладывает на размеры сечения проводников, их количество, число проводников в слое и количество слоев обмотки некоторые ограничения, не свойственные якорям с зубчатой конструкцией. Для

учета этих особенностей наряду с общепринятым понятием объёмного коэффициента заполнения меди  $k_{зм}$ , о котором мы говорили выше, введем понятия радиального  $k_{рзм}$  и линейного  $k_{лзм}$  коэффициентов заполнения меди, определяемых соотношениями:

$$k_{рзм} = \frac{d_{пр} \cdot n_{сл}}{h_{ос}}; \quad (2.4)$$

$$k_{лзм} = \frac{d_{пр} \cdot N}{n_{сл} \cdot L_{к}}, \quad (2.5)$$

где  $n_{сл}$  – число слоев обмотки;

$N$  – полное число витков обмотки якоря;

$L_{к}$  – полная длина катушки якоря, м.

*Примечание.* Здесь, и в дальнейшем будем рассматривать конструкцию полого якоря с рядовой намоткой, так как она имеет наибольший коэффициент заполнения меди и более технологична.

Так как расчет ведется для режима заторможенного якоря и противо-ЭДС якоря равно нулю, то ток якорной обмотки в статике определяется отношением напряжения к активному сопротивлению катушки. Исходя из этого, линейная нагрузка якоря может быть выражена как

$$A = \frac{4U \cdot n_{сл} \cdot k_{зм}}{\pi \cdot k_{рзм} \cdot R \cdot d_{пр}} = \frac{U \cdot d_{пр}^2 \cdot k_{зм}}{\pi \cdot k_{лзм} \cdot k_{рзм} \cdot \rho_{\theta} \cdot D \cdot L_{к}} \quad (2.6)$$

$U$  – напряжение питания, В;

$R$  – активное сопротивление якоря, Ом;

$\rho_{\theta}$  – удельное сопротивление материала обмотки, Ом·м.

Если подставить полученное значение  $A$  из (2.6) в формулу (2.3), то можно получить выражение, определяющее квадрат диаметра проводника якоря

$$d_{пр}^2 = \frac{F \cdot \rho_{\theta} \cdot L_{к} \cdot k_{лзм} \cdot k_{рзм}}{U \cdot B_{\delta} \cdot l_m \cdot k_{зм} \cdot \alpha_{\delta}} \quad (2.7)$$

Отметим важную особенность полученного выражения: диаметр провода в ЛДПТ с полым якорем не может быть выбран, как в традиционных зубцово-

пазовых машинах исходя из допустимой плотности тока. Он детерминировано связан с величинами питающего напряжения и отношения полной длины катушки к длине магнита. Все эти величины, как правило определяются заданием на проектирование. Естественно, что полученное значение диаметра провода будет определять степень нагрева якоря от электрических потерь в обмотке. Поэтому требуется проведение поверочного теплового расчета двигателя, а затем, его уточнения численными методами моделирования.

Соотношение линейных и объемных коэффициентов заполнения меди должно удовлетворять равенству

$$\frac{k_{лзм} \cdot k_{рзм}}{k_{зм}} = \frac{4}{\pi}$$

Выражение получено из условия обеспечения требуемого усилия.

Полная осевая длина катушки  $L_k$  связана с длиной магнита, рассчитанной из выражения (2.3) следующей зависимостью:

$$L_k = l_m + l_{px}$$

$l_{px}$  – рабочий ход якоря, заданный ТЗ (см.рис.2.1).

Дальнейший расчет производится исходя из полученного по (2.7) значения диаметра проводника.

Число витков катушки по условию полного заполнения слоя проводниками

$$N = \frac{L_k \cdot k_{лзм} \cdot n_{сл}}{d_{пр}} \quad (2.8)$$

$n_{сл}$  – число слоев катушки. Этот параметр будет выступать в качестве варьируемой переменной. Ограничение: число слоев катушки должно быть целым четным числом, так как начало и конец обмотки должны быть с одной стороны якоря.

Активное сопротивление якорной обмотки из известных соотношений, (2.9) геометрии катушки и условия полного заполнения слоев катушки проводниками

$$R = \rho_{\theta} \cdot D \cdot L_k \cdot n_{\text{сл}} \cdot \frac{4k_{\text{ЛЗМ}}}{d_{\text{пр}}^3}, \text{ Ом}$$

Ток якоря

$$I = \frac{U}{R}, \text{ А}$$

Потребляемая мощность

$$P_1 = I^2 \cdot R, \text{ Вт}$$

### 2.3. Расчет магнитной системы

Система возбуждения ЛДПТ с полым якорем должна обеспечить требуемое значение максимальной индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta}$  согласно выражению (2.3) для получения заданного усиления.

Величина полезного магнитного потока, сцепленного с током обмотки якоря, определится интегралом

$$\Phi = \pi D \int_0^{l_m} B \cdot dx = \pi D \cdot \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot l_m, \text{ Вб} \quad (2.10)$$

На рис. 2.2 показан примерный вид кривой индукции в зазоре. Заштрихованная область соответствует полезному магнитному потоку. Ее площадь равна площади прямоугольника, ограниченного средним значением индукции в зазоре  $B_{\text{ср}}$ .

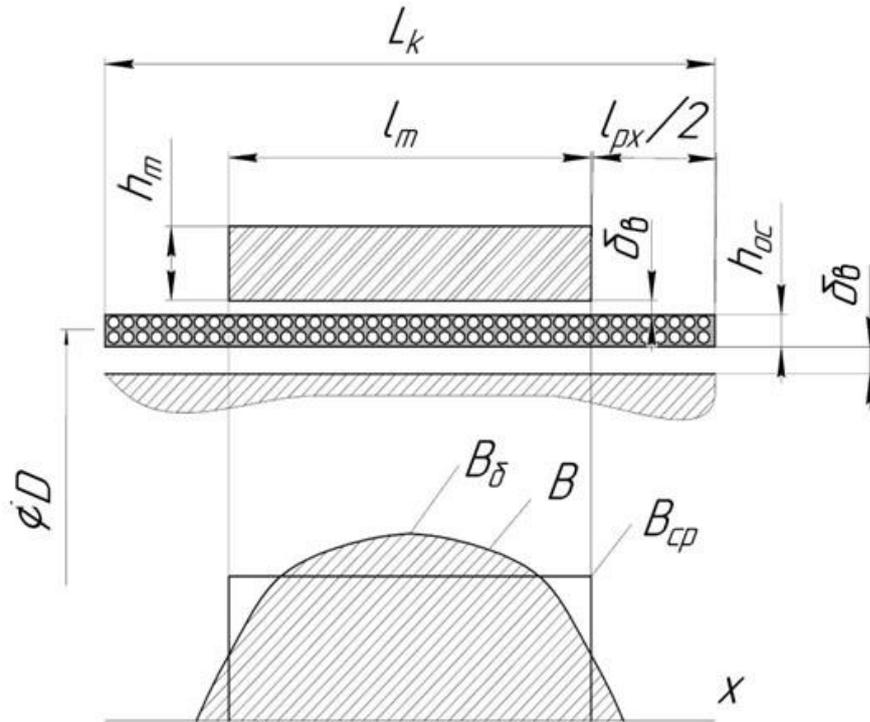


Рисунок 2.2 – К расчету магнитной цепи двигателя

$$B_{ср} = \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta}$$

При принятых ранее допущениях можно рассчитать требуемую высоту магнитов для обеспечения необходимой максимальной индукции в воздушном зазоре из соотношения

$$B_{\delta} = \frac{B_r}{k_{\sigma} + \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot B_r \cdot \delta \cdot k_{\mu}}{H_c \cdot h_m}}, \quad (2.11)$$

$$h_m = \frac{0,8 \cdot 10^6 \cdot B_r \cdot \delta \cdot k_{\mu}}{H_c (B_r - B_{\delta} \cdot k_{\sigma})}, \quad \text{м} \quad (2.12)$$

$B_r$  – остаточная индукция ПМ, Тл;

$H_c$  – коэрцитивная сила магнита, А/м;

$\delta$  – полный немагнитный зазор, складывающийся из двух воздушных зазоров  $\delta_{\text{в}}$  и высоты обмоточного слоя  $h_{\text{ос}}$ .

Расчет магнитной цепи и размеров магнитопроводов проводится по методике традиционной для электрических машин с особенностями, определяемыми конструкцией линейного двигателя (Рис.2.3).

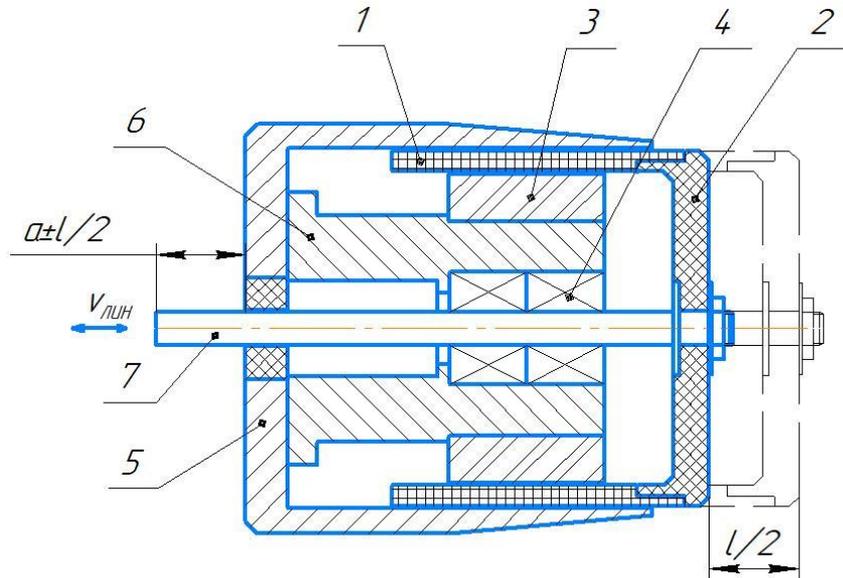


Рисунок 2.3 – Линейный двигатель постоянного тока с полым якорем. 1 - катушка полого якоря; 2- основание катушки; 3 - постоянный магнит; 4 - шарикоподшипники линейного типа; 5 - наружный магнитопровод; 6 - внутренний магнитопровод; 7 - рабочий шток.

В качестве одной из особенностей расчета магнитной цепи отметим нахождение требуемой высоты спинки внутреннего статора  $h_{j2}$ . Её величина находится как корень квадратного уравнения, определяющего величину допустимой индукции в спинке, через соответствующее сечение внутреннего магнитопровода:

$$h_{j2} = \frac{(D - h_{oc} - \delta_v - 2h_m)}{2} \pm \sqrt{\frac{(D - h_{oc} - \delta_v - 2h_m)^2}{4} - \frac{\Phi}{\pi \cdot B_{jдоп}}}$$

Отрицательное значение подкоренного выражения, которое может получиться в некоторых вариантах расчета, означает, что при данном расчетном диаметре реализовать магнитную систему с допустимым значением

индукции в спинке  $B_{j_{доп}}$  невозможно. Значение корня, полученное при знаке «минус» перед квадратным корнем –постороннее.

В результате расчета определяется суммарная МДС ферромагнитных участков и уточненное значение коэффициента насыщения магнитной цепи двигателя

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}}$$

Полученное значение сравнивается с принятым априорно и при необходимости весь расчет магнитной цепи повторяется с уточненным значением  $k_{\mu}$ .

Окончательный вариант расчета верифицируется численным моделированием МКЭ магнитостатической задачи. Пример численного моделирования ЛДПТ приведен в статье [51].

#### 2.4. Тепловой расчет

При постановке и решении задачи оптимизации в ЛДПТ одним из главных ограничителей выступает перегрев обмотки  $\Delta\theta_{об}$ , град. Кроме того, в электрической машине с использованием постоянных магнитов, критерием-ограничителем должен выступать и перегрев магнитов – многие магнитные материалы, особенно на основе *Nd-Fe-B*, чувствительны к величине рабочей температуры.

Поэтому аналитический расчет и математическая модель должны содержать блок расчёта температурного поля машины. Ввиду того, что расчёт нестационарного магнитного поля двигателя с минимальным количеством допущений весьма трудоёмкая задачи, которая неоправданно “утяжелила” бы алгоритм и программу оптимизации, автором предложено в ходе оптимизации использовать упрощённую методику и математическую модель теплового расчёта, основанную на методе тепловых схем замещения [42]. Эта методика позволяет рассчитать средние значения температур отдельных блоков,

например, среднюю температуру обмотки или постоянных магнитов. На этапе выбора оптимального варианта расчёт температурного поля предлагается провести по уточнённой методике численного моделирования методом конечных элементов.

#### 2.4.1. Расчёт двигателя методом тепловых схем замещения.

На рис. 2.4 показана схема тепловых потоков ЛДПТ.

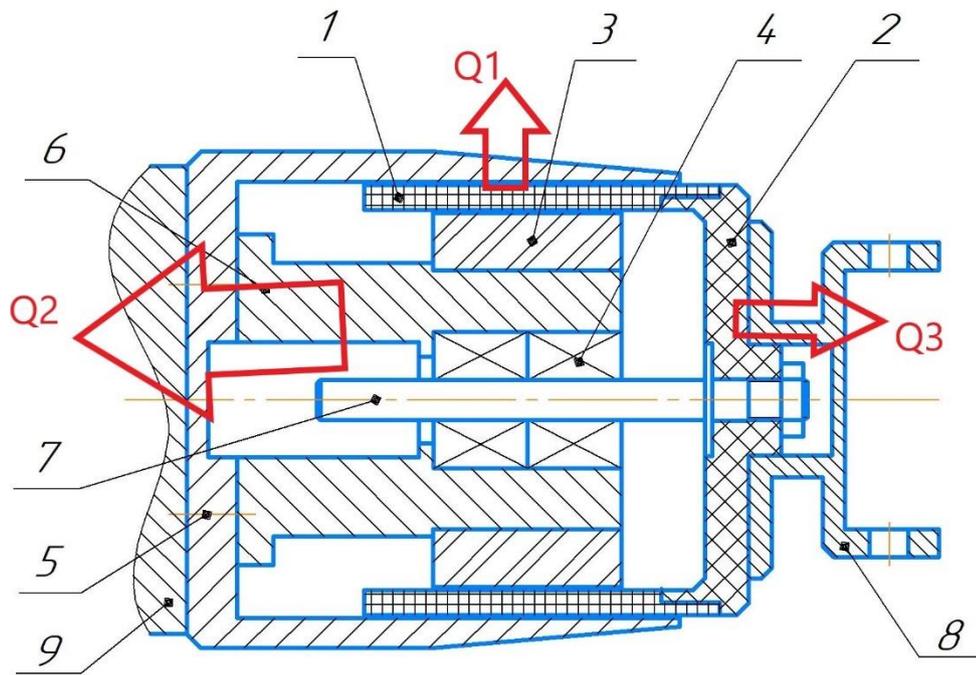


Рисунок 2.4 – Схема тепловых потоков ЛДПТ

Источником тепла в рассматриваемой задаче служат электрические потери в катушке якоря, которые легко рассчитываются или измеряются экспериментально. Другими потерями, например, механическими в линейных подшипниках, или добавочными магнитными в сердечниках статора, возникающими при движении якоря, вполне обоснованно можно пренебречь.

Распространение теплового потока от нагретого якоря (1) идет по двум основным путям: первый  $Q_1$ , через воздушный зазор и наружный магнитопровод статора (5) в окружающую среду; второй  $Q_2$ , через зазор, внутренний магнитопровод (6) к корпусу платформы (9). Есть ещё третий путь

Q3 – от катушки якоря через ее текстолитовое основание (2) к исполнительному механизму (8). Из-за низкой теплопроводности текстолита доля этого потока относительно невелика.

Все элементы двигателя, кроме катушки якоря, представляют монолитные структуры, теплоемкости и теплопроводности которых хорошо изучены и известны. Исключением является композитная гетерогенная обмотка якоря (рис.2.5), состоящая из изолированного медного обмоточного провода (1), пропиточного эпоксидного компаунда (2), межслойной изоляции (3), наружного и внутреннего стеклобандажей (4).

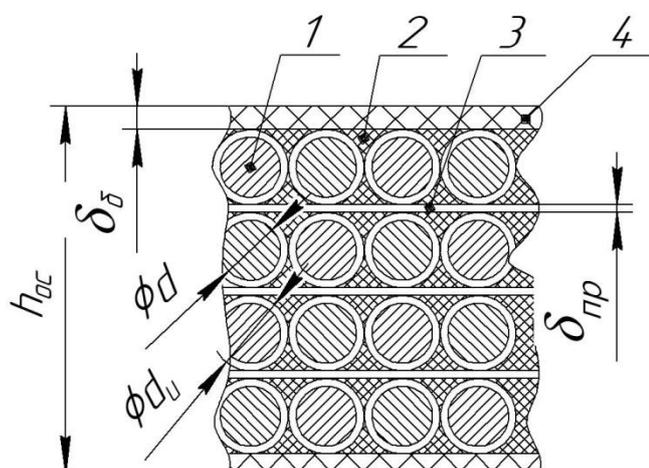


Рисунок 2.5 – Структура обмоточного слоя катушки якоря

При решении тепловой задачи физические свойства обмотки определяются коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ . Обмотки машин в тепловом отношении представляют собой гетерогенные тела со сложным распределением коэффициента теплопроводности [50]. Однако, при расчете поперечных перепадов температуры в обмотках эту гетерогенность, как правило, не учитывают, приписывая обмотке некоторый эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$  в направлении теплового потока.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмоток зависит от типа укладки, коэффициента заполнения  $k_{\text{из}}$ , коэффициента пропитки  $k_{\text{п}}$ , коэффициента теплопроводности изоляции провода  $\lambda_{\text{и}}$ , коэффициента

теплопроводности пропиточного состава  $\lambda_n$ , диаметра провода  $d_u$  и средней температуры обмотки  $T_{cp}$ . Эквивалентный коэффициент определяется сравнением термических сопротивлений элементарной ячейки сечения обмотки, выраженных через истинные и эквивалентные  $\lambda$ .

На практике коэффициент заполнения определяют «по квадратам», считая

сечением провода не  $\frac{\pi \cdot d_u^2}{4}$ , а  $d_{из}^2$ . В этом случае:

$$k_{из} = \frac{N \cdot d_{из}^2}{S_{п}}$$

Его предельное значение равно 1 для рядной укладки и 1,55 для шахматной ( $N$  – число проводников в обмотке;  $S_{п}$  – поперечное сечение катушки).

Технология изготовления якорной обмотки ЛДПТ предполагает рядную намотку и вакуумную пропитку эпоксидным компаундом. Такая технология обеспечивает коэффициент заполнения медью  $k_{из} = 0,95$  и отсутствие воздушных промежутков в композите  $\delta_b = 0$ .

Поскольку коэффициенты теплопроводности изоляции и меди отличаются на три порядка, можно принять, что температура по сечению жилы провода не меняется. Для упорядоченной обмотки при рядной укладке проводом круглого сечения (рис. 2) получим [50]:

$$\lambda_{экр} = \lambda_u^l \cdot \left( \left[ \frac{0,89 \left(\frac{d}{d_u}\right) \sqrt{k_{из}} - 0,82}{0,95 - 0,77 \left(\frac{d}{d_u}\right) \sqrt{k_{из}}} + 1,57 \right] \otimes \right. \\ \left. \otimes \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1 - 0,86 \left(\frac{d}{d_u}\right)^2 k_{из}}} - 0,9 \right) \quad (2.13)$$

Здесь  $d$  и  $d_u$  – диаметры голого и изолированного провода;  $k_{из}$  – коэффициент заполнения «по квадратам»;  $\lambda_u^l$  – эквивалентный коэффициент теплопроводности промежутков между жилами:

$$\lambda_u^l = \frac{\delta_u - \delta_v - \delta_{np}}{\frac{\delta_u}{\lambda_u} + \frac{\delta_v}{\lambda_{в.эков}} + \frac{\delta_{np}}{\lambda_{np}}} \quad (2.14)$$

где  $\delta_u$  – двусторонняя толщина изоляции провода;

$\delta_v$  – толщина воздушных промежутков между проводами;

$\delta_{np}$  – толщина изоляционной прокладки между рядами обмотки;

$\lambda_u, \lambda_{в.эков}, \lambda_{np}$  – коэффициенты теплопроводности соответствующих слоев.

Рассчитанные по выражениям (2.13) и (2.14) значения эквивалентных теплопроводностей промежутка между жилами и обмотки в целом для исследуемого ЛДПТ:

$$\lambda_u^l = 0,12 \text{ Вт/м·К} \text{ и } \lambda_{эков} = 123,1 \text{ Вт/м·К.}$$

Учитывая вышеизложенное, были приняты следующие исходные допущения:

- теплопередача через воздушные зазоры (наружный и внутренний) осуществляется только теплопередачей с постоянным коэффициентом теплопередачи  $\lambda_{возд} = 0,0266 \text{ Вт/ (м * } ^\circ\text{C)}$ ;
- теплопроводность катушки якоря в направлении теплового потока  $\lambda_{эков}$  принята с учётом коэффициента заполнения медью обмотки  $k_{эм}$ , диаметра провода  $d_{пр}$  и коэффициента пропитки  $k_{п}$ ;
- теплоотдача с наружной поверхности двигателя осуществляется только естественной конвекцией (рассматривается самый тяжелый в тепловом отношении режим, когда двигатель работает «на упор»);

- теплом, отводящимся посредством излучения пренебрегаем;
- задача решается для установившегося теплового состояния.

С учётом принятых допущений для исследуемой конструкции ЛДПТ тепловая схема замещения будет иметь вид, представленный на рис. 2.6.

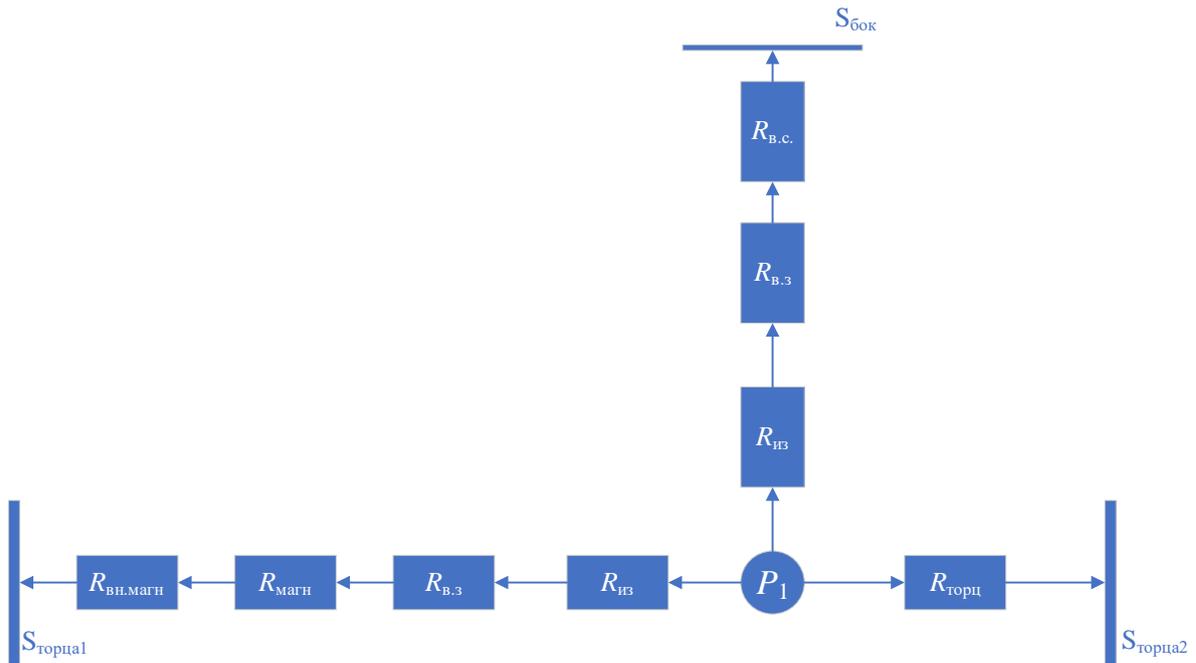


Рисунок 2.6. Тепловая схема замещения ЛДПТ.

На схеме приняты следующие обозначения:

$P_1$  – потребляемая двигателем мощность (мощность тепловыделения), Вт;

*первая ветвь:*  $R_{из}$  - эквивалентное тепловое сопротивление изоляции обмотки;  $R_{в.з}$ ,  $R_{в.с}$  – тепловые сопротивления воздушного зазора и внешнего статора;

*вторая ветвь:*  $R_{магн}$ ,  $R_{вн.магн}$  - тепловые сопротивления магнита и внутреннего магнитопровода;

*третья ветвь:*  $R_{торц}$  - тепловое сопротивление торца катушки.

При решении стационарной задачи расчета температурного состояния элементов двигателя необходимо задать источники тепла, пути распространения теплового потока и тепловые сопротивления на этих участках.

Тепловое сопротивление участков, которые характеризуются только теплопроводностью  $\lambda$  согласно [42] определяются по выражению

$$R_t = \frac{b}{\lambda \cdot S}, \text{ К/Вт},$$

где  $b$  – толщина стенки,  $S$  – площадь,  $\text{м}^2$ .

Перепад температуры,  $K$

$$\Delta\theta = Q \frac{b}{\lambda \cdot S} = R_t \cdot Q.$$

Аналогично, для участков теплоотдачи с поверхности в окружающий воздух, мощность теплового потока, Вт

$$Q = \alpha \cdot \Delta\theta \cdot S_{\Pi},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности  $S_{\Pi}$ ,  $\text{Вт/м}^2\text{К}$ .

Соответственно

$$\Delta\theta = R_{\Pi} \cdot Q,$$

и тепловое сопротивление поверхности нагретой стенки,  $\text{К/Вт}$ ,

$$R_{\Pi} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{\Pi}},$$

В многослойной структуре, которую представляет собой тепловая схема ЛДПТ, перепад температуры равен сумме перепадов в отдельных слоях. Следовательно, тепловое сопротивление одной ветви схемы замещения равно сумме последовательных сопротивлений всех слоев

$$R_{Bj} = \sum_{i=1}^k R_i,$$

где  $R_i$  – тепловое сопротивление  $i$ -го участка;  $k$  – число последовательных участков.

Так как в схеме три параллельные ветви, то суммарное тепловое сопротивление можно рассчитать, как

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2} \cdot R_{B3}}{R_{B1} + R_{B2} + R_{B3}}.$$

Результаты расчета температуры по описанной методике приведены в табл.2.3. Там же эти результаты сравниваются с результатами численного моделирования и эксперимента.

#### **2.4.2. Численное моделирование температурного поля**

Для проверки результатов упрощенного теплового расчета ЛДПТ, проведенного методом тепловых схем замещения было проведено численное моделирование температурного поля машины в программном комплексе ELCUT [88].

Задача решалась в осесимметричной постановке при допущении, что геометрическая модель имеет центральную симметрию по оси двигателя  $z$ . Физические свойства блоков постоянны для любого радиус-вектора  $r$  и не зависят от угловой координаты  $\varphi$ . Моделировался установившийся тепловой режим. В качестве исходных данных были приняты параметры опытного образца ЛДПТ, приведенные в табл.2.1. Геометрическая модель соответствует приведенной на рис.2.4.

Таблица 2.1

## Основные параметры ЛДПТ

№	Параметр	Значение
1.	Номинальное усилие, Н	20
2.	Рабочий ход якоря, мм	±8
3.	Напряжение питания, В	27
4.	Ток при номинальном усилии, А	0,81
5.	Наружный диаметр, мм	69
6.	Длина в среднем положении якоря, мм	90
7.	Потребляемая мощность при номинальном усилии, Вт	23
8.	Масса, кг	1,8

Для стационарной задачи температурного поля физические свойства блоков задавались согласно приведенным в таблице 2.2.

Таблица 2.2

## Физические свойства блоков геометрической модели

№	Блок	Физические свойства	Источник теплового поля
1	Катушка якоря	$\lambda_{\text{ЭКВ}} = 123 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	$Q = 828000 \text{ Вт/м}^3$
2	Магнит	$\lambda = 9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	-
3	Магнитопровод	$\lambda = 48 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	-
4	Воздух	$\lambda = 0,0266 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	-
5	Стеклотекстолит	$\lambda = 0,44 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$	-

Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности двигателя был принят для спокойного воздуха без дополнительного обдува  $\alpha_{\text{в}} = 18 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

Граничные условия задавались для стандартного значения температуры окружающей среды  $T_{\text{охл}} = 313\text{K}$  ( $40^{\circ}\text{C}$ ).

Результаты моделирования температурного поля двигателя при этих условиях приведены на рис.2.6 в виде изотерм.

Максимальная температура  $373,5\text{K}$  ( $100,4^{\circ}\text{C}$ ), отмечается в катушке якоря. Температура наружной поверхности двигателя и постоянных магнитов, соответственно  $339,3\text{K}$  ( $66,2^{\circ}\text{C}$ ) и  $329,7\text{K}$  ( $56,6^{\circ}\text{C}$ ).

Сравнение результатов, полученных в эксперименте, с результатами, рассчитанными по методике тепловых схем замещения и численным моделированием методом конечных элементов дано в табл.2.3.

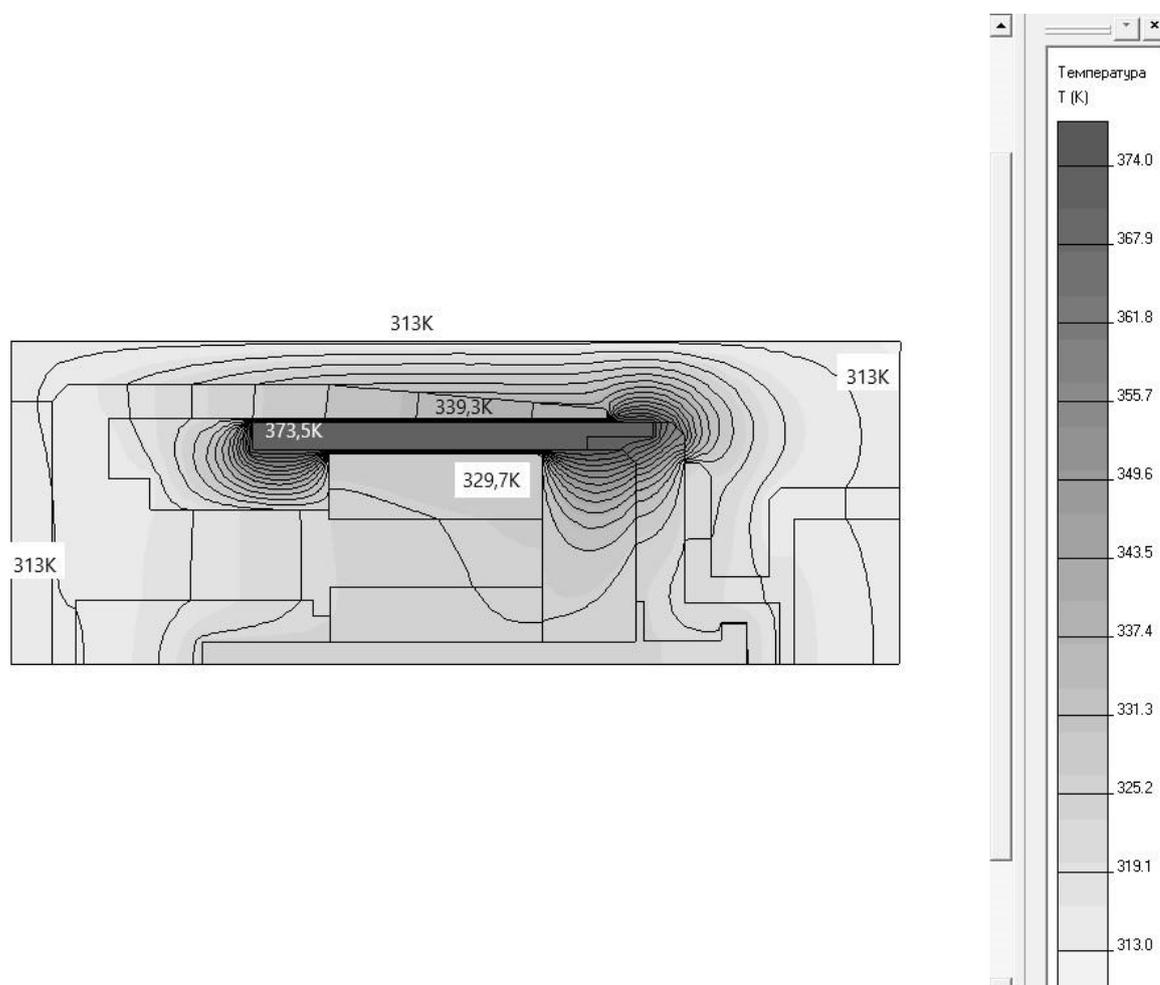


Рисунок 2.6 – Температурное поле ЛДПТ по результатам моделирования

Температура элементов двигателя

№	Элемент двигателя	Установившаяся температура, К (°С)		
		По тепловой схеме замещения	МКЭ	Эксперимент (пересчет на $T_{нач}=313\text{К}$ )
1	Катушка якоря	364,4 (91,3)	373,5 (100,4)	371,8 (98,7)
2	Магнит	320,0 (46,9)	329,7 (56,6)	-
3	Наружная поверхность статора	331,2 (58,1)	339,3 (66,2)	337,6 (64,5)

Метод тепловых схем замещения для расчета температур активных частей линейного двигателя постоянного тока – катушки и постоянных магнитов, дает погрешность вычисления от 5 до 10%. Такая точность приемлема на этапе предварительного оптимизационного расчета, когда необходимо определить лимитирующее значение температуры. На этапе уточненного расчета для выбранного по результатам оптимизации варианта лишь численный метод моделирования МКЭ обеспечивает требуемую точность.

### 2.5. Алгоритм расчетной математической модели ЛДПТ

Расчетная математическая модель, связывающая выходные и входные параметры двигателя и предназначенная для компьютерного проектирования ЛДПТ, позволяет аналитическими и численными методами, с достаточной для проектировщика точностью, рассчитать вариант машины с заранее заданными статическими и динамическими параметрами.

Разработанная автором расчетная математическая модель представлена в виде последовательности формул для расчета геометрических размеров, параметров магнитов и обмотки, потерь в якоре, средних температур активных частей в функции значений варьируемых переменных и данных технического

задания. Математическая модель учитывает ограничения по максимальной допустимой температуре постоянных магнитов и обмотки якоря. Модель реализована автором в виде программы «LDPT\_01» в Mathcad.

Алгоритм расчета позволяет варьировать значения пяти независимых переменных:

- $U$ , напряжение питания;
- $A$ , линейная нагрузка якоря;
- $B_{\delta}$ , максимальная индукция в воздушном зазоре;
- $n_{сл}$ , число слоев обмотки якоря;
- $l_m$ , длина магнита.

На выходе программы получаем значения параметров, которые в зависимости от поставленной задачи оптимизации, могут выступать в качестве частных критериев оптимальности (масса двигателя, масса магнитов, габаритные размеры, потребляемая мощность). Если задачей оптимизации является отыскание экстремума обобщенного критерия, то программа открыта для его вычисления различными методами.

Схема алгоритма состоит из следующих блоков (рис.2.7):

1 - объявление переменных и констант;

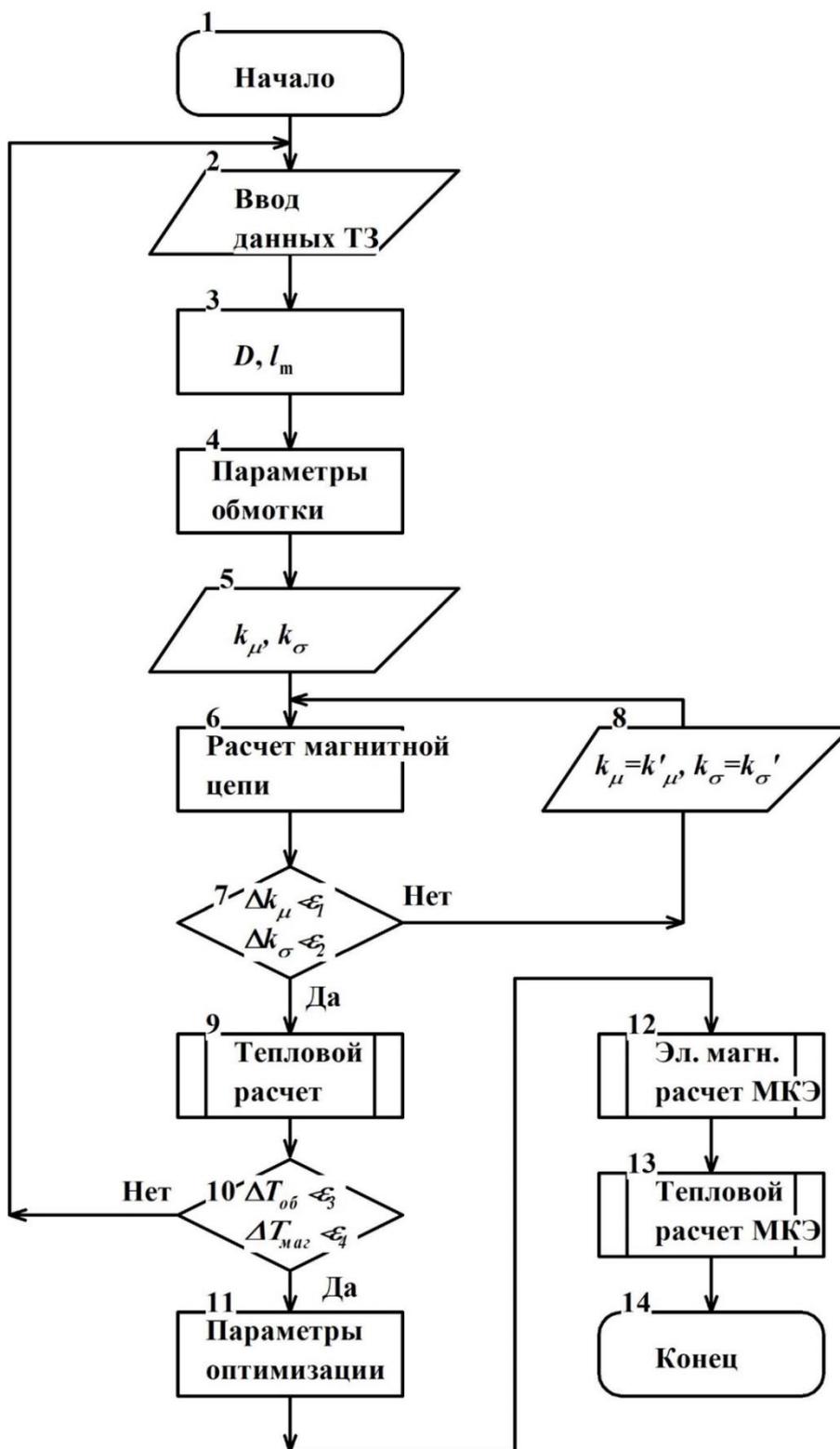


Рисунок 2.7 – Алгоритм расчетной математической модели ЛДПТ

- 2 - ввод данных ТЗ и начальных значений варьируемых переменных  $\lambda$ ,  $A$ ,  $B_\delta$ ,  $n_{сл}$ ,  $l_m$ ;
- 3 - расчет главных размеров;
- 4 - расчет якоря и параметров обмотки;
- 5- задание предварительных значений коэффициентов рассеивания и насыщения магнитной цепи;
- 6 - расчет сечений участков магнитной цепи и МДС этих участков;
- 7 - проверка значений  $k_\sigma$  и  $k_\mu$ , принятых априорно;
- 8 - корректировка  $k_\sigma$  и  $k_\mu$ ;
- 9 - подпрограмма теплового расчета методом тепловых схем замещения;
- 10 - проверка допустимых значений температуры обмотки и магнитов;
- 11 - вычисление значений параметров оптимизации (масса двигателя, масса магнитов, габаритные размеры, потребляемая мощность);
- 12 - подпрограмма уточняющего электромагнитного расчета методом конечных элементов (магнитостатическая задача);
- 13 - тепловой расчет МКЭ;
- 14 - вывод результатов; окончание расчета.

Разработанная математическая модель служит основой для оптимизационного расчета двигателя, который может осуществляться различными методами направленного или ненаправленного поиска экстремума целевой функции.

## 2.6. Выводы по главе 2

1. Предложенный алгоритм расчета позволяет создать вариативную математическую модель линейного двигателя постоянного тока, основанную на физических закономерностях прямого преобразования электрической мощности в линейное перемещение рабочего органа, учитывающую конструктивные особенности возбуждения от постоянных магнитов и полый конструкции якоря.

2. Математическая модель определяет зависимости выходных параметров двигателя (потребляемой мощности, массы постоянных магнитов, массогабаритных характеристик, температуры активных частей машины и др.) в функции независимых варьируемых переменных и данных технического задания (номинального усилия, напряжения питания, магнитной индукции в зазоре, линейной нагрузки, числа слоев обмотки якоря, относительной длины якоря и(или) длины магнитов).
3. Доказано, что метод тепловых схем замещения для расчета средних температур активных частей линейного двигателя постоянного тока – катушки и постоянных магнитов, дает погрешность вычисления от 5 до 10%. Такая точность приемлема на стадии оптимизации двигателя, но окончательный вариант должен проверяться расчетом температурного поля методом конечных элементов.
4. Верификация расчётной модели температурного поля линейного двигателя, проведенная на опытном образце экспериментально, подтвердила корректность теоретических положений и принятых допущений при моделировании МКЭ.

### **3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Представленная во второй главе настоящей работы математическая модель ЛДПТ с полым якорем послужила ядром для алгоритма и программы его параметрической оптимизации. Задача оптимизации линейного двигателя состоит из следующих основных блоков:

- определение цели, параметров и критериев оптимальности;
- выявление множества независимых варьируемых переменных (факторов);
- разработка математической модели объекта оптимизации;
- предварительный анализ функции отклика и по его результатам выбор метода оптимизации;
- оптимизация объекта выбранным методом и анализ полученных результатов.

#### **3.1. Постановка задачи и критерии оптимальности.**

Объектом оптимизации в представленной работе является линейный двигатель постоянного тока (ЛДПТ), предназначенный для системы позиционирования и стабилизации оптико-механического комплекса бортового применения. ЛДПТ должен по своему назначению обеспечивать работу в двух режимах: в режиме позиционирования якорь двигателя обеспечивает перемещение рабочего органа в определенном диапазоне рабочего хода с усилием, заданным ТЗ; во втором режиме двигатель работает как электромагнитный демпфер в системе стабилизации оптико-механической платформы, обеспечивая в генераторном режиме гашение колебаний основания устройства. Свойство обратимости линейных электрических машин часто используется в комплексах, где допускается изменение режима работы с двигательного на генераторный, например, в электромагнитных демпферах, которые являются частью активной подвески современных автомобилей, или

систем стабилизации космических и авиационных систем. Как для всех бортовых систем ЛА можно определить общие показатели качества, которые определяют выбор критериев оптимальности исследуемого комплекса:

- минимальная полетная масса изделия;
- минимальные габариты;
- минимальная потребляемая мощность.

К специфическим требованиям, определяющим качество комплекса, следует отнести:

- максимальное собственное быстродействие ЛДПТ, которое напрямую связано с точностью позиционирования;
- отсутствие колебаний электромагнитного усилия во всем диапазоне рабочего хода якоря;
- исключение явлений магнитного и механического гистерезиса;
- линейность силовой характеристики от величины тока в обмотке якоря.

К общим критериям качества электрических машин традиционно относят:

- минимальную себестоимость;
- технологичность производства.

Часть из перечисленных критериев качества были исследованы в первой главе настоящей работы при выборе предпочтительной конструктивной схемы двигателя. К этим параметрам можно отнести обеспечение максимального быстродействия и равномерности электромагнитного усилия за счет использования беспазовой, безжелезной конструкции якоря. Другая их часть может рассматриваться в качестве исходных величин для параметрической оптимизации исследуемого объекта.

Постановка задачи параметрической оптимизации должна начинаться с определения цели [3,54] исследования. Для этого очень важно определить параметр, который нужно оптимизировать. Эта задача далеко не всегда очевидна, с трудом поддается формализации и относится к творческой составляющей исследования. Цель оптимизации должна быть четко

сформулирована и допускать количественную оценку. Характеристику цели, заданную количественно, будем называть, как принято в [3], параметром оптимизации.

Под оптимизацией понимается процесс нахождения максимума или минимума функции цели (параметра оптимизации

$$Y(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.1)$$

при условии, что изображающая точка в пространстве варьируемых факторов  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  принадлежит допустимому множеству  $Dx$ , которое определяется совокупностью неравенств

$$N_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \lessgtr 0, \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad (3.2)$$

где  $N_i$ , - некоторая функция факторов  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , накладывающая ограничения на предельно допустимые значения некоторых из них, например, положительность или их целночисленность в силу физического смысла. Из-за нестрогости неравенств (3.2), допускающих возможность равенства, эти ограничения могут изображаться не только поверхностями в  $n$ - мерном пространстве, но и линиями или отдельными точками на поверхности функции цели [54]. На практике, совокупность неравенств (3.2) вырождается в некоторые функции, которые принято называть функциями ограничителями. Наиболее наглядным примером такой функции является ограничение по перегреву обмотки якоря или допустимой температуре постоянных магнитов. В некоторых случаях вводятся искусственные ограничения, которые называют штрафными функциями. Штрафные функции применяют для частных и обобщенных параметров оптимизации, когда имеется необходимость исследовать поверхность отклика за границами ограничителей, выраженных в «мягкой» форме. Более подробно штрафные функции описаны в разделе (3.3).

Параметр оптимизации — это признак, по которому мы хотим оптимизировать объект [3]. Он должен быть количественным, задаваться

числом. Мы должны уметь его измерять или вычислять при любой возможной комбинации выбранных уровней варьируемых переменных. Множество значений, которые может принимать параметр оптимизации, называют областью его определения. Области определения могут быть непрерывными и дискретными, ограниченными и неограниченными. Желательно, чтобы параметр оптимизации имел физический смысл, был простым и легко вычисляемым (измеряемым). Это связано с последующей интерпретацией результатов эксперимента.

При решении практических задач оптимизации, как правило, объект характеризуется не одним, а несколькими параметрами, определяющими его качество.

Анализируя требования к ЛДПТ, изложенные выше, автором были выбраны в качестве частных параметров оптимизации следующие величины:

- $y_1$ , (mm), кг - масса постоянных магнитов;
- $y_2$ , (D·Lk), м<sup>2</sup> - произведение расчетного диаметра якоря на активную длину катушки якоря;
- $y_3$ , (P<sub>1</sub>), Вт - потребляемая мощность при номинальном усилии;
- $y_4$ , (m), кг - масса активных частей машины.

Математические модели можно построить для каждого из этих параметров, но одновременно оптимизировать несколько, функций невозможно.

Поэтому, обычно оптимизируется одна функция, наиболее важная с точки зрения цели исследования, при ограничениях, налагаемых другими функциями. Для этого из многих выходных параметров выбирается один в качестве параметра оптимизации, а остальные служат ограничениями. Всегда полезно исследовать возможность уменьшения числа выходных параметров. Для этого можно воспользоваться корреляционным анализом.

Между всеми парами параметров ЛДПТ были вычислены коэффициенты парной корреляции, которые является общепринятой в математической

статистике характеристикой связи между двумя случайными величинами. Если обозначить один параметр через  $y_1$  а другой — через  $y_2$ , и число опытов, в которых они будут измеряться, — через  $N$ , так, что  $u=1, 2, \dots, N$ , где  $u$  — текущий номер опыта, то коэффициент парной корреляции  $r$  вычисляется по формуле

$$r = \frac{\sum_{u=1}^N (y_{1u} - \bar{y}_1)(y_{2u} - \bar{y}_2)}{\sqrt{\sum_{u=1}^N (y_{1u} - \bar{y}_1)^2 \sum_{u=1}^N (y_{2u} - \bar{y}_2)^2}}.$$

Здесь

$$\bar{y}_1 = \sum_{u=1}^N y_{1u} / N \quad \bar{y}_2 = \sum_{u=1}^N y_{2u} / N$$

и

средние арифметические соответственно для  $y_1$  и  $y_2$ .

Как показали дальнейшие исследования, параметр,  $y_4$  (масса активной части машины), тесно коррелирует с параметром  $y_2$  (произведение  $D \cdot Lk$ ). Коэффициент парной корреляции для них составил  $r_{24} = 0,85$  при числе степеней свободы  $f = 12$ , что свидетельствует о подтверждении гипотезы их линейной зависимости. Для  $\alpha = 0,05$   $r_{кр} = 0,533$ ,  $r_{24} > r_{кр}$ . Учитывая, что произведение  $D \cdot Lk$  можно определить на ранних этапах расчета и с большой точностью, коррелированный с ним параметр  $y_4$  можно из оптимизационного расчета исключить и учитывать его при анализе результатов уточненного расчета.

Остальные пары частных параметров показали слабую корреляционную связь. Поэтому в дальнейших оптимизационных расчетах рассматривались только три первых параметра оптимизации.

Исходя из физического смысла критериями оптимальности для всех трех частных параметров будет их минимум:  $\text{Min}(y_i)$ .

Очевидно, что оптимумы трех параметров не совпадают. Из основных электромагнитных соотношений следует, например, что минимальная

потребляемая мощность двигателя будет в вариантах с самой большой массой постоянных магнитов, а минимальные размеры активных частей будут у машины с максимальной линейной нагрузкой, а следовательно, и с максимальной потребляемой мощностью.

Из теории оптимизации известно, что задачи с несколькими независимыми частными критериями не имеют единственного решения. На практике многокритериальные задачи сводятся к однокритериальной, или решаются компромиссными методами, например, нахождением множества Парето [3,54], в котором нельзя улучшить какой-либо частный параметр, не ухудшив значения всех остальных. В технических задачах, подобных исследуемой, при жестко заданных ограничителях, множество Парето как правило, оказывается пустым.

Другим способом решения этой проблемы является сведение многокритериальной задачи к однокритериальной. Существует несколько таких методов. Самый простой, но не всегда дающий желаемый результат, заключается в том, что выбирается один главный параметр оптимизации, а остальные выступают в качестве ограничителей.

Наиболее универсальными и полными являются обобщенные параметры оптимизации, которые строятся как функции нескольких частных параметров. Достоинством метода сведения многокритериальной задачи к однокритериальной посредством построения обобщенного параметра является то, что при правильном определении весовых коэффициентов и масштабов перехода к безразмерным шкалам для частных параметров, удастся получить оптимальный компромиссный вариант.

Для построения обобщенного параметра оптимизации ЛДПТ воспользуемся функцией желательности Харрингтона [54]. В основе построения этой обобщенной функции лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу предпочтительности. Ее назначение — перевод размерных физических частных параметров в безразмерную шкалу. Под физическими параметрами

понимаются частные отклики, которые были приняты ранее ( $y_1$ ,  $y_2$  и  $y_3$ ), характеризующие качество исследуемого объекта. Чтобы получить шкалу желательности, удобно пользоваться готовыми разработанными таблицами соответствий между отношениями предпочтения в эмпирической и числовой (психологической) системах [54] (табл. 3.1).

Значение частного отклика, переведенное в безразмерную шкалу желательности, обозначается через  $d_u$  ( $u=1, 2, \dots, n$ ) и называется частной желательностью (от desirable фр. — желательный).

Функция желательности Харрингтона описывается уравнением

$$d = \exp(-\exp(-y')). \quad (3.3)$$

Значение каждого частного отклика  $y_i$  для подстановки в уравнение (3.3) необходимо трансформировать в безразмерную величину  $y_i'$ :

$$y_i' = \frac{y_i - y_{i0}}{\Delta y_i} \quad (3.4)$$

где  $y_{i0}$  — минимально удовлетворительное значение соответствующего частного параметра.

Таблица 3.1.

Стандартные отметки на шкале желательности

Желательность	Отметки на шкале желательности
Очень хорошо	1,00-0,80
Хорошо	0,80—0,63
Удовлетворительно	0,63—0,37
Плохо	0,37—0,20
Очень плохо	0,20—0,00

Шкала желательности имеет интервал от нуля до единицы. Значение  $d_u = 0$  соответствует абсолютно неприемлемому уровню данного параметра, а значение  $d_u = 1$  — самому лучшему его значению. Понятию «очень хорошо»

соответствуют значения на шкале желательности  $1 < d_u < 0,8$ , а понятию «очень плохо» —  $0 < d_u < 0,2$  и т. д. (рис. 3.1).

Выбор отметок на шкале желательности 0,63 и 0,37 объясняется удобством вычислений:

$$0,63 \cong 1 - e^{-1};$$

$$0,37 \cong e^{-1}.$$

Значение  $d_u=0,37$  обычно соответствует границе минимально удовлетворительного значения параметра.

Общепризнанными достоинствами выражения (3.3) является то, что функция Харрингтона определена на всем диапазоне аргумента от  $-\infty$  до  $+\infty$ , обладает такими полезными свойствами как непрерывность, монотонность и гладкость. Кроме того, эта кривая хорошо передает тот факт, что в областях желательностей, близких к 0 и 1, «чувствительность» ее существенно ниже, чем в рабочей средней зоне.

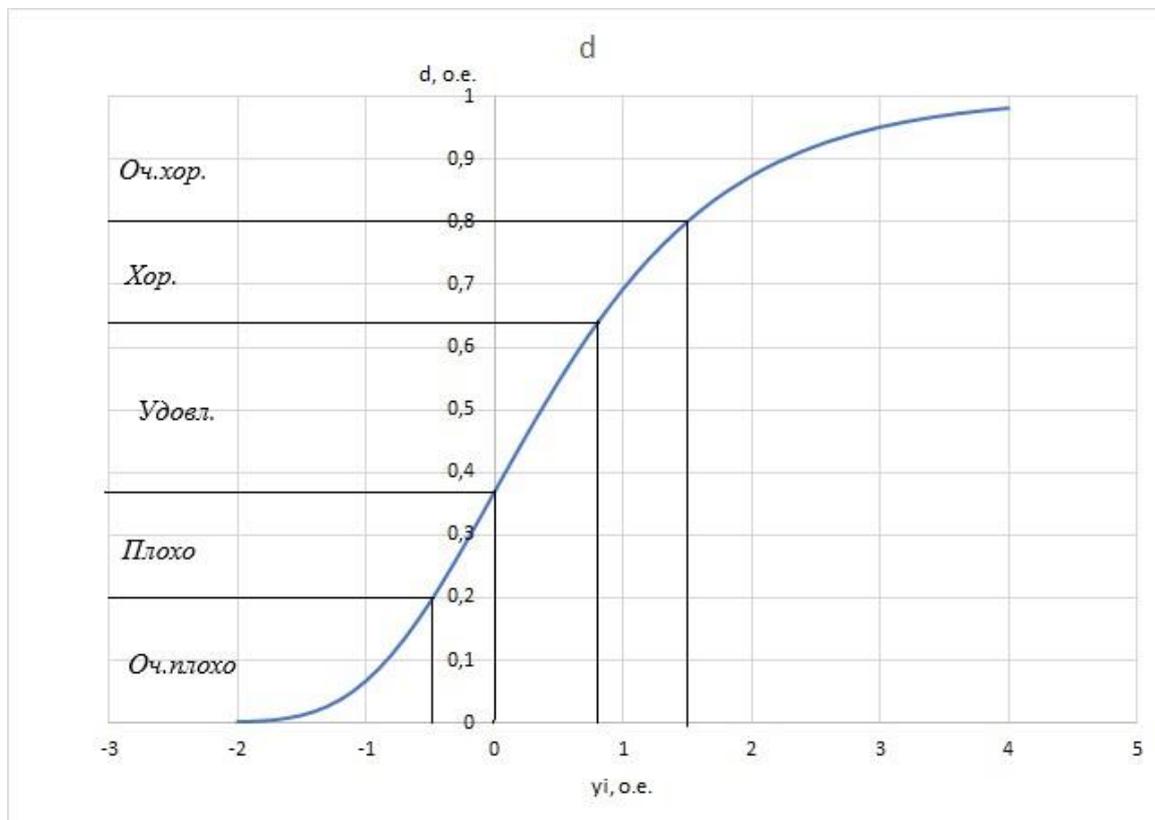


Рисунок 3.1 Функция желательности Харрингтона

Так как для всех трех частных параметров оптимальности ЛДПТ критерием оптимальности является их минимальное значение, то для наглядности имеет смысл ось абсцисс отразить зеркально. На рис.3.2 приведен график преобразования значений массы постоянных магнитов ( $m$ , кг) из абсолютных значений в относительные единицы ( $dmm$ , о.е.). За минимально удовлетворительное значение принята масса магнитов 0,12 кг. Ему соответствует относительная величина  $dmm = 0,37$  о.е.

Диаграмма преобразования значений потребляемой ЛДПТ мощности в относительные единицы показана на рис.3.3. Для потребляемой мощности минимально удовлетворительное значение принято  $P_1=30$  Вт (0,37 о.е.).

Аналогично была построена диаграмма для преобразования и третьего частного параметра  $y_3$  – произведения  $D*Lk$ .

Отметим, что диаграммы Харрингтона приведены для наглядной графической интерпретации, а в компьютерных расчетах для синтеза обобщенного параметра оптимизации использовались выражения (3.3) и (3.4).

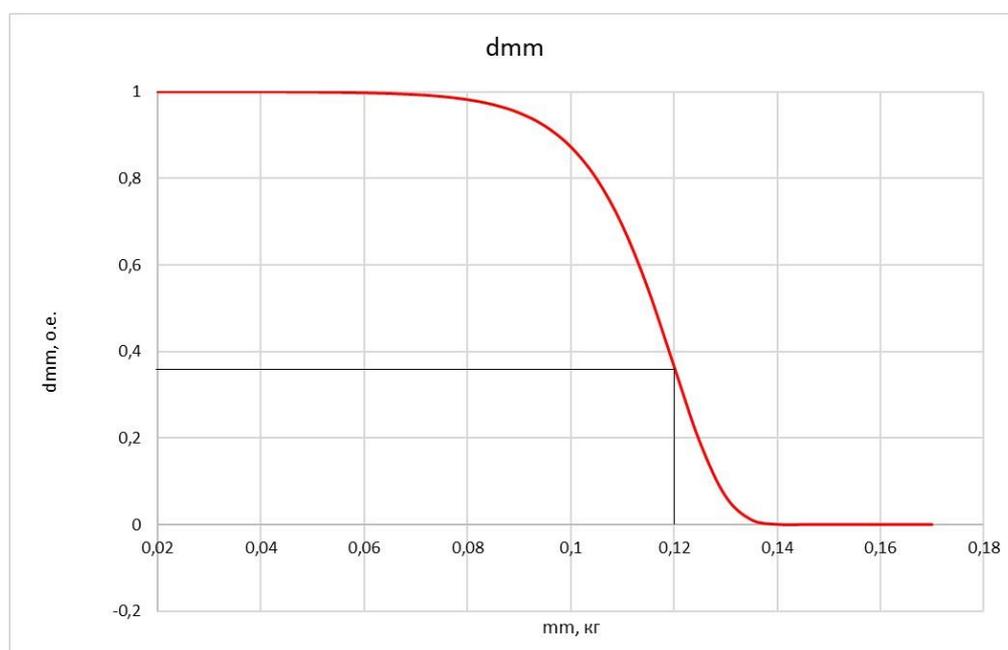


Рисунок 3.2 - Преобразование абсолютных значений массы ПМ в относительные единицы

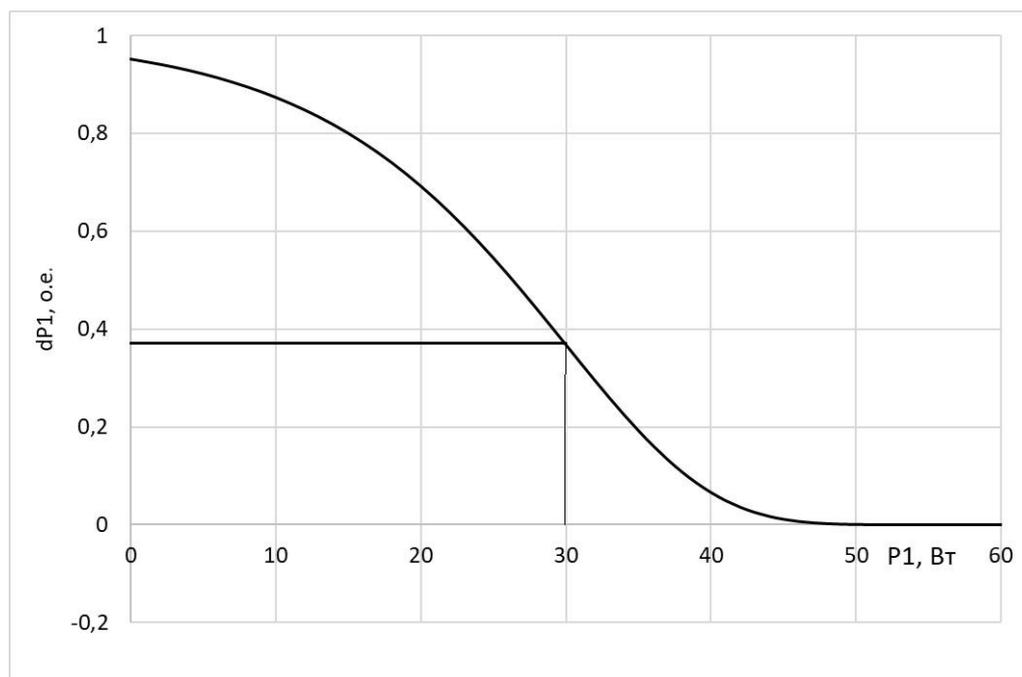


Рисунок 3.3 - Преобразование абсолютных значений потребляемой мощности в относительные единицы

Следующим этапом постановки задачи оптимизации ЛДПТ является синтез обобщенного параметра оптимизации  $Y$  на основе полученных безразмерных величин частных параметров  $d_{y1}$ ,  $d_{y2}$ ,  $d_{y3}$ . Известны [3,54] два основных способа построения обобщенного отклика: в виде произведения частных параметров и в виде их суммы.

Построение обобщенного отклика в виде произведения осуществляется по выражению

$$Y_i = \sqrt{\prod_{u=1}^n y_{ui}},$$

где  $Y_i$  — обобщенный отклик в  $i$ -м опыте;  $\prod_{u=1}^n y_{ui}$  — произведение частных откликов  $y_{1i}$ ,  $y_{2i}$ , ...,  $y_{ni}$ .

Корень мы ввели для того, чтобы связать эту формулу с другой, более сложной, которая будет рассмотрена далее. В данном же случае ничего не изменится, если записать

$$Y_i = \prod_{u=1}^n y_{ui}.$$

Очевидно, что такой подход зачастую излишне жёсток, так как при одном неудовлетворительном значении частного параметра, произведение также будет стремиться к нулю, даже если остальные параметры будут иметь очень высокие значения.

Более толерантным является способ построения обобщенного отклика в виде суммы или среднего арифметического от частных:

$$Y = \sum_{j=1}^n d_j$$

или

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j. \quad (3.5)$$

Выражение (3.5) удобно еще и тем, что в нем можно использовать весовые коэффициенты значимости отдельных частных параметров  $\alpha_{y_i}$ , как в формуле (3.6).

$$Y = \frac{1}{n} (\alpha_1 \cdot d_{y1} + \alpha_2 \cdot d_{y2} + \alpha_3 \cdot d_{y3}) \quad (3.6)$$

Весомость коэффициентов  $\alpha_i$  определяется назначением объекта оптимизации и требованиями к его характеристикам. Для того, чтобы  $Y$  мог принимать значения от 0 до 1, необходимо выполнение условий:

$$\alpha_i = [0 \dots 1],$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = n.$$

В результате проведенного анализа для параметрической оптимизации ЛДПТ были выбраны три частных параметра оптимизации:

- суммарная масса постоянных магнитов;
- потребляемая мощность двигателя при номинальном усилии на штоке;
- произведение расчетного диаметра якоря на активную длину катушки.

Для сведения многокритериальной задачи к однокритериальной был построен обобщенный параметр оптимизации на основании перехода к безразмерной шкале Харрингтона в виде среднего арифметического частных откликов с учетом их весовых коэффициентов.

### 3.2. Варьируемые переменные

Во второй главе диссертации была описана математическая модель ЛДПТ с полым немагнитным якорем и возбуждением от постоянных магнитов. Расчетная модель построена на основании электромагнитных соотношений и зависимостей параметров и характеристик машины от величин определенных техническим заданием и исходных значений некоторых независимых переменных, которые могут в определенных пределах изменять свои значения по воле проектировщика. Эти величины в теории оптимизации называют *варьируемыми переменными* или *факторами*.

В теории планирования эксперимента к факторам и их совокупности предъявляются определенные требования [3]:

- *управляемость*, то есть, исследователь должен иметь возможность задавать любые их значения (уровни) из области определения;
- *независимость*, - факторы не могут быть парно коррелированными;
- *совместимость*, - следует исключить несовместимые по физическим свойствам пары варьируемых переменных.

Общим требованием при постановке задачи оптимизации является определение количества варьируемых переменных, как необходимое и достаточное. С одной стороны, следует учесть все факторы, существенно влияющие на параметр оптимизации, с другой стороны – количество факторов желательно минимизировать для сокращения количества вариантов расчета

(«опытов»). Количество вариантов расчета зависит от числа факторов в показательной степени:

$$N = p^k,$$

где  $N$  - число вариантов расчета;  $p$  - число уровней факторов;  $k$  - количество независимых варьируемых переменных.

С учетом изложенного, для описания основных зависимостей выходных параметров ЛДПТ от входных, были определены пять независимых варьируемых переменных:

- $U$ , напряжение питания, В;
- $A$ , линейная нагрузка якоря, А/м;
- $B_\delta$ , максимальная индукция в воздушном зазоре, Тл;
- $n_{\text{сл}}$ , число слоев обмотки якоря;
- $l_m$ , длина магнита, м.

На значения каждого из этих факторов накладываются некоторые ограничения. Так линейная нагрузка ограничена величиной теплового фактора, от которого зависят перегрев обмотки и допустимый перегрев постоянных магнитов. Индукция в воздушном зазоре ограничена насыщением стальных участков магнитопровода, а число слоев обмотки должно быть целым четным числом из-за возможности вывода концов обмотки только со стороны основания якоря.

Исходя из опыта проектирования и ограничений, приведенных выше были определены диапазоны варьирования факторов.

Напряжение питания,  $U = [10...60]$ , В. По техническому заданию машина должна питаться от низковольтного источника питания. Может задаваться, хотя и не обязательно, стандартное значение напряжение питания из ряда 12, 18, 24(27), 36, 48, 60 вольт.

Линейная нагрузка якоря,  $A = [7000...20000]$ , А/м. Такой диапазон выбран из опыта проектирования микромашин близких по габаритам, мощности и способу охлаждения.

Максимальная индукция в воздушном зазоре,  $B_{\delta} = [0,2...0,8]$  Тл. Такой диапазон определен исходя из возможностей выбранного типа и марки магнитов. При изменении марки ПМ диапазон может быть изменен.

Число слоев обмотки якоря  $n_{сл} = [2...12]$ . Значения целые, четные. Это определяется технологическими ограничениями.

Длина магнита,  $l_m = [0,015...0,03]$ , м. Диапазон значений был выбран из опыта проектирования и предварительных расчетов ЛДПТ.

Все диапазоны выбраны с существенным запасом. Это, естественно, увеличивает количество вариантов расчета, но понижает вероятность возможной потери оптимальной точки за границей диапазона варьирования факторов.

### 3.3. Параметры ограничителя

Параметры ограничителя могут иметь различную природу. Это могут быть ограничения, связанные с технологическими процессами, которые необходимо учитывать при постановке на производство оптимизируемого изделия. Подобные ограничения зачастую связаны с возможностью технологического оборудования обеспечивать, например, заданную точность изготовления деталей, или с обеспечением требуемой производительности обмоточного и иного станочного парка. На этапе разработки нового изделия, каким является ЛДПТ, технологические ограничения не входят в круг исследуемых вопросов, подлежащих рассмотрению в представляемой работе. В работе не рассматриваются также экономические ограничения, связанные со стоимостью изделия и капитальными затратами на его производство. Исключением здесь служит один из экономических параметров – стоимость постоянных магнитов, которая косвенно учитывается через их потребную массу – один из частных параметров оптимизации.

В настоящем исследовании при оптимизации в качестве ограничителей учитываются физические параметры, которые определяют работоспособность двигателя и возможность его технической реализации.

В первую очередь, это *величина перегрева обмотки якоря*. Так как линейная нагрузка якоря выбрана в качестве варьируемой величины, то очевидно, что ЛДПТ будет иметь минимальные габариты и массу магнитов при максимальной токовой нагрузке, значения которой ограничиваются допустимым для выбранного класса термостойкости изоляции перегревом обмотки якоря. Нарушение данного ограничения сопровождалось в варианте расчета меткой «*Перегрев обмотки*».

Вторым ограничителем по теплу выступает *величина допустимой рабочей температуры постоянных магнитов*. Если для ПМ на основе SmCo значения рабочих температур превышают 200<sup>0</sup>С без необратимой потери магнитных свойств, то неодимовые магниты многих, относительно дешевых марок, теряют при нагреве  $-0.11\%/^{\circ}\text{C}$  по индукции и  $-0.60\%/^{\circ}\text{C}$  по намагниченности. При рабочей температуре 80-100<sup>0</sup>С их магнитная энергия снижается на 30-40%.

Поэтому аналитический расчет и математическая модель содержат блок расчёта температурного поля машины. Ввиду того, что расчёт нестационарного магнитного поля двигателя с минимальным количеством допущений весьма трудоёмкая задача, которая неоправданно “утяжелила” бы алгоритм и программу оптимизации, автором предложено в ходе оптимизации использовать упрощённую методику и математическую модель теплового расчёта, основанную на методе тепловых схем замещения [42]. Эта методика позволяет рассчитать средние значения температур отдельных блоков, например, среднюю температуру обмотки или постоянных магнитов (См.раздел 2.4.1). На этапе выбора оптимального варианта расчёт температурного поля целесообразно провести по уточнённой методике численного моделирования методом конечных элементов. Описание алгоритма численного расчета температурного поля ЛДПТ дано в разделе 2.4.2 диссертации. Нарушение ограничения по перегреву постоянных магнитов сопровождалось в варианте расчета меткой «*Перегрев ПМ*».

Следующим ограничителем выступает величина допустимой индукции во внутреннем магнитопроводе статора, позиция б на рис.2.3. Так как расчетный диаметр якоря определяется на первых этапах расчётной математической модели без учета возможности пропуска требуемого магнитного потока, то высота спинки внутреннего статора при некоторых соотношениях геометрических размеров, магнитного потока  $\Phi$  и допустимого значения индукции в стали  $B_{j\text{доп}}$ , может оказаться недостаточной.

Данное ограничение в расчетной математической модели учитывалось выбраковкой вариантов расчета, в которых оно возникало и сопровождалось меткой " $B_j > B_{j\text{доп}}$ ".

### **3.4. Поверхности отклика частных и обобщенных параметров**

Для выбора эффективного метода оптимизации необходимо получить максимум информации о поверхностях отклика целевой функции. Желательно знать, хотя бы приближенно, рельеф поверхности и предполагаемые области оптимума. Наиболее простым и эффективным методом для этого выступает сетчатый или метод упорядоченного перебора. Известен главный недостаток этого метода – большое число вариантов расчета («опытов»). Для исследуемого случая, при числе независимых переменных, равном пяти, если изменять каждый фактор на пяти уровнях, чего явно недостаточно, получается  $5^5 = 3125$  вариантов расчета. Для обработки такого количества информации требуются значительные временные ресурсы. Но получить предварительную информацию о поверхностях отклика сетчатым методом возможно.

По программе расчетной математической модели, приведенной во второй главе, были получены следующие результаты расчета частных параметров оптимизации.

#### **3.4.1. Зависимости массы магнитов от варьируемых переменных**

Одним из важнейших параметров ЛДПТ, во многом определяющим его себестоимость, является масса (объем) постоянных магнитов (ПМ), необходимых для обеспечения его функциональных свойств. Цена на

неодимовые и самарий-кобальтовые магниты на мировом рынке постоянно растет. Ситуация усугубляется еще и тем, что фактически монополистом на рынке высокоэнергетических магнитов становится Китай. Поэтому проблема снижения удельного веса магнитов в изделии является весьма актуальной.

Дальнейшие результаты исследования были проведены для ЛДПТ с номинальным усилием на штоке 20 Н и величине рабочего хода якоря  $\pm 8$  мм. Свободный ход якоря  $\pm 18$  мм. Во всех вариантах исследовалась однотипная конструкция двигателя, представленная на рис. 2.3. Обмотка якоря имеет рядовую намотку с четным числом слоев. Воздушные зазоры между катушкой якоря внутренним и внешним статором для всех вариантов приняты одинаковыми 0,4 мм. Марка постоянных магнитов КС-37А. Температура окружающей среды  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ , охлаждение естественное.

Так как поверхности отклика на плоскости можно отобразить лишь для двух факторов, то исследования проводились для двухфакторных экспериментов при фиксированных значениях остальных варьируемых переменных.

В табл.3.2 и на рис.3.4 показаны зависимости суммарной массы магнитов от линейной нагрузки  $A$ , А/м и числа слоев обмотки  $n_{\text{сл}}$  при фиксированных значениях длины магнитов  $l_m = 0,027$  м , напряжения питания  $U = 27$  В и индукции в зазоре  $B_{\delta} = 0,2$  Тл.

Таблица 3.2

Суммарная масса магнитов при  $l_m = 0,027$  м,  $U = 27$  В,  $B_\delta = 0,2$  Тл.

A, А/м		9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000	13500
Число слоев	2	Перегрев									
	4	0,143	0,135	0,128	0,121	0,115	0,110	0,105	0,100	Перегрев	Перегрев
	6	0,190	0,179	0,169	0,160	0,152	0,144	0,137	0,131	0,125	0,119
	8	0,238	0,224	0,211	0,199	0,189	0,179	0,170	0,162	0,155	0,148
	10	0,273	0,257	0,241	0,228	0,215	0,203	0,192	0,183	0,174	0,165

Продолжение табл. 3.2

A, А/м		14500	15000	15500	16000	16500	17000	17500	18000	18500	19000
Число слоев	2	Перегрев									
	4	Перегрев									
	6	0,114	0,110	0,105	Перегрев						
	8	0,141	0,135	0,130	0,124	0,119	0,115	0,110	0,106	Перегрев	Перегрев
	10	0,158	0,150	0,144	0,137	0,131	0,126	0,121	0,116	0,111	0,107

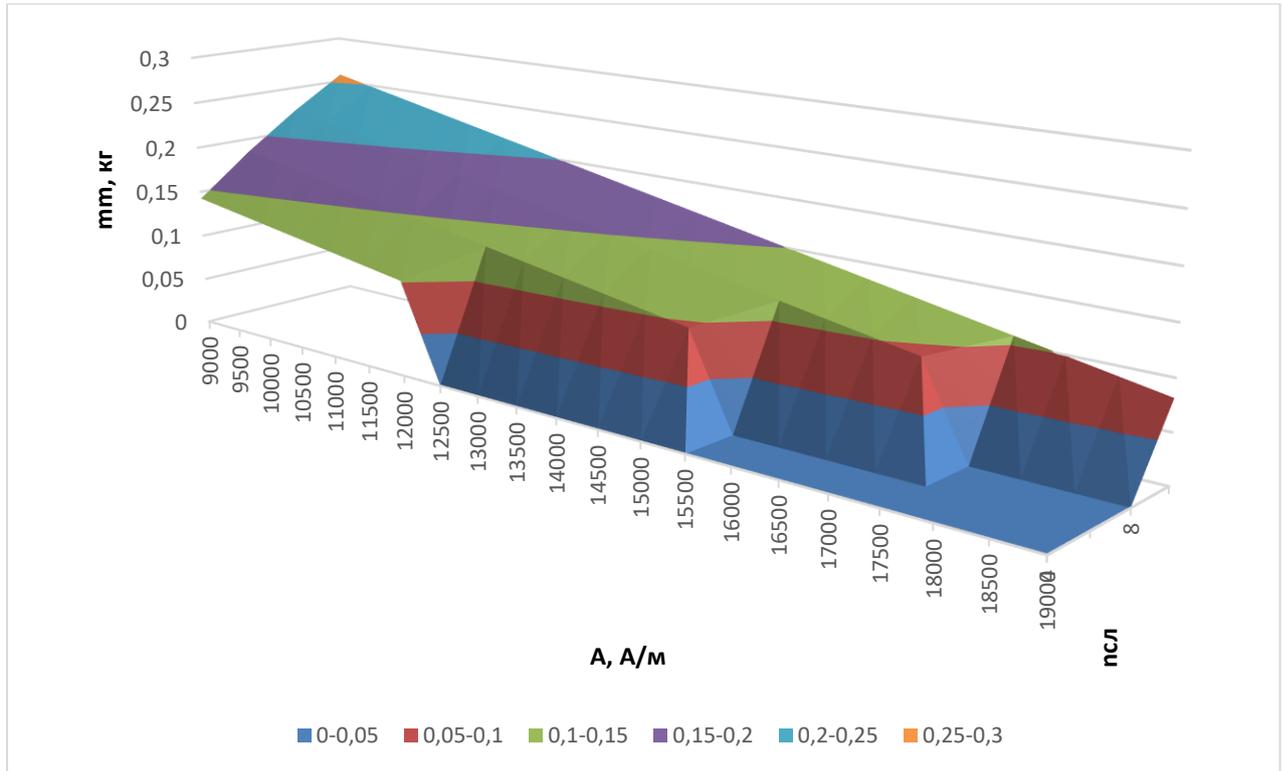


Рисунок 3.4 – Поверхность отклика  $mm = f(A, n_{\text{сл}})$ .

$$l_m = \text{const}, U = \text{const}, B_\delta = \text{const}.$$

Анализ поверхности отклика показывает ожидаемый результат: минимальные значения массы магнитов лежат на границе, определяемой перегревом якоря.

От числа слоев обмотки минимальное значение массы магнитов при заданных фиксированных значениях остальных параметров зависят мало: 0,100 кг при 4 слоях, и 0,102 кг при 10 слоях. Но, первое значение получено для  $A = 12500$  А/м, а второе, при  $A = 19000$  А/м. Очевидно, что во втором случае потребляемая мощность будет значительно выше, чем в первом.

Обмотка с числом слоев  $n_{\text{сл}} = 2$  при выбранных значениях варьируемых переменных вообще не реализуема из-за нарушения ограничения по перегреву во всем диапазоне.

Исследование зависимостей массы магнитов от двух других переменных – числа слоев обмотки и длины магнитов  $l_m$ , представлены в виде семейства графиков на рис. 3.5.

В этом случае ограничителем выступает невозможность обеспечения индукции в спинке внутреннего статора, не превышающей допустимое значение для выбранной стали " $B_j > B_{j\text{доп}}$ ". На графиках граница ограничения по индукции показана жирной пунктирной линией. Четыре графика соответствуют значениям числа слоев от 4 до 10.

Масса магнитов в этой серии «опытов» получилась больше, чем в предыдущей из-за того, что фиксированное значение линейной нагрузки здесь было равно 8000 А/м.

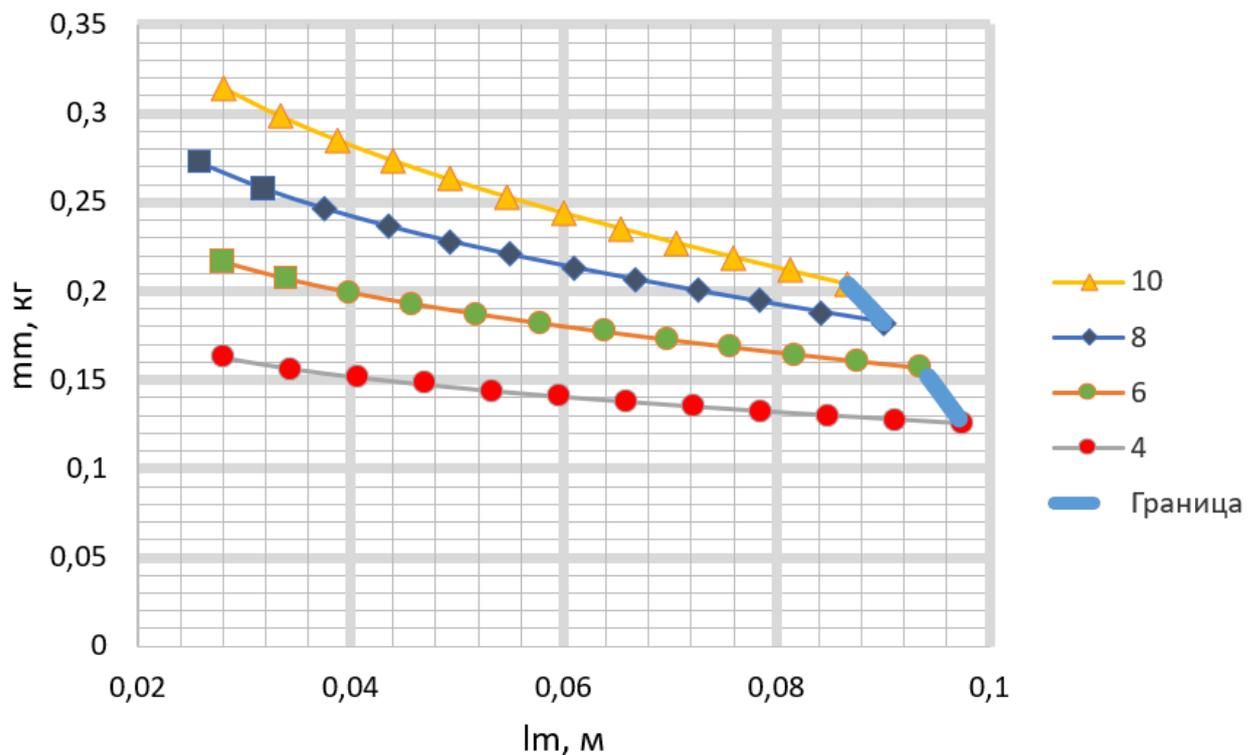


Рисунок 3.5 – Зависимости массы магнитов  $m_m$  от числа слоев обмотки и длины магнитов.  $A = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $B_\delta = \text{const}$ .

Графики, представленные на рис.3.6 показывают массу магнитов в функции магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  и числа слоев обмотки. Кривые имеют явный минимум в области значений индукции от 0,23 до 0,32 Тл. Следовательно, область оптимальных значений массы магнитов следует

искать в этом диапазоне по фактору индукции в зазоре. Это семейство графиков построено также при  $A = 8000$  А/м.

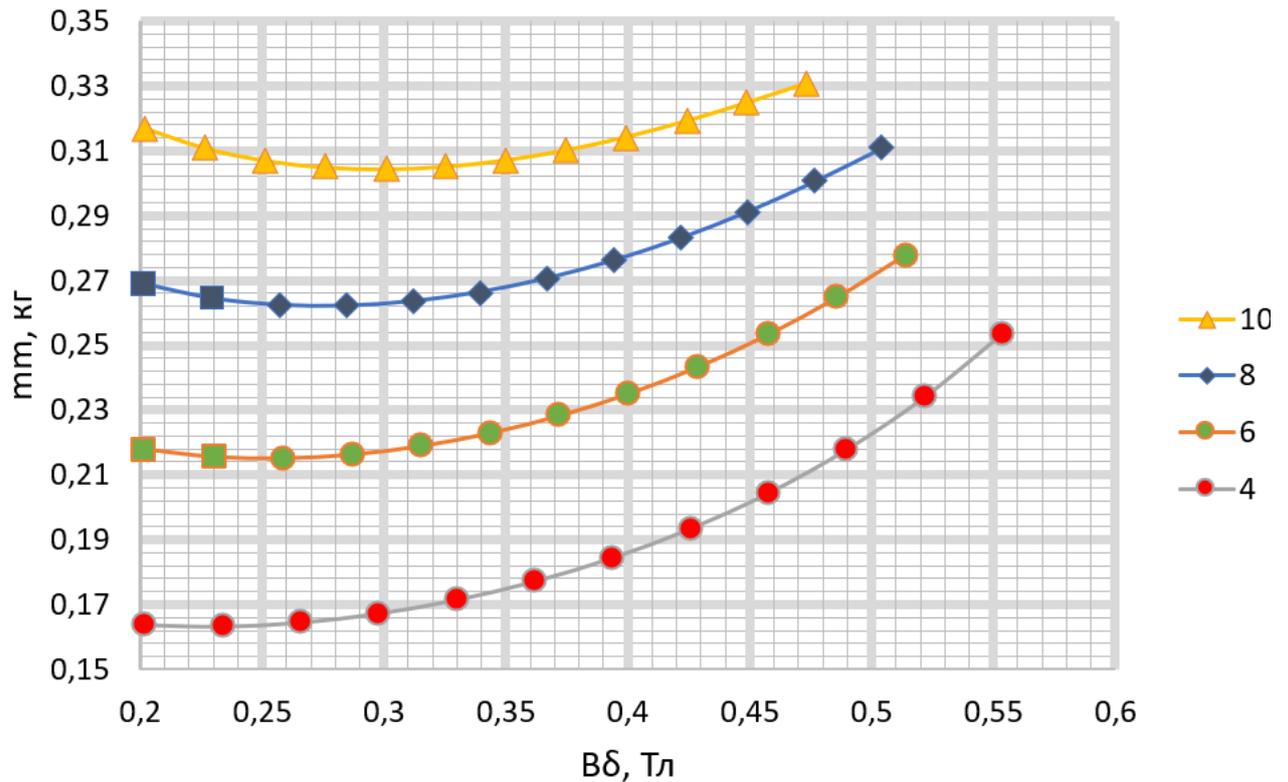


Рисунок 3.6 – Зависимости массы магнитов  $m_m$  от числа слоев обмотки и индукции в зазоре.  $A = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $l_m = \text{const}$ .

### 3.4.2. Зависимости потребляемой мощности ЛДПТ от варьируемых переменных

Мощность, потребляемая любым электромеханическим устройством бортового применения, не только влияет на температурное поле комплекса, но и напрямую определяет величину установленной мощности источника питания. От величины мощности потребления зависит масса полупроводникового преобразователя и питающих проводов. Любое необоснованное завышение этого параметра ведет к серьезным негативным последствиям. Поэтому величина потребляемой двигателем в номинальном режиме мощности была выбрана в качестве частного параметра оптимизации, а критерием оптимальности стал ее минимум.

Так же, как и с минимумом массы магнитов, исследования минимизации потребляемой мощности проводились сетчатым методом для различных сочетаний пар варьируемых переменных при фиксированных значениях остальных факторов.

Семейство графиков зависимости потребляемой мощности от числа слоев обмотки и линейной нагрузки при фиксированных значениях  $l_m = 0,027$  м,  $U = 27$  В,  $B_\delta = 0,2$  Тл приведено на рис.3.7. Синей сплошной линией показана граница допустимых значений по перегреву по допустимой индукции в спинке внутреннего статора.

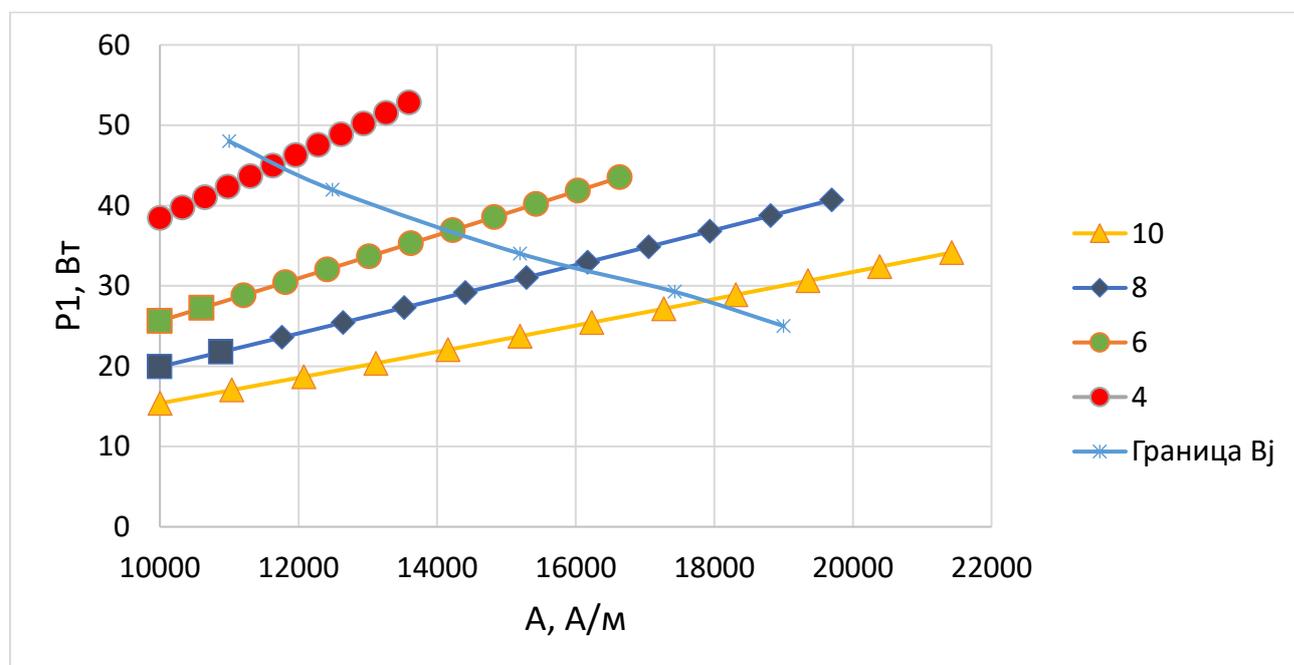


Рисунок 3.7 – Зависимости потребляемой мощности  $P_1$  от числа слоев обмотки и линейной нагрузки.  $B_\delta = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $l_m = \text{const}$ .

Из графиков следует, что предпочтительными вариантами двигателя по частному параметру потребляемой мощности являются, во-первых, варианты с минимальной линейной нагрузкой, а во-вторых – с катушкой якоря, имеющей максимальное число слоев. Очевидно, что этим вариантам будут соответствовать не лучшие значения двух других частных параметров – массы

магнитов, которая растет с увеличением толщины обмоточного слоя, и продольного сечения машины  $D \cdot Lk$ , которое при малых  $A$ , также растет.

Об этом свидетельствуют результаты вычислений параметра  $D \cdot Lk$ , приведенные в табл. 3.3. Зеленым цветом выделены наиболее предпочтительные варианты.

Таблица 3.3

Зависимость параметра  $y_2 = D \cdot Lk$  от линейной нагрузки и числа слоев обмотки якоря.

$A, A/м$		9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500
$n_{сл}$	4	0,0060	0,0058	0,0055	0,0053	0,0050	0,0048	0,00460	ПЕРЕГРЕВ
	6	0,0059	0,0057	0,0055	0,0053	0,0051	0,0049	0,00475	0,00455
	8	0,0058	0,0056	0,0054	0,0053	0,0051	0,0049	0,00480	0,00462
	10	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,00481	0,00465

Продолжение таблицы 3.3

$A, A/м$		13000	13500	14000	14500	15000	15500	16000	16500
$n_{сл}$	4	ПЕРЕГРЕВ							
	6	0,00435	0,00415	0,00395	0,00376	0,00356	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ
	8	0,00445	0,00428	0,00411	0,00394	0,00376	0,00359	0,00342	0,00325
	10	0,00450	0,00435	0,00419	0,00404	0,00389	0,00373	0,00358	0,00343

Продолжение таблицы 3.3

$A, A/м$		17000	17500	18000	18500	19000
$n_{сл}$	4	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ
	6	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ
	8	0,00307	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ	ПЕРЕГРЕВ
	10	0,00327	0,00312	0,00297	0,00281	0,00266

Зависимость  $D \cdot Lk, м^2$  от индукции в зазоре  $B$ , Тл и длины магнита  $l_m$ , м представлена в виде поверхности отклика при фиксированных значениях  $n_{сл} = 10, U = 27 В$  на рис.3.8.

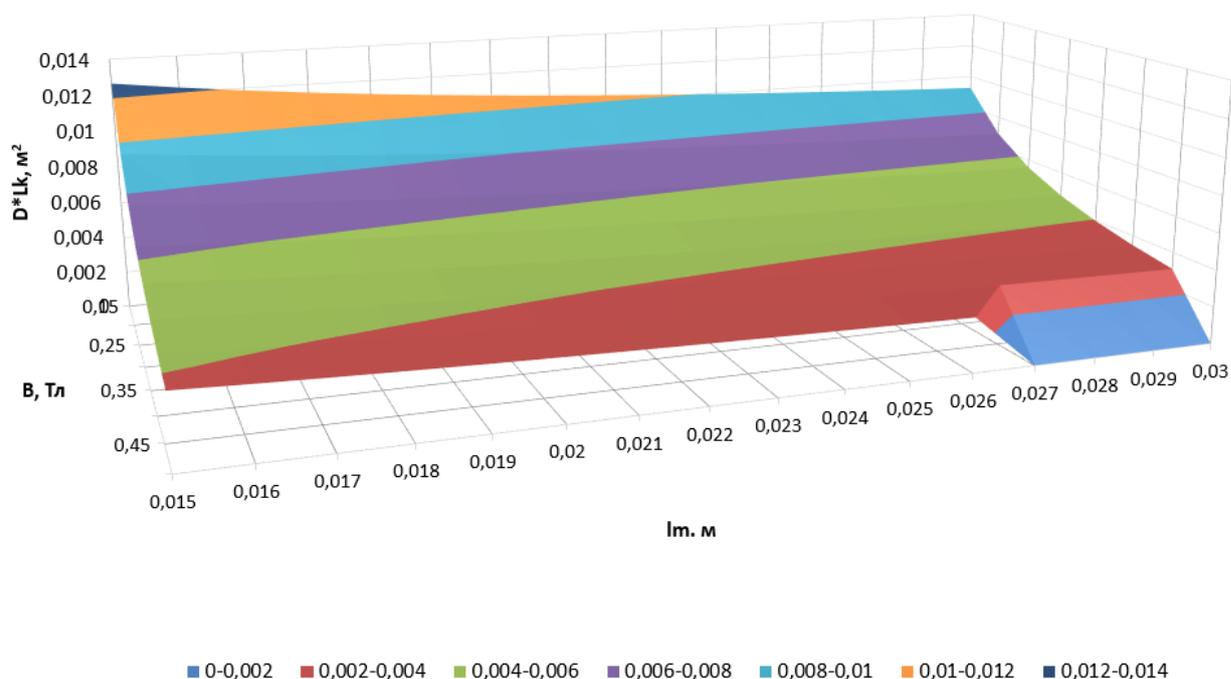


Рисунок 3.8 – Поверхность отклика  $D_*Lk = f(B, lm)$

### 3.5. Выбор метода оптимизации

Результаты исследования двумерных поверхностей отклика частных параметров оптимизации ЛДПТ показали, что минимальная масса магнитов соответствует максимальной линейной нагрузке, соответствующей максимальной потребляемой мощности. Ожидается, что эти два частных параметра находятся в противоречии – улучшение значения первого, приводит к ухудшению второго.

Аналогичные противоречия возникают и при анализе других пар частных параметров: масса магнитов – сечение активной части (габариты) и потребляемая мощность – сечение активной части.

Для решения такой многокритериальной задачи был предложен алгоритм, заключающийся в сведении ее к однокритериальной, путем построения обобщенного параметра оптимизации в виде суммы частных параметров с весовыми коэффициентами по выражению (3.6). Перевод размерных частных

параметров осуществлялся по функции Харрингтона (3.1), как было описано выше.

При выборе метода оптимизации автор исходил из анализа рельефа поверхностей отклика частных параметров.

Методы ненаправленного поиска: упорядоченного перебора и случайного поиска были отклонены из-за чрезмерного количества вариантов расчета, необходимых для получения достоверного результата при пяти варьируемых независимых переменных (факторах) [3,54].

Методы направленного поиска значительно сокращают количество необходимых вариантов расчета, но и они не лишены недостатков и не все применимы для решения поставленной задачи.

Например, одним из наиболее распространенных методов направленного поиска является симплекс-метод [3,54], заключающийся в вычислении на каждом шаге восхождения координат  $n + 1$  вершин правильного многогранника – симплекса. Затем осуществляется по определенным правилам поворот симплекса вокруг ребра, противоположного вершине с наименьшим значением целевой функции (при поиске максимума). Поиск продолжается до тех пор, пока симплекс не «накроет» область максимума. Однако, симплекс метод [3,54] мало пригоден для поверхностей, имеющих жесткие ограничения в предполагаемой зоне оптимума. Кроме этого, метод склонен к закликиванию на «плоскогорьях» и в седловых точках.

Градиентный метод обеспечивает кратчайший путь к точке оптимума, но требует, чтобы целевая функция была явно выраженной и была дифференцируемой для вычисления градиента

$$\overrightarrow{grad} y = \vec{i} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_1} + \vec{j} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_2} + \dots + \vec{k} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_k}. \quad (3.7)$$

Ни первое, ни второе условие невозможно выполнить без существенного упрощения задачи, приводящего к потере адекватности расчетной модели.

Близким по алгоритму и по результатам к градиентному методу является метод Бокса-Уилсона [54]. Суть метода заключается в расчете значения квазиградиента с последующим крутым восхождением по поверхности отклика. Именно этот метод был выбран автором в качестве основного для параметрической оптимизации ЛДПТ.

### 3.5.1. Алгоритм метода Бокса-Уилсона

В методе Бокса-Уилсона при расчете квазиградиента  $\widetilde{grad} y$  частные производные в выражении (3.6) заменяются отношениями конечных приращений функции цели  $\Delta y$  к конечным приращениям аргумента  $\Delta x_i$

$$\widetilde{grad} y = \vec{i} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x_1} + \vec{j} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x_2} + \dots + \vec{k} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x_k} \quad (3.8)$$

$\vec{i}, \vec{j}, \dots, \vec{k}$  - единичные орты по осям координат;

$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_k$  – интервалы варьирования факторов.

Для расчета составляющих квазиградиента на практике используют методику полного (ПФЭ) или дробного (ДФЭ) факторного эксперимента. Процедура выбора области варьирования факторов включает два этапа: выбор основного уровня и выбор интервалов варьирования.

Анализ в факторных экспериментах начинается с выбора *основного (нулевого) уровня* факторов. Здесь, и далее, используются терминология, принятая в литературе по планированию факторного эксперимента [3].

Наилучшим условиям, определенным из анализа априорной информации, соответствует комбинация (или несколько комбинаций) уровней факторов. Каждая комбинация является многомерной точкой в факторном пространстве. Её можно рассматривать как исходную точку для построения плана эксперимента – точкой нулевого уровня. Для расчетных экспериментов, каковой является решаемая задача, целесообразно выбрать несколько исходных точек нулевого уровня, что и было сделано. Это, хотя и увеличит количество расчетов, но повышает вероятность отыскания области глобального экстремума, так как любой метод направленного поиска, в том числе и Бокса-

Уилсона, в результате крутого восхождения может привести к локальному экстремуму. Если процесс крутого восхождения, начатый из разных исходных точек, всегда приводит к одной области экстремума, то с большой вероятностью можно утверждать, что это область глобального экстремума.

Какие значения нулевого уровня факторов были приняты в настоящем исследовании будет показано в главе 4.

**Выбор интервалов варьирования.** Следующим этапом исследования был выбор для каждого фактора двух уровней, на которых он будет варьироваться в расчете. Будем называть один из этих уровней верхним, а второй — нижним. За верхний уровень принимается тот, который соответствует большему значению фактора.

*Интервалом варьирования факторов* называется некоторое число (свое для каждого фактора), прибавление которого к основному уровню дает верхний, а вычитание — нижний уровни фактора.

Для удобства записи условий ПФЭ и обработки данных масштабы по осям выбираются так, чтобы верхний уровень в относительных единицах соответствовал +1 нижний -1, а основной — нулю. Для факторов с непрерывной областью определения это всегда можно сделать с помощью преобразования

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{\Delta x_j}$$

где  $x_j$  — кодированное значение фактора,  $\tilde{x}_j$  — натуральное значение фактора,  $\tilde{x}_{j0}$  — натуральное значение основного уровня,  $\Delta x_j$  — интервал варьирования,  $j$  — номер фактора.

Численные значения интервалов варьирования приведены в следующем разделе диссертации. Отметим лишь особенность выбора интервала варьирования для фактора  $x_4$  - числа слоев катушки якоря ( $n_{сл}$ ). По условию обеспечения рядной намотки с выводами на одной стороне якоря  $n_{сл}$  должно быть четным числом. Поэтому  $\Delta x_4 = 1$  при нечетном  $x_{40}$  для того, чтобы верхний и нижний уровни были четными числами.

**Полный (дробный) факторный эксперимент** проводится с целью определения составляющих квазиградиента для расчета шагов крутого восхождения по поверхности отклик. Серия расчетов (опытов) организуется либо по матрице ПФЭ, либо по ее дробной реплике - ДФЭ. В первом случае необходимое число опытов определяется выражением

$$N = 2^k,$$

где  $N$  - число опытов,  $k$  – число факторов, 2 - число уровней.

В общем случае эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется *полным факторным экспериментом* (ПФЭ).

В дробном факторном эксперименте реализуется только часть опытов ПФЭ

$$N = 2^{k-p},$$

где  $p$  – дробность реплики.

В рассматриваемом случае, когда число независимых переменных равно 5, число опытов в ПФЭ – 32. Для анализа и построения линейной математической модели — это количество излишне. Поэтому в дальнейшем были применены полуреплики с 16-тью опытами и даже четверть-реплики с 8-ю опытами.

Пример матрицы ДФЭ  $2^{5-1}$ , который использовался в дальнейших расчетах, приведен в табл.3.4.

Матрица полуреплики ДФЭ  $2^{5-1}$ 

Номера опытов	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5 = x_1 \times x_2 \times x_3 \times x_4$	$y$
1	+	+	+	+	+	$y_1$
2	-	+	+	+	-	$y_2$
3	+	-	+	+	-	$y_3$
4	-	-	+	+	+	$y_4$
5	+	+	-	+	-	$y_5$
6	-	+	-	+	+	$y_6$
7	+	-	-	+	+	$y_7$
8	-	-	-	+	-	$y_8$
9	+	+	+	-	-	$y_9$
10	-	+	+	-	+	$y_{10}$
11	+	-	+	-	+	$y_{11}$
12	-	-	+	-	-	$y_{12}$
13	+	+	-	-	+	$y_{13}$
14	-	+	-	-	-	$y_{14}$
15	+	-	-	-	-	$y_{15}$
16	-	-	-	-	+	$y_{16}$

Как принято в теории планирования эксперимента, верхний уровень факторов, соответствующий +1 о.е., обозначен в матрице «+», а нижний – «-».

Для вектор-столбца фактора  $x_5$  использовалось генерирующее соотношение  $x_5 = x_1 \times x_2 \times x_3 \times x_4$ . Это сделано из предположения, что четверные взаимодействия факторов пренебрежимо малы.

Результатом проведения ДФЭ стало определение 16-ти значений параметра оптимизации, которые использовались для расчета коэффициентов линейного уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (3.9)$$

Коэффициенты  $b_j$  рассчитываются по формуле (3.10):

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k. \quad (3.10)$$

Учитывая, что в кодированных значениях  $x_{ji} = \pm 1$ , в формуле числитель будет равен алгебраической сумме  $y_i$ , где знак перед каждым слагаемым определяется знаком перед элементом вектор-столбца соответствующего фактора.

По математическому смыслу коэффициенты  $b_j$  – есть приближенные значения составляющих вектора градиента функции отклика

$$\overrightarrow{\text{grad}} y = \vec{i} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_1} + \vec{j} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_2} + \dots + \vec{k} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_k}. \quad (3.11)$$

По значениям коэффициентов  $b_j$  можно определить направление линии крутого восхождения (спуска) для данной точки нулевого уровня.

Уравнение (3.9), если его записать для значений факторов в абсолютных единицах будет иметь вид

$$y^{\sim} = b_0 + b_1 \frac{x_1^{\sim} - x_{10}}{\Delta x_1} + b_2 \frac{x_2^{\sim} - x_{20}}{\Delta x_2} + \dots + b_k \frac{x_k^{\sim} - x_{k0}}{\Delta x_k}. \quad (3.12)$$

Здесь  $x_1^{\sim}, x_2^{\sim}, \dots, x_k^{\sim}$  – значения факторов в абсолютных единицах;

$x_{10}, x_{20}, \dots, x_{k0}$  – значения факторов в абсолютных единицах в точке нулевого уровня;

$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_k$  – интервалы варьирования факторов.

Для того, чтобы начать крутое восхождение по поверхности отклика, моделируемой уравнением (3.12), необходимо рассчитать *шаги крутого восхождения*  $J_i$  для каждого фактора.

*Шагами крутого восхождения* называют величины приращений значений факторов при движении по поверхности отклика к области оптимума.

Шаги должны быть пропорциональны коэффициентам  $b_j$  линейной математической модели, рассчитанным по результатам ПФЭ или ДФЭ

$$J_j = m \cdot b_j \cdot \Delta x_j. \quad (3.13)$$

В (3.13)  $m$  – масштаб шагов крутого восхождения, который выбирается исходя из наиболее значимого коэффициента  $b_j$  и один для всех факторов. От того, как будет выбран масштабный коэффициент  $m$ , будет зависеть количество необходимых шагов крутого восхождения. В расчетных экспериментах, каким является решаемая задача, количество шагов не критично, поэтому масштаб  $m$  выбирается минимальным. Конкретные значения  $m$  приведены в следующем разделе настоящей работы.

**Крутое восхождение по поверхности отклика** удобно оформлять в виде Excel таблицы.

Таблица 3.5

Крутое восхождение по поверхности отклика.

№ шага	$x_1$	$x_2$	...	$x_k$	$y$
0	$x_{10}$	$x_{20}$	...	$x_{k0}$	$y_0$
1	$x_{10}+J_1$	$x_{20}+J_2$	...	$x_{k0}+J_k$	$y_1$
2	$x_{10}+2J_1$	$x_{20}+2J_2$	...	$x_{k0}+2J_k$	$y_2$
3	$x_{10}+3J_1$	$x_{20}+3J_2$	...	$x_{k0}+3J_k$	$y_3$
...	...	...	...	...	...
$n$	$x_{10}+nJ_1$	$x_{20}+nJ_2$	...	$x_{k0}+nJ_k$	$y_n$

Алгоритм восхождения сводится к тому, что на каждом последующем шаге к значению фактора прибавляется шаг крутого восхождения  $J_J$  до тех пор, пока параметр оптимизации  $y$  улучшается.

Восхождение приостанавливается, если на последующем шаге получится худшее значение параметра оптимизации, чем на предыдущем.

Схематично алгоритм оптимизации можно проиллюстрировать блок-схемой, приведенной на рис.3.9.

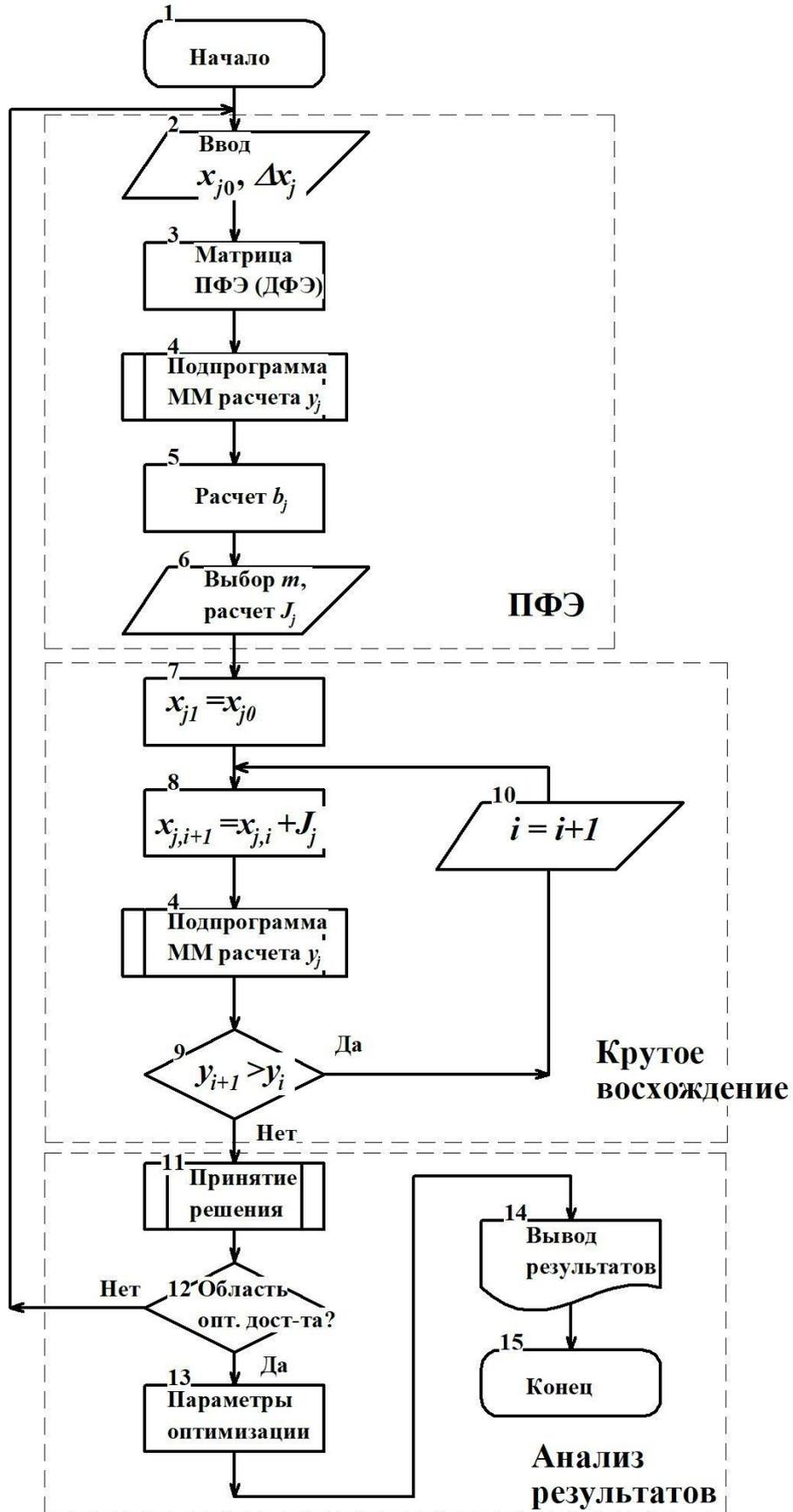


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма оптимизации методом Бокса-Уилсона

На блок-схеме цифрами обозначены:

1. Начало.
2. Ввод точки нулевого уровня и интервалов варьирования факторов.
3. Построение матрицы ПФЭ (ДФЭ) в относительных и абсолютных величинах.
4. Расчет по подпрограмме математической модели частных и обобщенного параметра оптимизации, включая тепловой расчет. См. главу 2.
5. Расчет коэффициентов регрессии линейной математической модели.
6. Выбор масштаба шагов крутого восхождения и их расчет.
7. Присваивание исходной точке крутого восхождения координат точки нулевого уровня.
8. Расчет значений варьируемых переменных в ходе крутого восхождения.
9. Проверка условия эффективности крутого восхождения.
10. Счетчик шагов.
11. Подпрограмма анализа и принятия решения по результатам восхождения по поверхности отклика.
12. Проверка условия достижения области оптимума.
13. Вывод значений частных и обобщенного параметра оптимизации.
14. Печать результатов.
15. Окончание работы.

### 3.6. Выводы по главе 3

1. Анализируя требования к ЛДПТ, изложенные выше, автором были выбраны в качестве частных параметров оптимизации следующие величины:
  - $y_1$ , (mm), кг - масса постоянных магнитов;
  - $y_2$ , ( $D \cdot Lk$ ),  $m^2$  - произведение расчетного диаметра якоря на активную длину катушки якоря (площадь продольного сечения активной части двигателя);
  - $y_3$ , ( $P_1$ ), Вт - потребляемая мощность при номинальном усилии.
2. Так как оптимизировать объект одновременно по нескольким независимым параметрам невозможно, то было принято решение о поиске компромиссного варианта путем перехода от многокритериальной задачи к однокритериальной методом синтеза обобщенного параметра оптимизации. Обобщенный параметр был построен в виде суммы частных параметров, переведенных в относительные величины по функции Харрингтона, с весовыми коэффициентами.
3. В качестве функций ограничителей были определены величина перегрева обмотки якоря и максимально допустимое значение магнитной индукции в спинке внутреннего статора.
4. Исследования двумерных поверхностей отклика показало нелинейность этих зависимостей и факт нахождения возможной области оптимума на границах, заданных функциями ограничителями.
5. По результатам анализа поверхностей отклика было принято решение о выборе метода направленного поиска экстремума Бокса-Уилсона в качестве основного метода оптимизации. Метод основан на проведении серии расчетов по алгоритму полного или дробного факторного эксперимента с последующим крутым восхождением по поверхности отклика.
6. Разработан алгоритм и программа, реализующие указанный метод оптимизации, на основе математической модели расчета ЛДПТ, изложенной в главе 2.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

В третьей главе настоящей работы представлено описание результатов предварительного исследования поверхностей отклика частных параметров оптимизации и на их основе принято решение о выборе метода оптимизации. В качестве базового метода оптимизации был избран метод Бокса-Уилсона, заключающийся в проведении полного (ПФЭ) или дробного (ДФЭ) факторного эксперимента и на их основе осуществления крутого восхождения по поверхности отклика обобщенного параметра оптимизации. Алгоритм метода представлен в разделе 3.5.1 работы.

##### 4.1 Обобщенный параметр оптимизации

Методика перехода от многокритериальной задачи к однокритериальной изложена в разделе 3.1 настоящей работы. По этой методике с использованием шкалы Харрингтона были получены следующие результаты по переводу частных размерных параметров оптимизации к безразмерным.

*Масса магнитов,  $mm$ , кг, ( $y_1$ ).* Для перевода текущего значения массы магнитов  $mm_i$  в относительные единицы использовалось выражение

$$y_{1i} = \frac{mm_0 - mm_i}{\Delta mm} = \frac{0,15 - mm_i}{0,01} \quad (4.1)$$

где  $mm_0 = 0,15$  кг – минимально удовлетворительное значение массы магнитов,  $\Delta mm = 0,01$  кг – масштаб преобразования.

Аналогично, для *потребляемой мощности  $P_{1i}$ , Вт, ( $y_2$ )*

$$y_{2i} = \frac{P_{10} - P_{1i}}{\Delta P_1} = \frac{30 - P_i}{10} \quad (4.2)$$

где  $P_{10} = 30$  Вт – минимально удовлетворительное значение мощности,  $\Delta P_1 = 10$  Вт – масштаб преобразования.

Для третьего параметра,  $y_3$  - *поперечного сечения активной части  $DLk$ , м<sup>2</sup>*

$$y_{3i} = \frac{DLk_0 - DLk_i}{\Delta DLk} = \frac{0,0025 - DLk_i}{0,0008} \quad (4.3)$$

где  $DLk_{10} = 0,0025 \text{ м}^2$  – минимально удовлетворительное значение площади сечения,  $\Delta DLk = 0,0008 \text{ м}^2$  – масштаб преобразования.

Все частные отклики пересчитывались по функции Харрингтона и шкале желательности (см. раздел 3.1) для того, чтобы их можно было складывать при формировании обобщенного параметра оптимизации  $Y_{\Sigma}$

$$dy_{ji} = \exp[-\exp(-y_{ji})]. \quad (4.4)$$

Обобщенный параметр оптимизации был сформирован на основе суммы частных параметров в относительных единицах, вычисленных по выражению (4.4)

$$Y_i = dy_{1i} + dy_{2i} + dy_{3i}.$$

Для удобства обработки результатов, в [3] рекомендуется вместо суммы всех параметров, брать их среднее арифметическое (3.6). Это не меняет физического смысла преобразования, но ограничивает диапазон изменения значений обобщенного параметра от 0 до 1, независимо от количества частных параметров. Если весомость частных параметров не равнозначна, то используются коэффициенты весомости  $\alpha_i$ , значения которых определяются назначением объекта оптимизации и требованиями к его характеристикам. Для того, чтобы  $Y$  мог принимать значения от 0 до 1, необходимо выполнение условий:

$$\alpha_i = [0 \dots 1],$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = n,$$

где  $n$  – число частных параметров.

При расчете варианта машины по математической модели может получиться, что нарушается одно или несколько ограничений. В расчете штрафные функции вводились по двум ограничениям: перегреву якоря и допустимой индукции в спинке внутреннего магнитопровода. Суть штрафной

функции заключается в том, что значение параметра оптимизации искусственно ухудшалось в  $K_{штj}$  раз.

$$Y_{\Sigma} = Y \cdot K_{шт1} \cdot K_{шт2}$$

Например, для превышения температуры якоря коэффициент штрафа рассчитывался по выражению

$$K_{шт1} = \left( 1 - \frac{\theta_1 - \theta_{доп}}{\theta_{доп}} \right)^{\alpha}, \quad (4.5)$$

где  $\theta_1$  – текущее значение перегрева;

$\theta_{доп}$  – допустимый перегрев;

$\alpha = 1 \dots 3$ , показатель степени, зависящий от класса изоляции обмотки. В простейшем случае  $\alpha = 1$  и функция штрафа линейная. Отметим, что при поиске максимального значения обобщенного параметра  $K_{шт1} < 1$ . Отметим, что «штраф» не может улучшить параметр оптимизации, так как механизм штрафных функций включался только при нарушении ограничений. Если нарушения не происходит, то штрафные функции игнорируются. В данной работе значения штрафной функции  $K_{шт1}$  и  $K_{шт2}$  варьируются от 0 до 1.

В окончательном виде обобщенный параметр оптимизации рассчитывался по выражению (4.6)

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{3} \cdot (\alpha_1 \cdot dy_1 + \alpha_2 \cdot dy_2 + \alpha_3 \cdot dy_3) \cdot K_{шт1} \cdot K_{шт2} \quad (4.6)$$

## 4.2 Полный факторный эксперимент

Согласно алгоритму поиска экстремума методом Бокса-Уилсона, изложенного в разделе 3.5.1, на начальном этапе исследования была проведена серия расчетов («опытов»), которая позволила определить направление квазиградиента в векторном факторном пространстве. В теории планирования оптимизационного эксперимента эта серия называется полным (дробным) факторным экспериментом - ПФЭ (ДФЭ).

Как отмечалось во второй главе диссертации, необходимое и достаточное число варьируемых переменных для решаемой задачи, пять:

- $U$ , напряжение питания, В;
- $A$ , линейная нагрузка якоря, А/м;
- $B_{\delta}$ , максимальная индукция в воздушном зазоре, Тл;
- $n_{сл}$ , число слоев обмотки якоря;
- $l_m$ , длина магнита, м.

В дальнейшем будем их обозначать  $x_1, x_2, \dots, x_5$ .

Для пяти факторов число «опытов» в ПФЭ равно  $2^5 = 32$ .

Однако, один из факторов - число слоев в обмотке якоря, из технологических ограничений может принимать только целое четное значение. Учитывая, что число слоев обмотки меняется в ограниченном диапазоне  $[2 \dots 14]$ , оказалось, что эту варьируемую переменную использовать в алгоритме ПФЭ и крутого восхождения из-за ее дискретности практически невозможно. Поэтому ПФЭ проводился для четырех факторов при фиксированном значении числа слоев. Так как исключить этот фактор ( $n_{сл}$ ) из анализа нельзя ввиду его очевидной значимости, то матрица ПФЭ строилась для каждого значения  $n_{сл}$  из диапазона варьирования.

В таблице 4.1 приведена матрица ПФЭ для  $n_{сл}=4$ .

Матрица ПФЭ

№ опыта	x10, m	x20, T1	x30, V	x40	x50, A/m	$\Delta x1$	$\Delta x2$	$\Delta x3$	$\Delta x4$	$\Delta x5$
1	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
2	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
3	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
4	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
5	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
6	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
7	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
8	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
9	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
10	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
11	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
12	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
13	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
14	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
15	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500
16	0,027	0,3	27	4	12000	0,001	0,002	1	0	500

Продолжение таблицы 4.1

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_5$	$y_1$ , кг	$y_2$ , Вт	$y_3$ , м2	$dy_1$ , о.е.	$dy_2$ , о.е.	$dy_3$ , о.е.	$Y_{\Sigma}$ , о.е.
1	1	1	1	1	0,100	35,2	0,00302	0,994	0,184	0,148	0,4420
2	-1	1	1	1	0,102	35,8	0,00311	0,992	0,169	0,118	0,4262
3	1	-1	1	1	0,099	35,5	0,00306	0,994	0,177	0,134	0,4349
4	-1	-1	1	1	0,101	36,0	0,00315	0,992	0,161	0,105	0,4196
5	1	1	-1	1	0,102	34,0	0,00302	0,992	0,226	0,148	0,4553
6	-1	1	-1	1	0,104	34,5	0,00311	0,990	0,209	0,118	0,4392
7	1	-1	-1	1	0,102	34,2	0,00306	0,992	0,218	0,134	0,4482
8	-1	-1	-1	1	0,104	34,7	0,00315	0,990	0,202	0,105	0,4325
9	1	1	1	-1	0,110	32,4	0,00328	0,982	0,279	0,070	0,4441
10	-1	1	1	-1	0,112	32,9	0,00338	0,978	0,263	0,050	0,4303
11	1	-1	1	-1	0,109	32,6	0,00332	0,983	0,272	0,061	0,4384
12	-1	-1	1	-1	0,112	33,1	0,00342	0,979	0,255	0,042	0,4252
13	1	1	-1	-1	0,112	31,2	0,00328	0,978	0,322	0,070	0,4568
14	-1	1	-1	-1	0,114	31,7	0,00338	0,972	0,305	0,050	0,4426
15	1	-1	-1	-1	0,112	31,5	0,00332	0,978	0,314	0,061	0,4511
16	-1	-1	-1	-1	0,114	31,9	0,00342	0,973	0,298	0,042	0,4376

В таблице приняты следующие обозначения:

$x_{10}, x_{20}, \dots, x_{50}$  – нулевые уровни факторов;

$\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_5$  - интервалы варьирования факторов;

$x_1, x_2, \dots, x_5$  – уровни факторов, о.е.;

$y_1$ , кг,  $y_2$ , Вт,  $y_3$ , м2 – значения частных параметров в абсолютных единицах;

$dy_1, dy_2, dy_3$ , значения частных параметров в о.е.

$Y_{\Sigma}$ , о.е. – значения обобщенного параметра оптимизации, рассчитанные по (4.6).

Коэффициент штрафа по перегреву  $K_{шт1}$  рассчитывался по (4.5), а  $K_{шт2}$  принимался равным нулю, если нарушалось условие по превышению индукции в спинке внутреннего статора. Весовые коэффициенты  $\alpha_i$  в данной конкретной задаче приняты равнозначными, равными 1.

Матрицы ПФЭ для других значений числа слоев приведены в Приложениях А-Е.

Результаты, полученные при проведении ПФЭ, послужили основой для расчета коэффициентов линейной регрессии и шагов крутого восхождения по поверхности отклика.

### 4.3 Расчет коэффициентов линейной регрессии и крутое восхождение по поверхности отклика

Для крутого восхождения по поверхности отклика, требуется рассчитать шаги крутого восхождения  $J_i$  для каждого фактора. Эти шаги прямо пропорциональны коэффициентам  $b_j$  линейной математической модели:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k, \quad (4.7)$$

где  $x_i$  – значения факторов.

Коэффициенты рассчитываются по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot y_i}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k \quad (4.8)$$

где  $N$  – число значений параметра оптимизации  $y_i$  в матрице ПФЭ (ДФЭ).

Учитывая, что в кодированных значениях  $x_{ji} = \pm 1$ , в формуле числитель будет равен алгебраической сумме  $y_i$ , где знак перед каждым слагаемым определяется знаком перед элементом вектор-столбца соответствующего фактора.

Так, для коэффициента  $b_1$ , соответствующему первому фактору, длине магнита, формула (4.8), примет вид:

$$b_1 = \frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6 + \dots + y_{15} - y_{16}}{16} \quad (4.8a)$$

Свободный член модели (4.7) рассчитывается как среднее арифметическое значений  $y_i$ :

$$b_0 = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_{15} + y_{16}}{16}, \quad (4.8b)$$

Шаги крутого восхождения прямо пропорциональны коэффициентам  $b_i$  линейной математической модели:

$$J_i = m \cdot b_i, \quad (4.9)$$

где  $m$  – масштаб шагов крутого восхождения. Он выбирается для каждого отдельного случая в зависимости от того коэффициента  $b_i$ , который оказывает наибольшее влияние, то есть имеет наибольшее абсолютное значение. При выборе неоправданно большого значения  $m$  есть вероятность при крутом восхождении «перешагнуть» область оптимума, а малые значения  $m$  приводят к увеличению количества «экспериментов» (вариантов расчета). Второе, при оптимизационном эксперименте на компьютерной модели обычно не критично, и масштаб следует выбирать минимальным.

Положительное значение коэффициентов  $b_i$ , и соответствующих им шагов крутого восхождения  $J_i$ , говорит о том, что с увеличением значения данного фактора, значение параметра так же будет расти. В процессе крутого восхождения абсолютное значение данного фактора должно увеличиваться. Отрицательное значение коэффициентов  $b_i$ , и соответствующих им шагов крутого восхождения  $J_i$ , говорит об обратном.

Ниже, в качестве примера, приведены результаты расчёта коэффициентов линейной регрессии и шагов крутого восхождения для варианта с числом слоёв обмотки  $n_{\text{сл}} = 4$ :

Таблица 4.2

Коэффициенты регрессии и шаги крутого восхождения для  $n_{сл} = 4$

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$m$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$	$J_5$
0,4373	0,00735	0,00306	0,0064	0	0,0017	150	0,0011	0,00092	-0,9606	0,0	-130,9

Как видно из таблицы 4.2, в ходе крутого восхождения, значения длины магнита  $x_1$  и индукции в зазоре  $x_2$  будут увеличиваться (коэффициенты положительные), в то время как напряжение  $x_3$  и линейная нагрузка  $x_5$  уменьшаться (коэффициенты отрицательные). В виду дискретности числа слоёв обмотки, значение данного фактора было зафиксировано  $n_{сл} = 4$ , а ниже будут приведены результаты экспериментов с другими значениями  $n_{сл}$ .

Таблица 4.3

Крутое восхождение по поверхности отклика для  $n_{сл}=4$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	$y_1$ (мм), кг	$y_2$ (P1), Вт	$y_3$ (D*Lk), м2
0	0,027	0,300	27	4	12000	112,9	0,106	33,6	0,00321
1	0,028	0,301	26,03	4	11869	109,9	0,108	32,3	0,00319
2	0,029	0,302	25,07	4	11738	106,8	0,109	31,1	0,00316
3	0,030	0,303	24,11	4	11607	103,6	0,111	29,9	0,00315
4	0,031	0,304	23,15	4	11476	100,4	0,113	28,7	0,00313
5	0,033	0,305	22,19	4	11345	97,1	0,114	27,6	0,00312
6	0,034	0,306	21,23	4	11214	93,8	0,116	26,5	0,00311
7	0,035	0,306	20,27	4	11083	90,5	0,119	25,4	0,00310
8	0,036	0,307	19,31	4	10952	87,1	0,121	24,3	0,00310
9	0,037	0,308	18,35	4	10821	83,7	0,123	23,3	0,00310
10	0,038	0,309	17,39	4	10690	80,3	0,126	22,3	0,00310
11	0,039	0,310	16,43	4	10559	76,9	0,128	21,2	0,00310
12	0,040	0,311	15,47	4	10428	73,4	0,131	20,2	0,00310
13	0,041	0,312	14,51	4	10297	69,9	0,134	19,2	0,00311
14	0,042	0,313	13,55	4	10166	66,4	0,138	18,3	0,00311
15	0,044	0,314	12,59	4	10035	62,9	0,142	17,3	0,00312

Продолжение таблицы 4.3

№ шага	y1', о.е.	y2', о.е.	y3', о.е.	dy1, о.е.	dy2, о.е.	dy3, о.е.	YΣ, о.е.
0	4,35	-0,36	-0,89	0,99	0,24	0,09	0,382
1	4,22	-0,23	-0,86	0,99	0,28	0,09	0,410
2	4,07	-0,11	-0,83	0,98	0,33	0,10	0,439
3	3,91	0,01	-0,81	0,98	0,37	0,11	0,468
4	3,74	0,13	-0,79	0,98	0,41	0,11	0,498
5	3,55	0,24	-0,78	0,97	0,46	0,11	0,514
6	3,36	0,35	-0,76	0,97	0,49	0,12	0,526
7	3,15	0,46	-0,76	0,96	0,53	0,12	0,536
8	2,93	0,57	-0,75	0,95	0,57	0,12	0,545
9	2,69	0,67	-0,75	0,93	0,60	0,12	0,552
10	2,43	0,77	-0,75	0,92	0,63	0,12	0,556
11	2,16	0,88	-0,75	0,89	0,66	0,12	0,557
12	1,87	0,98	-0,75	0,86	0,69	0,12	0,554
13	1,55	1,08	-0,76	0,81	0,71	0,12	0,546
14	1,21	1,17	-0,77	0,74	0,73	0,12	0,531
15	0,85	1,27	-0,78	0,65	0,76	0,11	0,507

По результатам крутого восхождения при фиксированном числе слоев катушки якоря можно отметить следующее:

- перегрев обмотки выше допустимого значения  $\Delta\Theta > 100^0$  С фиксируется на первых пяти шагах, когда линейная нагрузка максимальная;
- ограничение по максимальной индукции в спинке внутреннего магнитопровода не зафиксировано;
- максимальное значение обобщенного параметра (выделено зеленым) достигнуто на 11-м шаге восхождения  $Y_{\Sigma} = 0,557$  о.е. Далее значение параметра ухудшается.

Отметим, что значение  $Y_{\Sigma}$  на первых пяти шагах искусственно занижено из-за применения функции штрафа по перегреву в соответствии с (4.6).

Очевидно, что полученное значение параметра оптимизации нельзя считать оптимальным, так как для других значений числа слоев обмотки могут получиться иные результаты. Для получения полной картины с учетом варьирования  $n_{\text{сл}}$  были проведены расчеты по методу Бокса-Уилсона для значений  $n_{\text{сл}} = 6, 8, 10, 12$  и  $14$ . Результаты этих расчетов представлены в Приложениях Б - Е.

Увеличение слоёв обмотки приводило к увеличению максимального значения обобщённого параметра. Максимальное значение  $Y_{\Sigma} = 0,767$  о.е. достигается при  $n_{\text{сл}}=12$  (Приложение Д). При  $n_{\text{сл}}=14$  обобщенный параметр незначительно, но уменьшается (Приложение Е).

На графиках рис.4.1 представлены кривые изменения величины обобщенного параметра оптимизации при различных значениях числа слоев обмотки якоря.

Как видно из рисунка, при  $n_{\text{сл}}=10, 12$  и  $14$  максимальные значения обобщённого параметра довольно близки, большие значение невозможны из-за ограничения по максимальной индукции в спинке внутреннего магнитопровода.

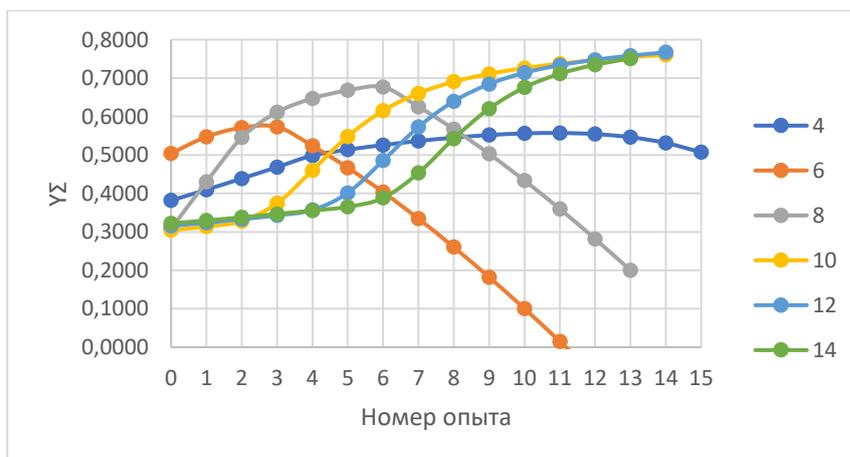


Рисунок 4.1. Изменение обобщённого параметра  $Y_{\Sigma}$  при различном числе слоёв обмотки.

В итоге, максимальное значение обобщённого параметра  $Y=0,767$ , получено при следующих значениях факторов:

- $U = 26,2$ , напряжение питания, В;
- $A = 16823$ , линейная нагрузка якоря, А/м;
- $B_{\delta} = 0,304$ , максимальная индукция в воздушном зазоре, Тл;
- $n_{сл} = 12$ , число слоев обмотки якоря;
- $l_m = 0,031$ , длина магнита, м.

Согласно предложенной ранее математической модели, у двигателя с такими значениями варьируемых переменных будут следующие выходные параметры:

- $m_m = 0,104$ , масса магнитов, кг;
- $P_1 = 14,6$ , электрические потери, Вт;
- $D = 0,0452$ , средний диаметр катушки якоря, м;
- $L_K = 0,0486$ , длина катушки, м;
- $m_{mm} = 0,4134$ , суммарная масса магнитопровода, кг;
- $m_k = 0,19$ , масса меди в катушке, кг;
- $d_{пр} = 0,369$ , диаметр провода, мм;
- $h_m = 5,8$ , высота магнита, мм.

Таблица 4.4

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $n_{сл}=12$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	$y_1$ (мм), кг	$y_2$ (P1), Вт	$y_3$ (D*Lk), м2	$y_1'$ , о.е.	$y_2'$ , о.е.	$y_3'$ , о.е.	$dy_1$ , о.е.	$dy_2$ , о.е.	$dy_3$ , о.е.	$Y\Sigma$ , о.е.
0	0,027	0,300	27,0	12	12000	38,3	0,197	11,2	0,00321	-4,69	1,88	-0,89	0,00	0,86	0,09	0,316
1	0,027	0,300	26,9	12	12316	40,5	0,188	11,4	0,00311	-3,83	1,86	-0,76	0,00	0,86	0,12	0,324
2	0,028	0,301	26,9	12	12632	42,8	0,180	11,7	0,00302	-3,02	1,83	-0,65	0,00	0,85	0,15	0,333
3	0,028	0,301	26,8	12	12947	45,2	0,172	11,9	0,00293	-2,24	1,81	-0,54	0,00	0,85	0,18	0,343
4	0,028	0,301	26,8	12	13263	47,6	0,165	12,2	0,00285	-1,49	1,78	-0,43	0,01	0,84	0,21	0,357
5	0,028	0,301	26,7	12	13579	50,1	0,158	12,4	0,00277	-0,77	1,76	-0,33	0,12	0,84	0,25	0,401
6	0,029	0,302	26,6	12	13895	52,7	0,151	12,7	0,00269	-0,08	1,73	-0,24	0,34	0,84	0,28	0,485
7	0,029	0,302	26,6	12	14210	55,3	0,144	12,9	0,00262	0,58	1,71	-0,15	0,57	0,83	0,31	0,573
8	0,029	0,302	26,5	12	14526	58,0	0,138	13,2	0,00255	1,22	1,68	-0,06	0,74	0,83	0,34	0,640
9	0,030	0,302	26,5	12	14842	60,8	0,132	13,4	0,00249	1,83	1,66	0,02	0,85	0,83	0,37	0,684
10	0,030	0,303	26,4	12	15158	63,7	0,126	13,7	0,00242	2,43	1,63	0,10	0,92	0,82	0,40	0,714
11	0,030	0,303	26,4	12	15473	66,6	0,120	13,9	0,00236	3,00	1,61	0,17	0,95	0,82	0,43	0,734
12	0,030	0,303	26,3	12	15789	69,6	0,114	14,1	0,00231	3,55	1,59	0,24	0,97	0,82	0,46	0,748
13	0,031	0,303	26,2	12	16105	72,7	0,109	14,4	0,00225	4,09	1,56	0,31	0,98	0,81	0,48	0,758
14	0,031	0,304	26,2	12	16823	75,9	0,104	14,6	0,00220	4,61	1,54	0,38	0,99	0,81	0,50	0,767
15	0,031	0,304	26,1	12	17167	79,1	0,099	14,8	0,00215	5,11	1,52	0,44	0,99	0,80	0,53	0,000

#### 4.4 Верификация аналитической математической модели численными методами моделирования

Так как оптимизационный расчет производился по аналитической модели, основанной на ряде допущений, изложенных во второй главе диссертации, то его верификация должна быть выполнена уточненным численным методом моделирования электромагнитного и теплового полей. Стандартом для таких уточнений в настоящее время общепризнан расчет магнитного поля методом конечных элементов (МКЭ). Для реализации метода существует ряд программных продуктов, прошедших проверку многочисленными практическими проектами, основанными на МКЭ. Автор использовал для поверочного расчёта программный комплекс ELCUT.

##### 4.4.1 Моделирование электромагнитного поля оптимального варианта ЛДПТ

Исходными параметрами для решения магнитоэстатической задачи ЛДПТ и его геометрической модели были приняты параметры, полученные в результате оптимизационного расчета. На рис.4.2 показана осесимметричная геометрическая модель двигателя.

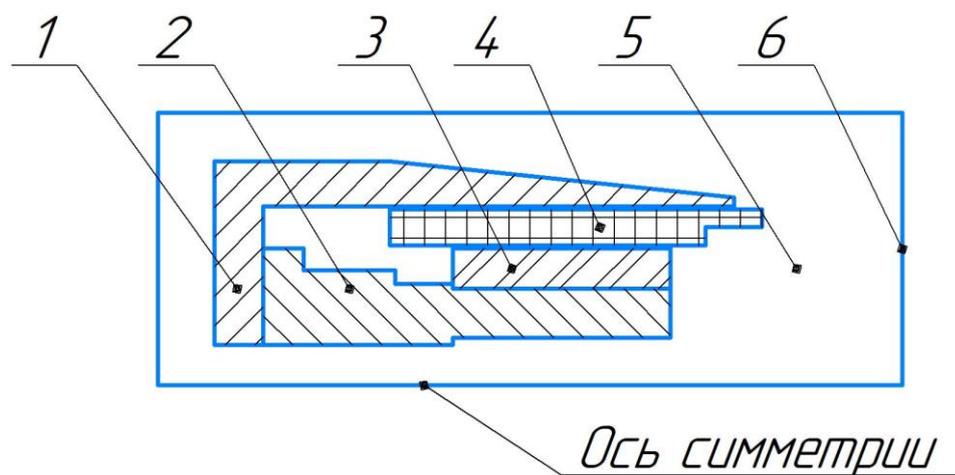


Рисунок 4.2 – Геометрическая модель оптимизируемого варианта двигателя. 1 - внешний магнитопровод; 2 - внутренний магнитопровод; 3 - магнит; 4 - якорь; 5 - воздух; 6 - граница расчета

Магнитостатическая задача решалась в осесимметричной постановке при допущении, что геометрическая модель имеет центральную симметрию по оси двигателя  $z$ . Физические свойства блоков постоянны для любого радиус-вектора  $r$  и не зависят от угловой координаты  $\varphi$ .

На рисунке 4.2 представлена геометрическая модель ЛДПТ, имеющего следующие параметры, определенные техническим заданием и результатами оптимизационного расчета:

- максимальное тяговое усилие 20 Н;
- напряжение питания 26,2 В;
- рабочий ход якоря  $\pm 8$  мм;
- свободный ход якоря  $\pm 18$  мм;
- высота обмоточного слоя якоря 5,2 мм;
- плотность тока в обмотке якоря, 5,38 А/мм<sup>2</sup>;
- аксиальная длина магнита, 31, мм;
- высота магнита, 5,8, мм;
- число витков обмотки якоря, 1428, шт.;
- ток в обмотке якоря, 0,573, А.

На рисунке 4.5 расчетные блоки имеют физические свойства, представленные в таблице 1.

Таблица 4.5

Физические свойства блоков геометрической модели

№	Блок	Физические свойства	Источник поля
1	Катушка якоря	$\mu = 1$	$J_{ср}, \text{ А/м}^2$
2	Магнит	$\mu = 1,02$	$H_c=560 \text{ кА/м}; B_r=0,82 \text{ Тл}$
3	Магнитопровод	Нелинейный материал, $B=f(H)$	-
4	Воздух	$\mu = 1$	-

На ребре, определяющем границу расчета задано граничное условие первого рода: равенство векторного магнитного потенциала нулю.

#### 4.4.2. Результаты численного моделирования поля

Картина линий магнитной индукции, полученная по результатам численного решения осесимметричной магнитостатической задачи представлена на рисунке 4.3. Наибольшее насыщение наблюдается в спинке внутреннего магнитопровода. Здесь максимальная индукция достигает в некоторых точках 2,3 Тл, а средняя индукция в наиболее напряженном сечении составила 2,05 Тл. И хотя этот участок имеет малую протяженность (около 10 мм), его МДС составляет 170 А - почти 20% от суммарной МДС стальных участков магнитопровода.

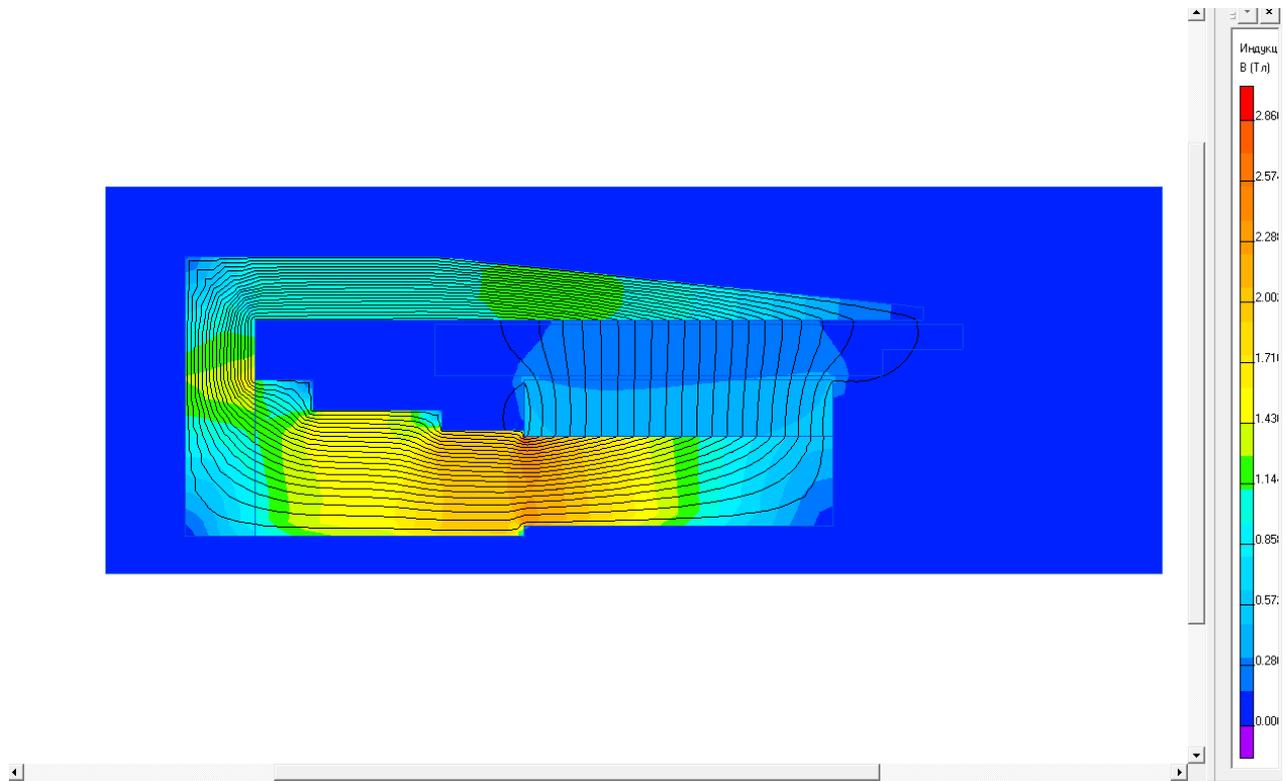


Рис. 4.3. Картина линий магнитной индукции при центральном положении якоря.

Из анализа картины поля можно найти «узкие» места магнитной системы и недоиспользованные участки.

Кроме представленных на рисунке 4.3 результатов численного расчета поля при центральном положении якоря относительно магнитов была решена магнитостатическая задача для смещения якоря по оси  $z$  в пределах рабочего хода, определенного техническим заданием. Для рассматриваемого ЛДПТ рабочий ход

составляет  $\pm 8$  мм. Для предельных и промежуточных смещений якоря были определены все интегральные и точечные параметры машины: индукции по блокам, напряженности, МДС и магнитные потенциалы по участкам цепи, мощность тепловыделения, индуктивность катушки и ее изменение при движении ротора.

На рисунке 4.4 пунктирная линия – пондеромоторная сила по аналитической методике (не учитывает смещение якоря). Сплошная линия с маркерами получена по математической модели методом численного моделирования при смещении якоря от центрального положения.

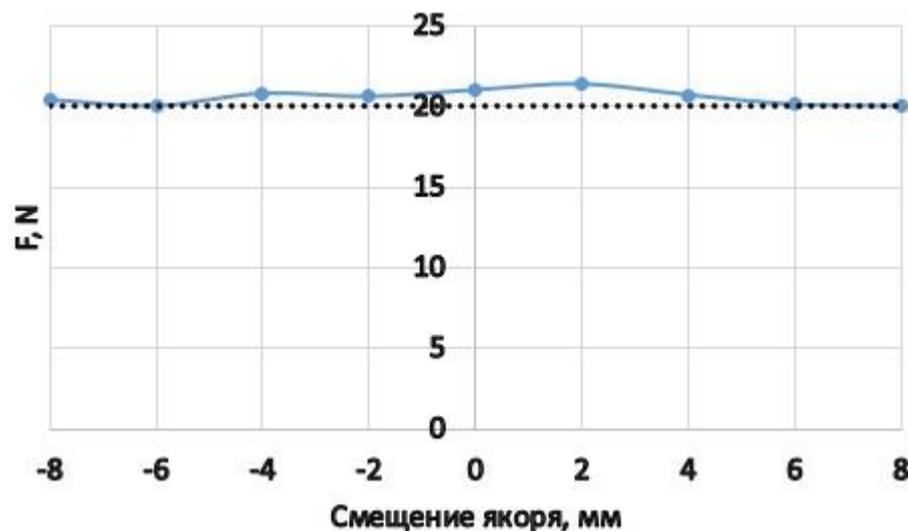


Рисунок 4.4 – Аналитическая (пунктир) и МКЭ (сплошная) кривые зависимости усилия от смещения якоря от центрального положения при номинальном токе якоря.

Расхождение кривой, полученной аналитически с результатами численного моделирования, составило в максимуме 7%.

Отклонение значения усилия от заданного номинального составило также 7% в большую сторону. Таким образом подтверждено, что стабильность усилия во всем диапазоне рабочего хода соответствует техническому заданию.

#### 4.5 Выводы по главе 4

1. По результатам предварительных исследований поверхностей отклика методом упорядоченного перебора, проведенным во второй главе работы, был определен метод параметрической оптимизации ЛДПТ в наиболее полной мере отвечающий поставленной задаче – метод Бокса-Уилсона, основанный на проведении серии расчетов («опытов») по методике планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) и дальнейшем крутом восхождении по поверхности отклика.
2. При проведении ПФЭ были определены минимально удовлетворительные значения частных параметров оптимизации и по функции Харрингтона выведены аналитические зависимости расчета частных параметров по шкале желательности и соответствующего им обобщенного параметра оптимизации  $Y_{\Sigma}$ .
3. Для учета нарушений ограничений по перегреву обмотки и превышению допустимой индукции во внутреннем магнитопроводе применен механизм штрафных функций, позволяющий проводить поиск экстремума на границах области ограничений.
4. Один из значимых факторов – число слоев обмотки якоря, изменяется дискретно. По технологии это число может принимать только целые четные значения. Поэтому  $n_{сл}$  из матрицы ПФЭ был исключен и процесс крутого восхождения проводился для всех допустимых  $n_{сл}$  последовательно.
5. Результатом крутого восхождения по поверхности отклика стала точка глобального оптимума, соответствующая варианту двигателя с обобщенным параметром оптимизации  $Y_{\Sigma} = 0,767$  о.е. Для этого варианта были определены величины частных параметров
  - $m_m = 0.104$ , масса магнитов, кг;
  - $P_1 = 14.6$ , электрические потери (потребляемая мощность в номинальном режиме), Вт;
  - $D = 0.0452$ , средний диаметр катушки якоря, м;

-  $L_K = 0.0486$ , длина катушки, м и соответствующие им значения варьируемых переменных.

6. Верификация аналитической математической модели численным методом моделирования показала максимальное расхождение по величине пондермоторной силы 7%, а в номинальной точке 5,1% в большую сторону.

## 5. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью верификации аналитического расчета и результатов численного моделирования были проведены натурные испытания линейного двигателя из опытной партии, изготовленной на предприятии - индустриальном партнере Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Опытный образец двигателя был спроектирован на кафедре электромеханики и автомобильного электрооборудования СамГТУ при непосредственном участии автора и по методике, изложенной во второй главе настоящей работы. Участие автора заключалось в разработке алгоритма и программы расчета двигателя, математической модели для его параметрической оптимизации, а также им были самостоятельно проведены экспериментальные исследования спроектированного двигателя и проведен анализ результатов.

### 5.1. Испытания опытного образца ЛДПТ

Для определения статических характеристик двигателя был изготовлен стенд, позволяющий перемещать и фиксировать положение якоря во всем диапазоне рабочего хода, определенного техническим заданием ( $\pm 8$  мм от центрального положения). Якорь двигателя через гибкий токоподвод питался от регулируемого стабилизированного источника постоянного тока. Электромагнитное усилие определялось датчиком усилия *Model DYLY-103* с точностью 0,01 Н. Общий вид стенда показан на рис.5.1.

Установка состоит из подвижной опоры 1, на которой закреплен статор двигателя 2. С помощью микрометрического винта опора перемещает статор двигателя относительно неподвижной опоры 6 и связанный с ней через карданный механизм якорь 3, в пределах заданного свободного хода  $\pm 18$  мм и рабочего хода  $\pm 8$  мм. Тензометрический датчик 6 регистрирует усилие, создаваемое якорем двигателя при его питании от источника постоянного тока. Датчик может работать как на сжатие, так и на растяжение.

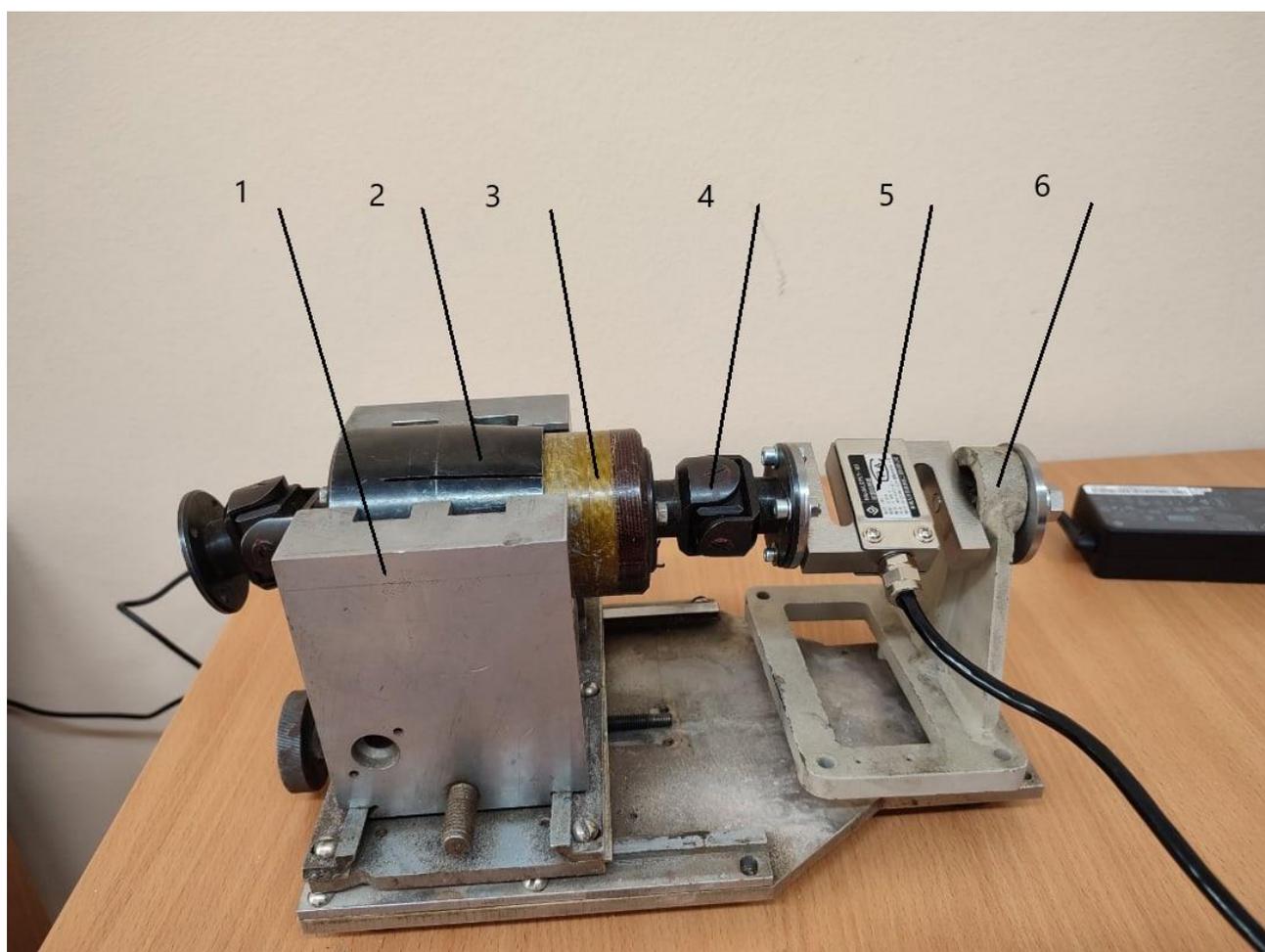


Рисунок 5.1 – Установка для определения статических характеристик ЛДПТ.  
 1 – Подвижная опора; 2 – статор; 3 – якорь; 4 – кардан; 5 – датчик усилия; 6 – неподвижная опора.

В первой серии опытов были определены зависимости пондеромоторной силы в функции тока якоря при различных значениях положительного смещения якоря. За положительное смещение было принято движение якоря в сторону датчика усилия (на рис. 5.1 – вправо).

На рис. 5.2 приведены результаты этого эксперимента.

Из графиков следует, что для заданного номинального усилия 20 Н и максимального смещения якоря +8 мм, ток составил  $I_{nom} = 0.72$  А. Во всех положениях якоря номинальное усилие обеспечивается. При смещении якоря за пределы рабочего хода (красная кривая) усилие существенно ниже требуемого.

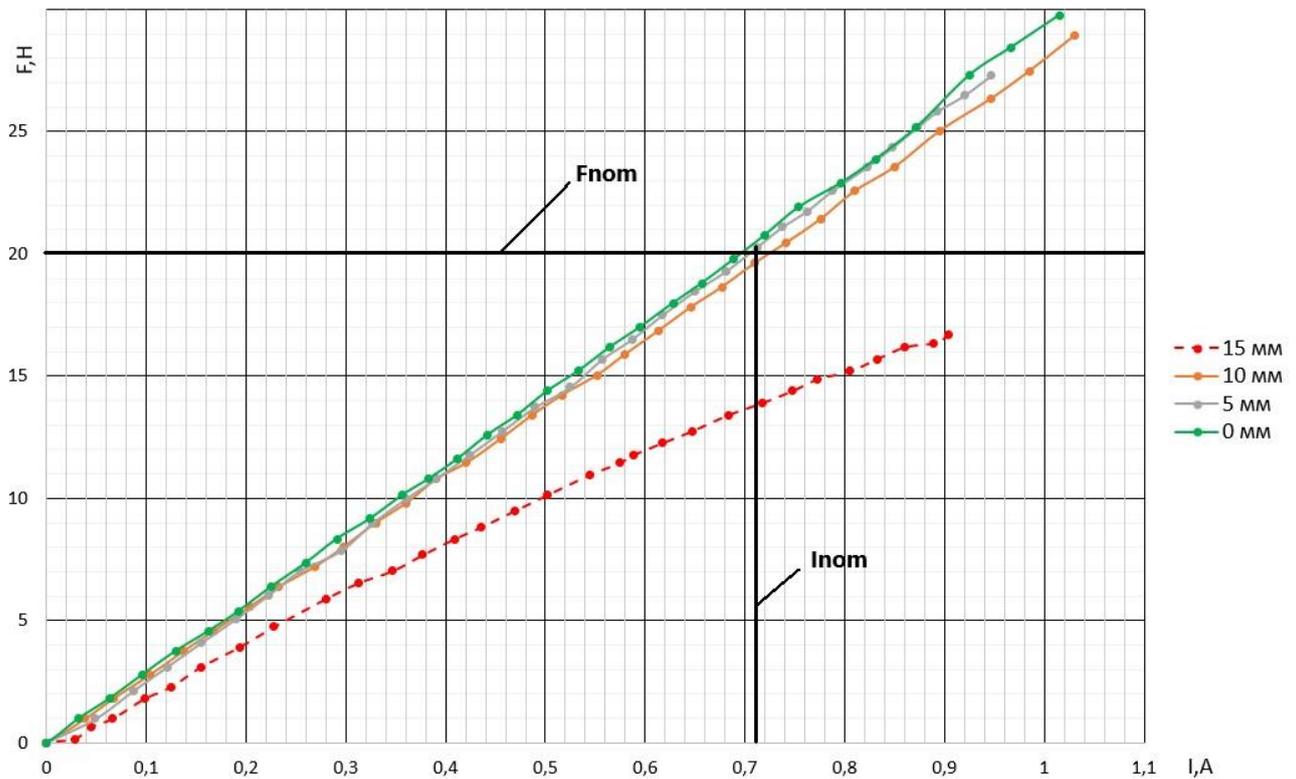


Рисунок 5.2 – Зависимость электромагнитного усилия от тока при положительном смещении якоря (эксперимент).

Во второй серии опытов была поставлена задача определения силовой статической характеристики при смещении как в положительную сторону, так и в отрицательную при разных значениях тока якоря. Результаты показаны на рис. 5.2.

Зависимости усилия, развиваемого двигателем приведены в функции приложенного напряжения. Минимальное рабочее напряжение, определенное техническим заданием 24 В, а максимальное 27 В. При напряжении 27 вольт во всем диапазоне рабочего хода усилие превышает требуемое по заданию.

Полученные характеристики в дальнейшем послужили базой для синтеза системы управления ЛДПТ.

Для верификации тепловых расчетов был проведен эксперимент по определению кривых нагрева двигателя при различных значениях тока нагрузки в функции времени. Опыт проводился при комнатной температуре (21<sup>0</sup>С) без обдува двигателя. Измерение температуры корпуса проводилось пирометром с ценой деления 0,1<sup>0</sup>С. Графики температуры корпуса представлены на рис.5.3.

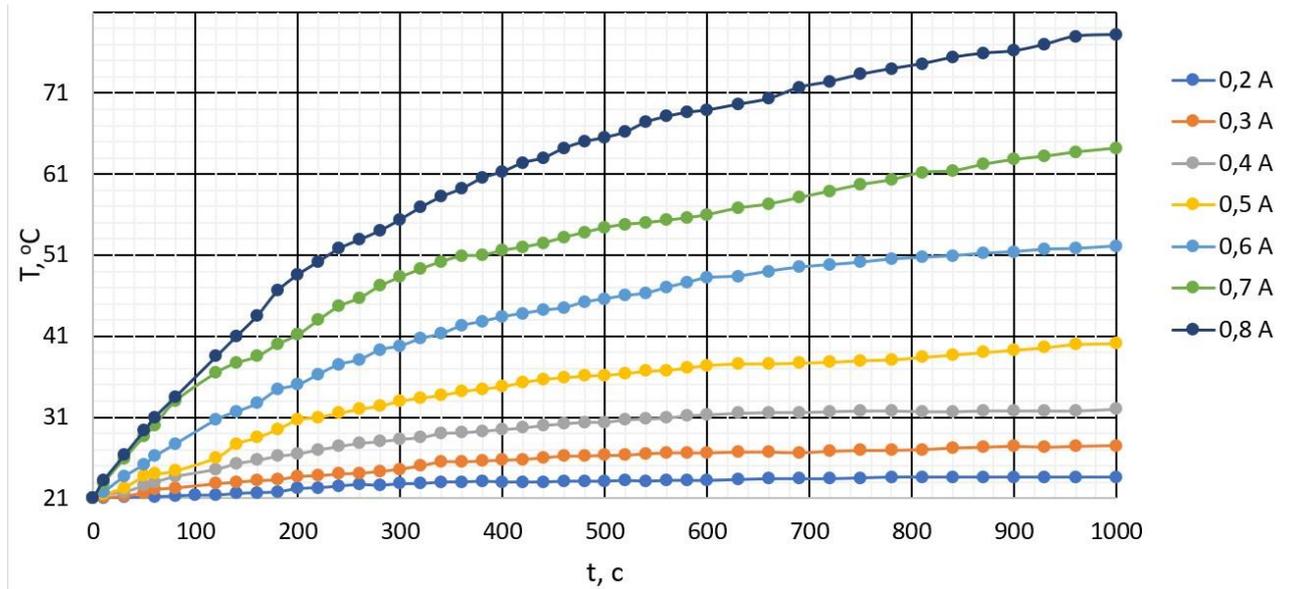


Рисунок 5.3 – Кривые нагрева корпуса двигателя (эксперимент)

Установившееся значение наружной поверхности корпуса составило  $64,5^{\circ}\text{C}$ .

Методом сопротивлений была измерена установившаяся температура катушки якоря. Для номинального тока она составила  $T_{\text{обм}} = 78,7^{\circ}\text{C}$ . В опыте температура окружающего воздуха была  $20^{\circ}\text{C}$ . При пересчете на стандартное значение температуры окружающей среды  $+40^{\circ}\text{C}$ , значение средней температуры катушки якоря составило  $+98,7^{\circ}\text{C}$ . Это значение близко к расчетному, приведенному во второй главе (Табл. 2.3).

Одним из важнейших параметров ЛДПТ, определяющим его работу в динамике, является электромагнитная постоянная  $T_{\varepsilon}$ ,

$$T_{\varepsilon} = \frac{L_a}{R_{\theta}}, c$$

где  $L_a$  – индуктивность катушки якоря, Гн;

$R_{\theta}$  – активное сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии, Ом.

Для определения индуктивности якоря можно воспользоваться как результатами численного моделирования, так и экспериментальными данными.

Результаты вычисления индуктивности обмотки в ELCUT, полученные двумя способами – через потокосцепление и через вычисление магнитной энергии, запасенной катушкой, показаны на рис.5.4.

$$L_a = 0,167 \text{ Гн и } L_a = 0,165 \text{ Гн}$$

Расхождение результатов не превышает 1,5%

Экспериментальное определение индуктивности заключалось в определении полного сопротивления катушки на переменном токе при частотах от 10 до 40 Гц. Этот диапазон соответствует основным возмущающим частотам, которые должен подавлять ЛДПТ в демпферном режиме.

$$L_a = \frac{x_a}{2\pi f} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_\theta^2}}{2\pi f}$$

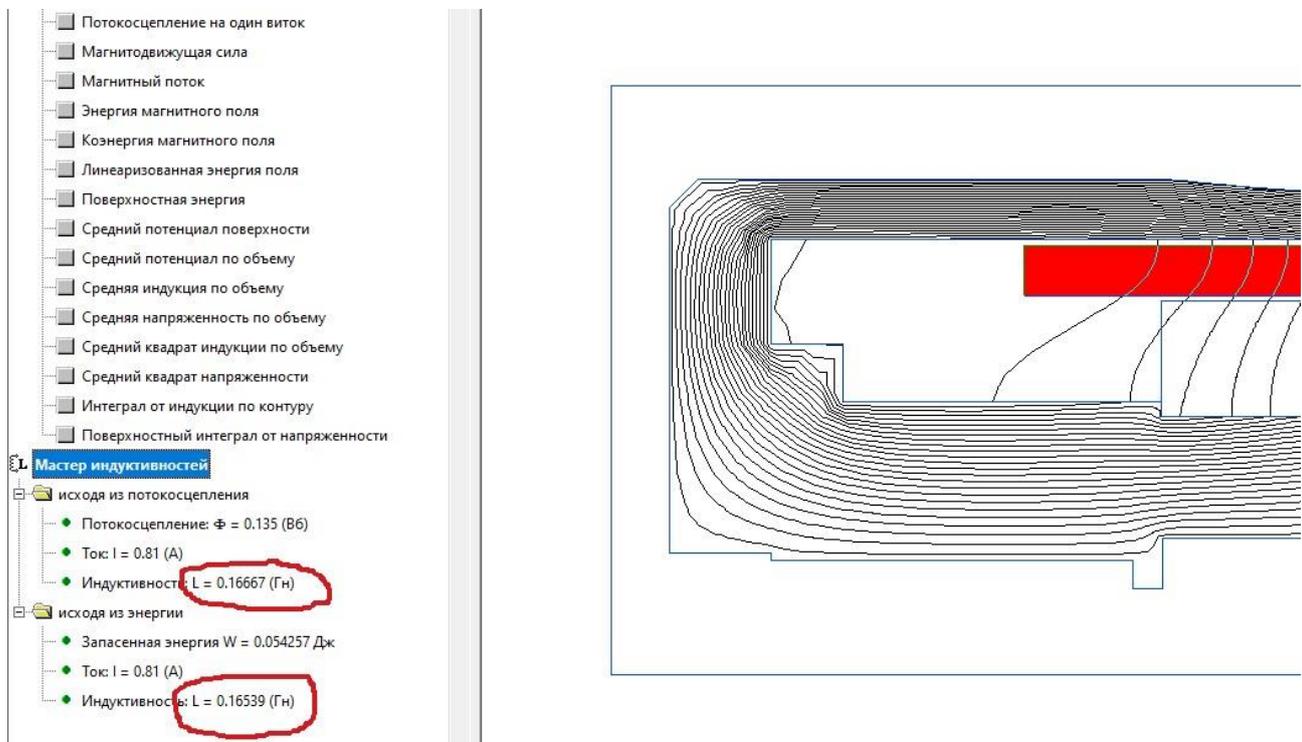


Рисунок 5.4 – Расчет индуктивности. (Моделирование).

Численные значения индуктивности, рассчитанные по результатам эксперимента, изменялись от 0,155 Гн на частоте 33,3 Гц, до 0,231 Гн при частоте 10 Гц. Такое расхождение результатов объясняется разной степенью насыщения магнитной цепи при разных частотах питающего напряжения.

Параметры обмотки якоря

Параметр	Расчет	Моделирование	Эксперимент
Активное сопротивление обмотки в нагретом состоянии, $R_{\theta}$ , Ом	33,2	-	33,5
Индуктивность	-	0,165 (0,167)	0,155...0,231
Электромагнитная постоянная, мс	5	5,03 (4,97)	4,63...6,89

## 5.2. Анализ результатов аналитического расчета, численного моделирования и эксперимента.

В главе 2 представленной работы приведена аналитическая расчетная математическая модель ЛДПТ, в главах 3 и 4 методика и алгоритм его параметрической оптимизации, включая численное моделирование. Экспериментальные исследования параметров и характеристик разработанного двигателя даны в настоящей главе. Для верификации теоретических положений, предложенных выше, и подтверждения достижения цели и задач исследования, был проведен анализ результатов аналитического расчета, численного моделирования и эксперимента.

На рис.5.5 показаны статические силовые характеристики двигателя, полученные по результатам аналитического «инженерного» расчета (1), моделирования МКЭ (2) и эксперимента (3).

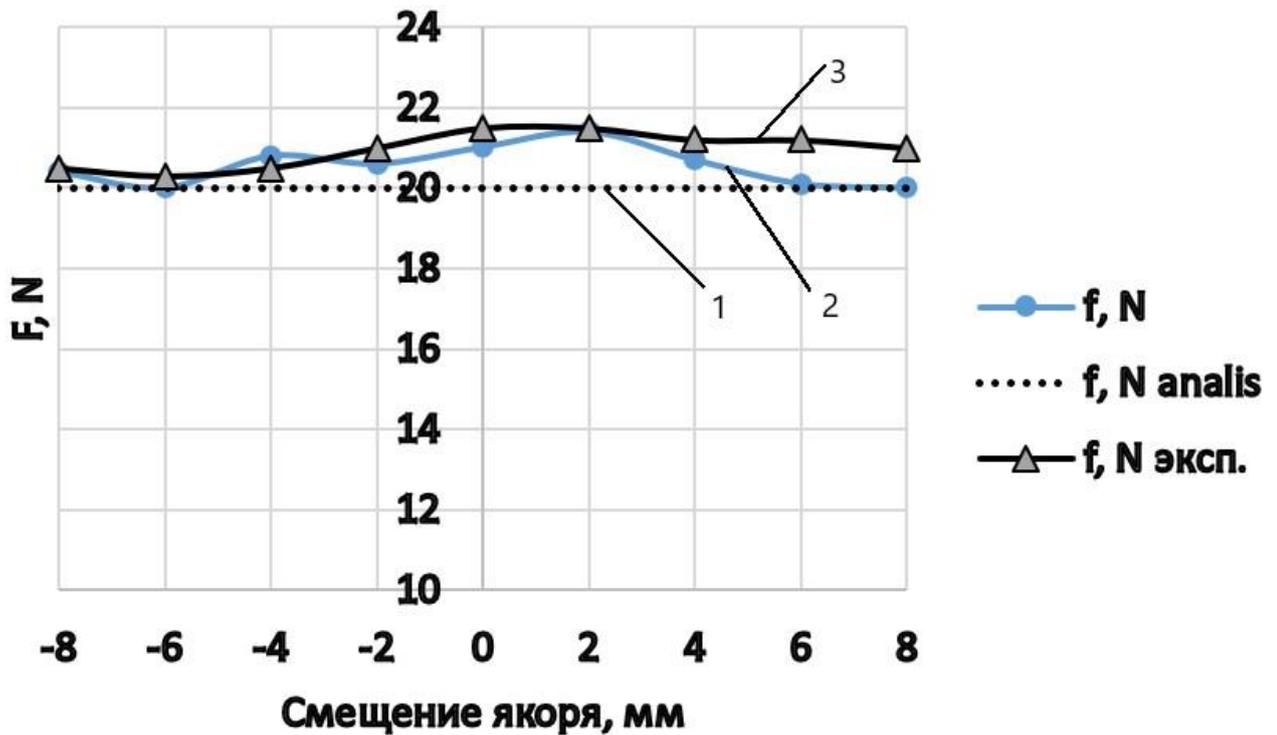


Рисунок 5.5 – Статические силовые характеристики ЛДПТ.

Расхождение значений, полученных моделированием и аналитическим расчетом (Дельта), и экспериментом (Дельта1) показаны на рис. 5.6.

Главная причина расхождения характеристик вызвана нестабильностью энергетических характеристик постоянных магнитов по сравнению с заявленными в каталоге. Следует отметить, что реальные параметры ПМ, как правило, отличаются от каталожных в большую сторону.

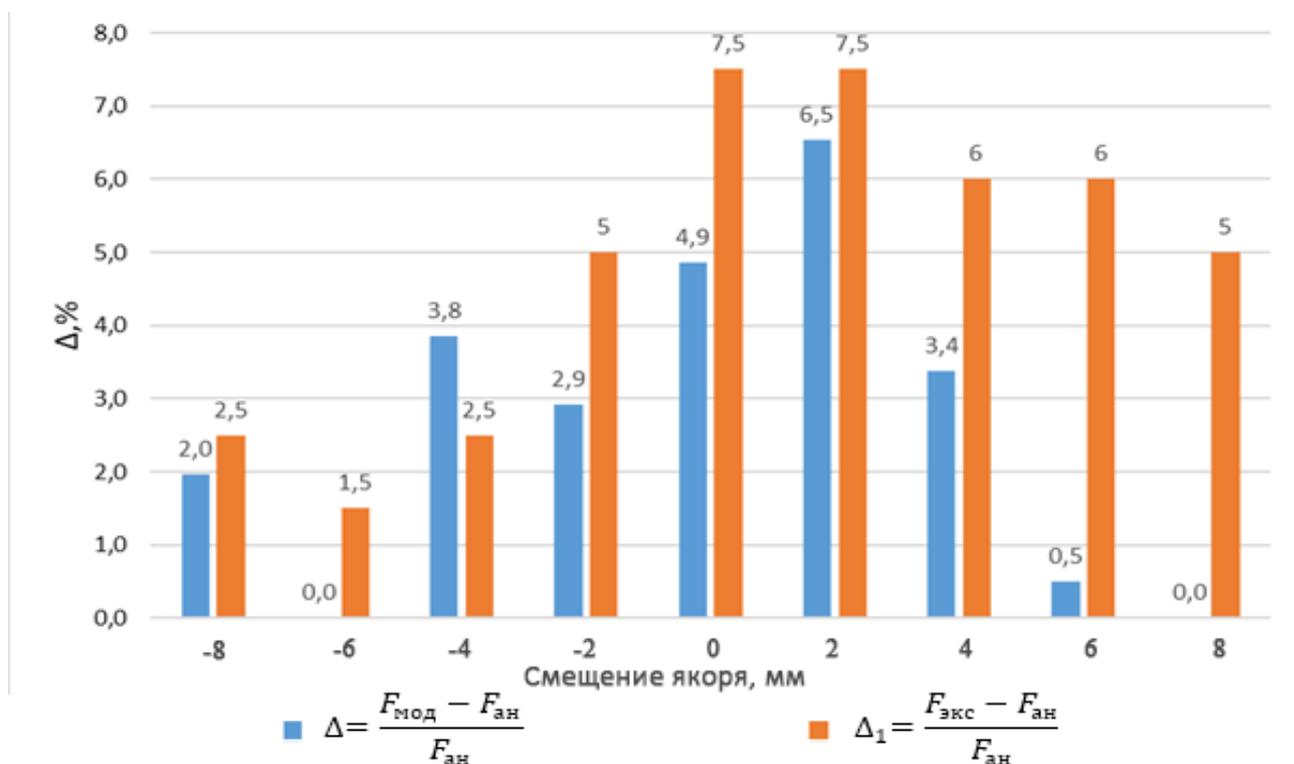


Рисунок 5.6 – Расхождение параметров двигателя, полученных аналитически, моделированием и экспериментально.

В результате оптимизационного расчета исследуемый двигатель был оптимизирован. Были скорректированы его размеры и изменены значения варьируемых переменных. Результаты оптимизации геометрии представлены на рис.5.7, а выходных параметров на диаграммах рис.5.8 и 5.9

Из анализа диаграмм следует, что по всем выходным параметрам, кроме габаритной длины, оптимизированный двигатель превосходит прототип. Особо следует отметить снижение массы ПМ на 35% и потребляемой мощности на 36,5%. Для систем бортового применения летательных аппаратов это существенное конкурентное преимущество.

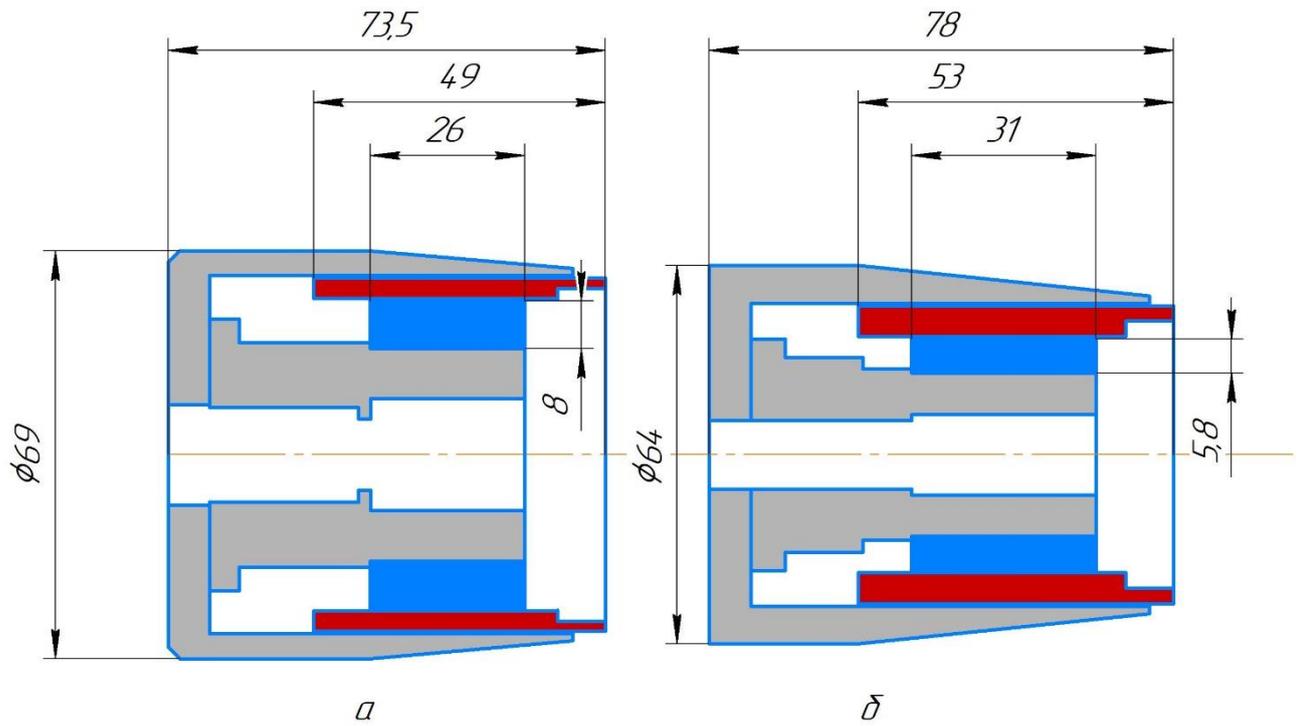


Рисунок 5.7 – Габариты двигателя ЛДПТ-2 (а) и оптимизированного варианта (б).

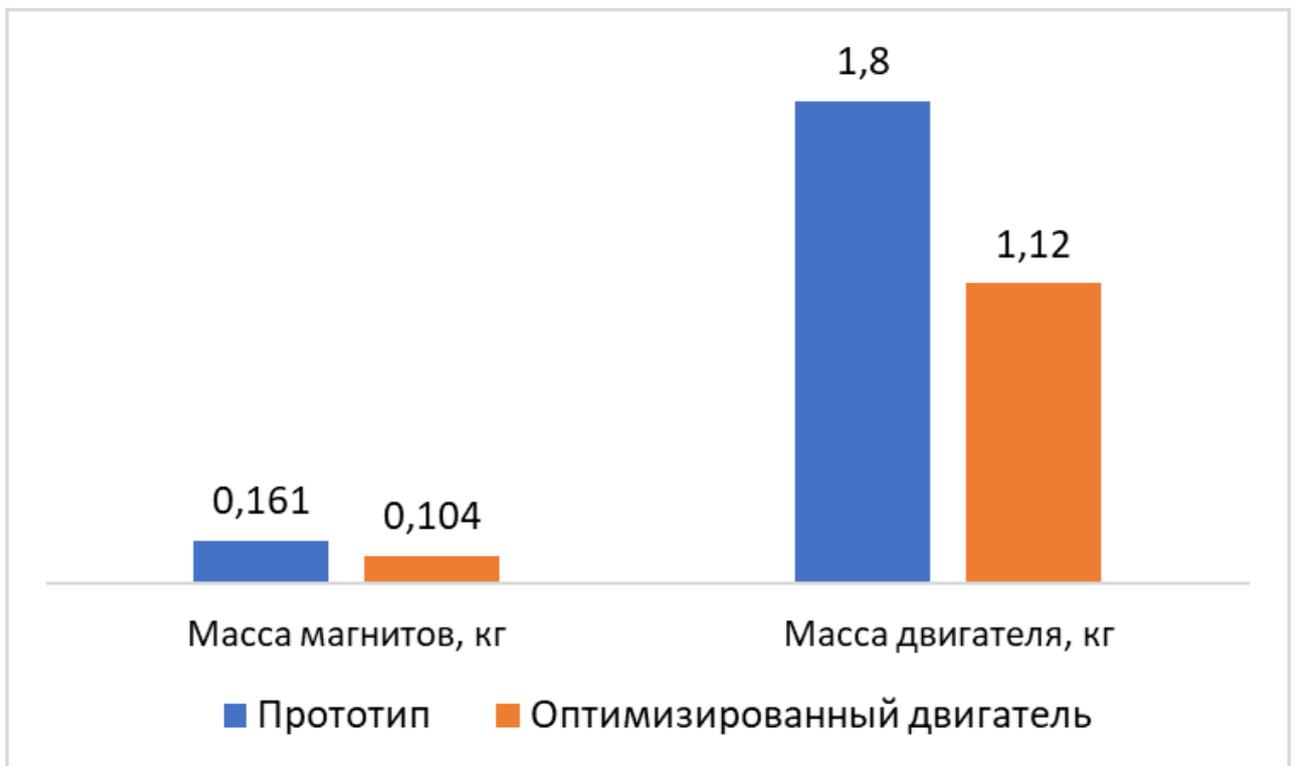


Рисунок 5.8 – Сравнение оптимизированного двигателя и прототипа по массе и массе используемых магнитов

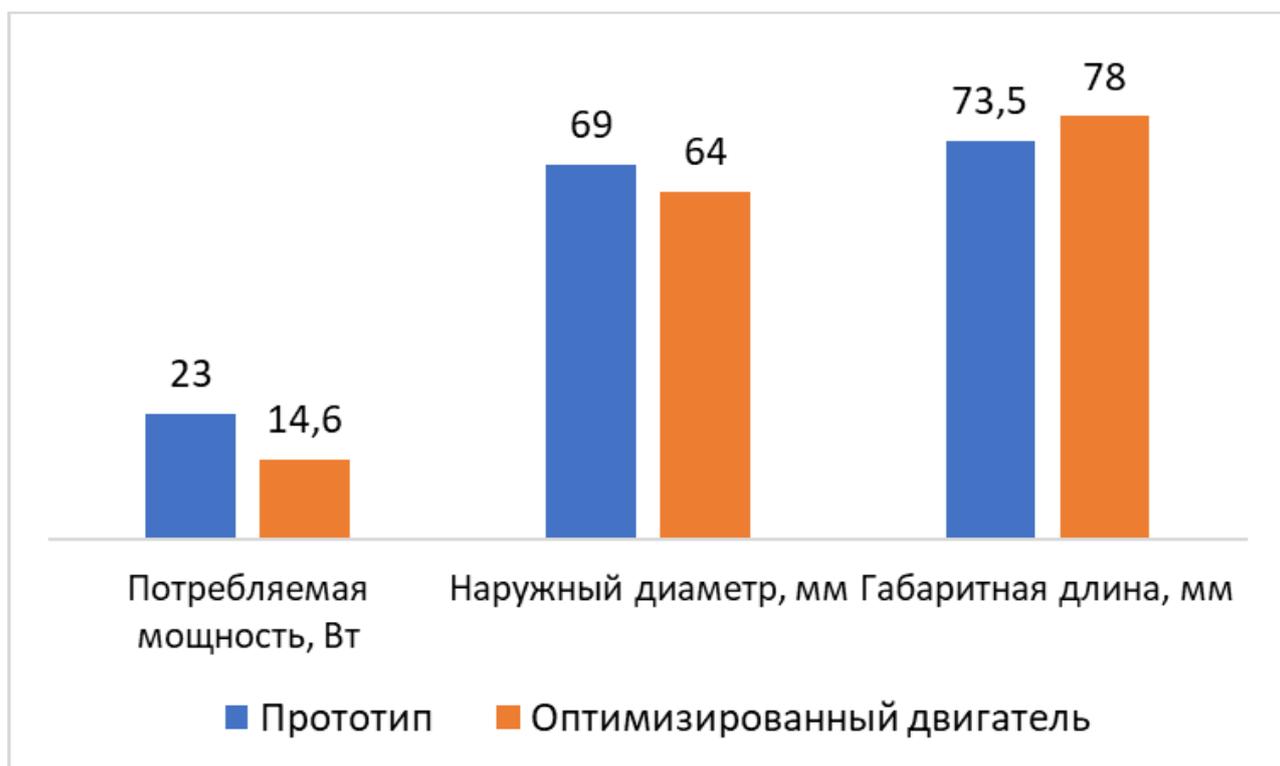


Рисунок 5.9 – Сравнение оптимизированного двигателя и прототипа по габаритам и потребляемой мощности.

Основной причиной, которая позволила получить в оптимизированном двигателе улучшение главных выходных параметров, стало применение известного принципа создания «более медной» по сравнению с «более стальной» конструкцией у прототипа. В машинах с возбуждением от постоянных магнитов, этот принцип оправдывает увеличение объёма меди обмотки за счёт уменьшения массы более дорогих ПМ.

### 5.3. Выводы по главе 5

1. Опытная партия двигателей ЛДПТ-2, рассчитанных и спроектированных с участием автора, была изготовлена на предприятии - индустриальном партнере СамГТУ. Приемочные испытания на стендах предприятия-заказчика и на реальной нагрузке показали, что двигатели полностью удовлетворяют требованиям технического задания (см. Приложение Ж).
2. Экспериментальное исследование статических силовых характеристик двигателя подтвердили корректность принятых в расчетной аналитической модели допущений, а также адекватность моделирования методом конечных элементов электромагнитных и тепловых процессов ЛДПТ.
3. Динамические параметры двигателя, полученные экспериментально, показали его пригодность для синтеза быстродействующей системы позиционирования и стабилизации исполнительного органа. Значение электромагнитной постоянной времени составило 5 мс, что близко к предельному быстродействию аналогичных систем.
4. Параметрическая оптимизация двигателя позволила снизить массу используемых магнитов по сравнению с прототипом на 35%, что существенно уменьшает затраты на материалы при производстве машины. Снижение потребляемой номинальной мощности на 36,5% весьма важно для системы, предназначенной к использованию в бортовой аппаратуре летательных аппаратов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача создания линейного двигателя постоянного тока с повышенными массогабаритными, энергетическими характеристиками и методики его оптимизационного проектирования для электротехнического комплекса прецизионного электромагнитного демпфера бортового назначения.

В процессе решения данной задачи получены следующие научные и практические результаты:

1. По результатам анализа типов и конструкций приводов линейного перемещения в качестве базового объекта исследования был выбран линейный двигатель постоянного тока с полым якорем и магнитоэлектрическим возбуждением. Этот тип двигателя отвечает в полной мере основным требованиям к силовому элементу электротехнической системы позиционирования и стабилизации бортового оптико-механического комплекса летательного аппарата.

2. Предложен алгоритм расчета, позволяющий создать математическую модель линейного двигателя постоянного тока, основанную на физических закономерностях прямого преобразования электрической мощности в линейное перемещение рабочего органа, учитывающий конструктивные особенности возбуждения от постоянных магнитов и полый конструкции якоря.

3. Разработанная математическая модель определяет зависимости выходных параметров двигателя (потребляемой мощности, массы постоянных магнитов, массогабаритных характеристик, температуры активных частей машины и др.) в функции независимых варьируемых переменных и данных технического задания (номинального усилия, напряжения питания, магнитной индукции в зазоре, линейной нагрузки, числа слоев обмотки якоря, относительной длины якоря).

4. . Доказано, что метод тепловых схем замещения для расчета средних температур активных частей линейного двигателя постоянного тока – катушки и постоянных магнитов, дает удовлетворительную погрешность вычисления, не превышающую 5%.

5. Задача параметрической оптимизации линейного двигателя постоянного тока является многокритериальной. Так как оптимизировать объект одновременно по нескольким независимым параметрам невозможно, то было принято решение о поиске компромиссного варианта путем перехода от многокритериальной задачи к однокритериальной, методом синтеза обобщенного параметра оптимизации. Обобщенный параметр был построен в виде суммы частных параметров, переведенных в относительные величины по функции Харрингтона, с весовыми коэффициентами.

6. По результатам анализа поверхностей отклика было принято решение о выборе метода направленного поиска экстремума Бокса-Уилсона в качестве основного метода оптимизации. Метод основан на проведении серии расчетов по алгоритму полного или дробного факторного эксперимента с последующим крутым восхождением по поверхности отклика. Был разработан алгоритм и программа, реализующие указанный метод оптимизации, на основе математической модели расчета ЛДПТ, изложенной в главе 2.

7. Результатом оптимизации методом крутого восхождения по поверхности отклика стала точка глобального оптимума, соответствующая варианту двигателя с обобщенным параметром оптимизации  $Y_{\Sigma} = 0,767$  о.е. Для этого варианта были определены величины частных параметров: масса магнитов - 0,104 кг; электрические потери (потребляемая мощность в номинальном режиме) - 14,6 Вт; средний диаметр катушки якоря - 0,0452 м; длина катушки - 0,0486 м и соответствующие им значения варьируемых переменных.

8. По результатам расчетов, проведенных автором, на предприятии-индустриальном партнере СамГТУ была изготовлена опытно-промышленная партия двигателей ЛДПТ-2. Испытания на стендах предприятия-заказчика и на

реальной нагрузке показали, что двигатели полностью удовлетворяют требованиям технического задания. Экспериментальное исследование статических силовых характеристик двигателя подтвердили корректность принятых в расчетной аналитической модели допущений, а также адекватность моделирования методом конечных элементов электромагнитных и тепловых процессов ЛДПТ.

9. Динамические параметры двигателя, полученные экспериментально, показали его пригодность для синтеза быстродействующей системы позиционирования и стабилизации исполнительного органа. Значение электромагнитной постоянной времени составило 5 мс, что близко к предельному быстродействию аналогичных систем.

10. Параметрическая оптимизация двигателя позволила снизить массу используемых магнитов по сравнению с прототипом на 35%, что существенно уменьшает затраты на материалы при производстве машины. Снижение потребляемой номинальной мощности на 36,5% также весьма важно для системы, предназначенной к использованию в бортовой аппаратуре летательных аппаратов.

В дальнейших научных исследованиях автор планирует развитие темы диссертации в направлении совершенствования электротехнического комплекса позиционирования и стабилизации, включая систему управления.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Абакумов А.М., Горячкин А.А., Овсянников В.Н. Математические модели и структуры системы стабилизации поперечной устойчивости автомобиля // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки». - 2023. - Т. 31. - №1. - С. 60-75. doi: 10.14498/tech.2023.1.5
2. Авербух В.Я. Космическая прецизионная электромеханика // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2011. Т. 124. № 5. С. 17-28.
3. Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – Москва, Наука, 1976. – 140 с.
4. Аипов Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе / Р.С. Аипов. - Уфа: Башкирский ГАУ, 2003. - 201 с.
5. Алексеев А.А., Горбунов А.В., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. Линейный привод гексапода с функцией активного виброгашения // Труды X Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». 2018. №50. С.196-200.
6. Андрианов, А. Ю. Линейные электрические двигатели / А. Ю. Андрианов // Диалог культур : Материалы XVI Международной научно-практической конференции на английском языке. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 17–19 мая 2023 года / Под общей редакцией В.В. Кирилловой. Том Часть I. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 276-281. – EDN WFDIEF.
7. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента: Учеб. Пособие для вузов / В. И. Асатурян – М.: Радио и связь, 1983. – 248с.
8. Афанасьев А. И., Косенко Е. А., Суслов Д. Н. Параметры тяговой характеристики линейного электромагнитного двигателя для вибротранспортных машин при пуске под нагрузкой // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов X Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В. Р. Кубачека». Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2012. С. 377 - 380

9. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф, Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.-Л.: Издательство «Энергия», 1964. – 480 с.
10. Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В. А. Балагуров. - М. : Высш. шк., 1982. - 272 с.
11. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: МЭИ, 2010. — 328 с.
12. Баль В.Б., Геча В.Я., Гончаров В.И. и др. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – области применения // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. М.: Научно производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна, т.149, 2015. – с. 3-17.
13. Бахарев Н.П. Планирование эксперимента: учеб. пособие / Н.П. Бахарев. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 77 с
14. Бобров И.И. Разработка стенда управления позицией РАУ-107а с помощью оборудования MitsubishiElectric / И.И. Бобров, Ю.Н. Сердитов, В.В. Гульванский // Наука настоящего и будущего. 2017. Т. 1. С. 153-155.
15. Бобцов А.А., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Карев П.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений: Учебное пособие. — СПб: Университет ИТМО, 2017. — 134 с
16. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления /В. Г. Болтянский – М.: Наука, 2012.
17. Веселовский О. Н., Коняев А. Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. М.: Энергоатомиздат, 1991. - 256 с.
18. Веселовский О.Н. Некоторые вопросы теории и применения линейных двигателей [Текст] : межвуз. сб. науч. тр. / Электродвигатели с разомкнутым магнитопроводом. -Новосибирск: Новосиб. электро-техн. инт., 1989. - С. 3 - 7.
19. Викторов К.Д. Дестабилизация устойчивого положения равновесия маятника на каретке / К.Д. Викторов, А.М. Сеница // Молодежная школа-семинар по

- проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. 2016. Т. 1. С. 51-56.
20. Власов В. Е., Доморозов Алексей Николаевич, Нгуен Ван Ньань Математическая модель процесса колебания подрессоренной и неподдресоренной масс автомобиля на опорной платформе вибростенда KDXG // Вестник ИрГТУ. 2011. №12 (59)
21. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. - 3-е изд., перераб. - Л. : Энергия, 1978. - 832 с.
22. Вунна Шве. Линейный асинхронный двигатель быстродействующих механизмов. Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. тех-х наук. МЭИ технический университет, 2008. 19 с.
23. Вырыханов Д. А. О взаимосвязи КПД, против-ЭДС и механической работы в линейных электромагнитных двигателях / Д. А. Вырыханов // Повышение эффективной эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве : Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием имени Г.П. Ерошенко, Саратов, 22 декабря 2023 года. – Саратов: Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. – С. 77-89. – EDN MUAEXH.
24. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. - М.: Высшая школа, 1984. - 431 с.
25. Горбунов А. В., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С. Высокоточная система наведения и ориентации космических бортовых приборов на базе гексапода с пространственным датчиком положения// Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 42-48.
26. Горбунов А.В., Коротков Е.Б., Леканов А.В., Рудыка С.А., Слободзян Н.С. Применение пространственных механизмов с параллельной структурой для наведения, стабилизации и виброизоляции бортовых приборов // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 117-118.

27. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Д–30 Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 232 с.
28. Духанин В.И. Автомобильный генератор возвратно-поступательного движения. Анализ конструкции. М.: МГТУ «МАМИ», 2010.
29. Дьячков В.К. Перспективы применения линейных электродвигателей в приводах конвейеров // Электропривод с линейными электродвигателями: Сб. трудов. Киев. - 1976. - ч.3. - С. 4-8.
30. Енаев А. А. Основы теории колебаний автомобиля при торможении и её приложения. М.: Машиностроение, 2002. 341 с.: ил.
31. Ефимов, И. Г. Теория регулируемых линейных электромагнитных приводов и их применение в системах управления техническими объектами: автореф. дис. . д-ра техн. наук : 05.02.03 / И. Г. Ефимов ; С.-Петербург. гос. техн. ун-т. - СПб., 1995. - 31 с.
32. Жуков Ю.А., Коротков Е.Б., Слободзян Н.С., Яковенко Н.Г. Оценка решения задач кинематики в системе управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения на базе гексапода // Оборонная техника. 2017. № 9. С. 29-37
33. Жуков Ю.А., Лычагин Ю.В., Слободзян Н.С. Решение задач кинематики гексапода в реальном времени // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Научный редактор А.Т. Барабанов. 2017. С. 87-91.
34. Иванова И. А. Исследование и разработка магнитоэлектрического линейного генератора для преобразования энергии морских волн // Дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. – СПб., 2006.
35. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. -М. : Энергия, 1980. - 928 с.
36. Ивоботенко Б.А. Планирование эксперимента в электромеханике /Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов – М.: Энергия, 1975.
37. Ижеля Г.И., Ребров С.А., Шаповаленко А.Г. Линейные асинхронные двигатели. Киев: Техника, 1975. - 136 с.

- 38.Исмагилов Ф.Р. Электрические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Машиностроение, 2014. – 267 с.
- 39.Карпович С.Е., Межинский Ю.С., Жарский В.В. Программная компенсация погрешности позиционирования линейного шагового привода // Доклады БГУИР. 2003. №2 (2). С. 89-98.
- 40.Ключников А.Т., Коротаев А.Д., Шутемов С.В. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя // Электротехника. - 2013. - № 11. - С. 14-17.
- 41.Козаченко Е.В. Линейные тяговые электродвигатели. - М.: Информэлектро, 1984.-72 с.
- 42.Копылов И.П., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
- 43.Кулон Ж.-Л., Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. М.: Мир, 1989 – 12л.: ил.
- 44.Легаев А. Я. Конструкция стенда для снятия тяговой характеристики линейного электромагнитного двигателя / А. Я. Легаев, Д. Н. Шестаков // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность: Материалы III Национальной научной конференции, Курган, 13 мая 2024 года. – Курган: Курганский государственный университет, 2024. – С. 291-297. – EDN VBALPX.
- 45.Линейные серводвигатели серии QUICKSHAFT // DOI <https://likemall.ru/hotaliexpress/i32960047091x42>
- 46.Лобов К. Ф. Линейный электромагнитный привод малых перемещений : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / К. Ф. Лобов. - Л., 1987. - 200 л.
- 47.Луковников, В. И. Электропривод колебательного движения / В. И. Луковников. – М. : Энергоатомиздат, 1984. –152 с
- 48.Любимов И. И., Буйлов Ю. А. О влиянии загруженности автомобиля на качество подрессоривания // Вестник СГТУ. 2013. №1 (70)
- 49.Макаричев Ю. А. Анализ типов приводов линейного перемещения для систем позиционирования / Ю. А. Макаричев, Я. А. Ратцев, О. В. Пантюхин

- // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 367-372. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-4-367-368. – EDN EIUUQU.
- 50.Макаричев Ю. А. Исследование теплового режима линейного двигателя постоянного тока / Ю. А. Макаричев, Я. А. Ратцев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2023. – Т. 31, № 4(80). – С. 80-93. – DOI 10.14498/tech.2023.4.6. – EDN ECLXOP.
- 51.Макаричев Ю. А. Линейный двигатель постоянного тока системы стабилизации прецизионных объектов / Ю. А. Макаричев, Я. А. Ратцев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 2(74). – С. 73-84.
- 52.Макаричев Ю. А. Математическая модель линейного двигателя системы позиционирования / Ю. А. Макаричев, Я. А. Ратцев, А. А. Горячкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 4. – С. 380-383. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-4-380-381. – EDN LNIQUW.
- 53.Макаричев Ю.А. Численное моделирование в электротехнике с использованием программной среды ELCUT: учебное пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников, Самара: Самар. Гос. Техн. ун-т, 2020 -92 с.: ил."
- 54.Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.: ил
- 55.Миннебаев Р.М. Стабилизация обратного маятника в положении неустойчивого равновесия / Р.М. Миннебаев, А.М. Сеница // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. 2016. Т. 1. С. 57-62.
- 56.Миннебаев Р.М. Стабилизация обратного маятника в положении неустойчивого равновесия / Р.М. Миннебаев, А.М. Сеница // Молодежная

школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. 2016. Т. 1. С. 57-62.

57. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Академия, 2007.
58. Москаленко В.В. Электродвигатели специального назначения. - М.: Энергоиздат, 1981. - 104 с., ил.- (Библиотека электромонтёра. Выпуск 522).
59. Москвитин А.И. Электрические машины возвратно-поступательного движения. - М.: Изд-во АН СССР, 1950. - 144 с.
60. Мошкин В. И. Влияние укорочения магнитной системы на статические характеристики линейного электромагнитного двигателя с поперечным магнитным полем / В. И. Мошкин, Г. Г. Угаров, Д. Н. Шестаков, С. Ю. Помялов // Вопросы электротехнологии. - 2015. -№ 1 (6). - С. 77-82.
61. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. - 2003. № 2. - С. 30-36.
62. Нейман Л.А. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий // Дисс. на соиск. степ. доктора. техн. наук. – НГТУ. 2018. 400 с.
63. Нейман Л.А., Нейман В.Ю., Шабанов А.С. Исторические этапы в развитии конструкций электромагнитных двигателей как отдельного класса машин с линейным электроприводом // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. №3-1.
64. Нейман, В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. 2003. № 9. С. 25-30.
65. Нугуманов Р.Р. Совершенствование привода жерновой мельницы применением плоского линейного асинхронного двигателя. // Дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. – Уфа. 2016. 125 с.
66. Разработка типоразмерного ряда прецизионных мехатронных устройств стабилизации, позиционирования и наведения бортовой аппаратуры космической и авиационной техники [Текст]: отчеты о НИОКТР по этапам 1-

- 6 / рук. Матвеев С.А.; исполн.: Коротков Е.Б., Слободзян Н.С. [идр.]. —СПб., БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, 2016-2018 гг.
- 67.Ратцев Я.А. Электромагнитный клапан для газотурбинного двигателя: магистерская диссертация: 13.04.02. — СамГТУ, Самара, 2021. — 70 с.
- 68.Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф., Шимчак П., Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Екатеринбург.: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005, 431 с.
- 69.Свечарник Д. В. Электрические машины, непосредственного привода: Безредукторный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.
- 70.Свечарник Д.В. Линейный электропривод. -М.: Энергия, 1979. -153 с.
- 71.Сергеенкова Е.В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор): дис. канд. техн. наук. Московский энергетический институт. – М.: 2011. – 118 с.
- 72.Серебrenицкий П.П. Линейные двигатели нового поколения // «Военмех» им. Д.Ф. Устинова. 2019
- 73.Слободзян Н.С. Прецизионное управление линейным приводом механизма с параллельной структурой космического применения Дисс. на соиск. степ. канд. техн. наук. – СПб., 2021.166 с.
- 74.Соболь И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями /И. М. Соболь, Р. Б. Стадишев – М.: Наука, 2010. – 108с.
- 75.Соколов М. М., Сорокин Л. К. Электропривод с линейными асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1979. 152 с
- 76.Усольцев А.А. Электрические машины/Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО. 2013, —416 с.
- 77.Хитерер М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. - СПб. : Корона принт, 2013. - 357 с.
- 78.Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений /И. Г. Черноруцкий – С.Пб.: БХВ – Петербург, 2005. – 416 с.

79. Шароватов В.Т., Чернусь П.П. Positioning of pneumatic drive according to position // Вестник СевНТУ. 2014. № 153. С. 30-35
80. Шестаков Д. Н. Методы расчета скорости якоря электромагнита с применением программы Elcut / Д. Н. Шестаков // Наука XXI века: технологии, управление, безопасность: материалы II национальной научной конференции. - Курган, 2022. - С. 326-332.
81. Штых Д.В. Линейные перемещения с микронной субмикронной точностью // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2012. №1-2. С. 649-652
82. Шулаков Н.В. Электрические машины: конспект лекций. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. - 325 с.
83. Шутемов С.В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса // Фундаментальные исследования. - 2016. - № 12-4. - С. 800-805.
84. Янгулов В.С., Эдличко А.А. Прецизионные винтовые механизмы и передачи для использования в редукторах приводов систем космического применения // Известия ТПУ. 2010. Т. 317. № 2. С. 40-45
85. Яруллин Р.Б. Определение эксплуатационной надежности линейного электропривода зерноочистительной машины / Р.Б. Яруллин, М.Ф. Туктаров, И.Д. Бадретдинов, С.В. Фефелова, В.Г. Байназаров // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2019. - № 4 (52). - С. 140-147.
86. Conventional and Tfpn Linear Generators for DirectDrive Wave Energy Conversion. Polinder Henk et al. // Ieee transactions on energy conversion. – 2005, june. – Vol. 20. – No. 2
87. Dukhanin V. I. Automotive reciprocating alternator. Design Analysis // International Scientific and Technical Conference of Automotive Engineer's Association "Motor Vehicle and Tractor Industry in Russia: Development Priorities and Manpower Training" Dedicated to the 145 / Anniversary of MGTU 'MAMI' [Moscow State University of Mechanical Engineering]. – Nov.17, 2010.

- 88.ELCUT : Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя / ООО «Тор». — [б. м.] : Издательские решения, 2023. — 290 с. ISBN 978-5-0060-6583-3
- 89.ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.10. - Санкт-Петербург : ООО «ТОР», 2012.
- 90.Henry Jr., Brandhorst W., Peter Jr., Chapman A. New 5kW free-piston Stirling space convertor developments // Science Di-rect, Acta Astronautica 63 (2008), 342 – 347.
- 91.Huang Xuzhen Wang Anpeng, Huang Qian, Ding Xuzhe Long-stroke position detection device and method [Патент]. - Китай, 9 Октябрь 2020 г..
- 92.Kosaka Hidemasa at al. Development of Free Piston Engine Linear Generator System Part 1 – Investigation of Fundamental Characteristics // SAE International, 2014
- 93.Lee Seungho and Kim Won-Jong. Active Suspension Control with Direct-Drive Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Motor – 2009 // American Control Conference, Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA, 2009, June 10 – 12.
- 94.Li Jie Li Guanchun, Cui Peng, Zhou Danfeng, Chen Qiang, Wang Xin Superconducting linear DC motor [Патент]. - Китай, 22 Март 2017 г..
- 95.Pirisi A., Gruosso G., Zich E. R. Novel Modelling Design of 3ph Tubular PM Linear generator for Marine Applications / Politecnico di Milano
- 96.Seung-Jin Kim Jae-Ho Hur, Young-Il Kim, Chi-Myeong Yun, Hosung Jung One-Coil Long-Stroke Permanent Magnetic Actuator Design Applied to Load Breaker Switch for Railway [Журнал] // Applied Sciences. - 2022 г..
- 97.Viet Nam Hoang, Design of Single-Sided Linear Induction Motor, Bachelor of Electrical Engineering Project, School of In-formation Technology and electrical Engineering, University of Queensland, 2003
- 98.Wisuwat Plodpradistha, Study of Tubular Linear Induction Motor for Pneumatic Capsule Pipeline system. Ph.D. Disserta-tion, Department of electrical Engineering, University of Missouri-Columbia, May 2002

99. Xionsong Li, Xiao Liu, Yutong Wang, Shoudao Huang. Design and Parametric Analysis of a Long Stroke Magnetic-gear Flat Linear Machine with Low Material Costs [Журнал]. - [б.м.] : IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2019 г..
100. Zubkov Yu.V., Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Comparison of surface-mounted permanent magnet and interior-mounted permanent magnet starters for gas turbine engines electrical start // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2019. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950010

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А.

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $n_{сл}=4$

№ шага	$\tilde{x}_1, м$	$\tilde{x}_2, Тл$	$\tilde{x}_3, В$	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5, А/м$	$\Delta\Theta, оС$	$y_1(mm), кг$	$y_2(P1), Вт$	$y_3(D*Lk), м^2$	$y_1', о.е.$	$y_2', о.е.$	$y_3', о.е.$	$dy_1, о.е.$	$dy_2, о.е.$	$dy_3, о.е.$	$Y\Sigma, о.е.$
0	0,027	0,300	27,000	4	12000	112,9	0,106	33,6	0,00321	4,35	-0,36	-0,89	0,99	0,24	0,09	0,382
1	0,028	0,301	26,039	4	11869	109,9	0,108	32,3	0,00319	4,22	-0,23	-0,86	0,99	0,28	0,09	0,410
2	0,029	0,302	25,079	4	11738	106,8	0,109	31,1	0,00316	4,07	-0,11	-0,83	0,98	0,33	0,10	0,439
3	0,030	0,303	24,118	4	11607	103,6	0,111	29,9	0,00315	3,91	0,01	-0,81	0,98	0,37	0,11	0,468
4	0,031	0,304	23,158	4	11476	100,4	0,113	28,7	0,00313	3,74	0,13	-0,79	0,98	0,41	0,11	0,498
5	0,033	0,305	22,197	4	11345	97,1	0,114	27,6	0,00312	3,55	0,24	-0,78	0,97	0,46	0,11	0,514
6	0,034	0,306	21,236	4	11214	93,8	0,116	26,5	0,00311	3,36	0,35	-0,76	0,97	0,49	0,12	0,526
7	0,035	0,306	20,276	4	11083	90,5	0,119	25,4	0,00310	3,15	0,46	-0,76	0,96	0,53	0,12	0,536
8	0,036	0,307	19,315	4	10952	87,1	0,121	24,3	0,00310	2,93	0,57	-0,75	0,95	0,57	0,12	0,545
9	0,037	0,308	18,355	4	10821	83,7	0,123	23,3	0,00310	2,69	0,67	-0,75	0,93	0,60	0,12	0,552
10	0,038	0,309	17,394	4	10690	80,3	0,126	22,3	0,00310	2,43	0,77	-0,75	0,92	0,63	0,12	0,556
11	0,039	0,310	16,433	4	10559	76,9	0,128	21,2	0,00310	2,16	0,88	-0,75	0,89	0,66	0,12	0,557
12	0,040	0,311	15,473	4	10428	73,4	0,131	20,2	0,00310	1,87	0,98	-0,75	0,86	0,69	0,12	0,554
13	0,041	0,312	14,512	4	10297	69,9	0,134	19,2	0,00311	1,55	1,08	-0,76	0,81	0,71	0,12	0,546
14	0,042	0,313	13,552	4	10166	66,4	0,138	18,3	0,00311	1,21	1,17	-0,77	0,74	0,73	0,12	0,531
15	0,044	0,314	12,591	4	10035	62,9	0,142	17,3	0,00312	0,85	1,27	-0,78	0,65	0,76	0,11	0,507

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $psl=6$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	$y_1$ (мм), кг	$y_2$ (P1), Вт	$y_3$ (D*Lk), м2	$y_1'$ , о.е.	$y_2'$ , о.е.	$y_3'$ , о.е.	$dy_1$ , о.е.	$dy_2$ , о.е.	$dy_3$ , о.е.	$Y\Sigma$ , о.е.
0	0,027	0,300	27	6	12000	75,6	0,135	22,4	0,00321	1,49	0,76	-0,89	0,80	0,63	0,09	0,504
1	0,027	0,300	27,15	6	12579	84,0	0,127	23,5	0,00304	2,33	0,65	-0,68	0,91	0,59	0,14	0,547
2	0,028	0,300	27,30	6	13159	92,8	0,119	24,5	0,00289	3,10	0,55	-0,49	0,96	0,56	0,20	0,571
3	0,028	0,300	27,45	6	13739	102,2	0,112	25,6	0,00275	3,81	0,44	-0,31	0,98	0,53	0,25	0,573
4	0,029	0,300	27,61	6	14319	112,1	0,105	26,7	0,00262	4,46	0,33	-0,15	0,99	0,49	0,31	0,524
5	0,029	0,301	27,76	6	14899	122,5	0,099	27,8	0,00251	5,06	0,22	-0,01	0,99	0,45	0,36	0,467
6	0,030	0,301	27,91	6	15479	133,6	0,094	28,8	0,00240	5,61	0,12	0,13	1,00	0,41	0,41	0,403
7	0,030	0,301	28,06	6	16059	145,2	0,089	29,9	0,00230	6,13	0,01	0,25	1,00	0,37	0,46	0,334
8	0,030	0,301	28,22	6	16638	157,3	0,084	31,0	0,00221	6,60	-0,10	0,37	1,00	0,33	0,50	0,260
9	0,031	0,301	28,37	6	17218	170,1	0,079	32,1	0,00212	7,05	-0,21	0,47	1,00	0,29	0,54	0,182
10	0,031	0,301	28,52	6	17798	183,5	0,075	33,1	0,00204	7,47	-0,31	0,57	1,00	0,25	0,57	0,100
11	0,032	0,301	28,67	6	18378	197,5	0,071	34,2	0,00197	7,86	-0,42	0,67	1,00	0,22	0,60	0,015
12	0,032	0,301	28,83	6	18958	212,1	0,068	35,3	0,00190	8,23	-0,53	0,75	1,00	0,18	0,62	-0,073
13	0,032	0,301	28,98	6	19538	227,4	0,064	36,4	0,00183	8,58	-0,64	0,84	1,00	0,15	0,65	-0,164
14	0,033	0,302	29,13	6	20118	243,3	0,061	37,5	0,00177	8,90	-0,75	0,91	1,00	0,12	0,67	-0,258
15	0,033	0,302	29,28	6	20697	259,9	0,058	38,6	0,00171	9,21	-0,86	0,98	1,00	0,09	0,69	0,000

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $n_{сл}=8$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	y1(mm), кг	y2(P1), Вт	y3(D*Lk), м2	y1', о.е.	y2', о.е.	y3', о.е.	dy1, о.е.	dy2, о.е.	dy3, о.е.	YΣ, о.е.
0	0,027	0,300	27,0	8	12000	57,0	0,160	16,8	0,00321	-0,98	1,32	-0,89	0,07	0,77	0,09	0,3081
1	0,027	0,300	27,1	8	12584	63,3	0,149	17,6	0,00304	0,09	1,24	-0,68	0,40	0,75	0,14	0,4300
2	0,028	0,300	27,3	8	13168	70,0	0,139	18,4	0,00289	1,07	1,16	-0,49	0,71	0,73	0,20	0,5451
3	0,028	0,300	27,4	8	13752	77,0	0,130	19,2	0,00275	1,96	1,08	-0,32	0,87	0,71	0,25	0,6112
4	0,029	0,300	27,6	8	14336	84,5	0,122	20,0	0,00263	2,78	1,00	-0,16	0,94	0,69	0,31	0,6470
5	0,029	0,301	27,7	8	14919	92,4	0,115	20,9	0,00251	3,53	0,91	-0,01	0,97	0,67	0,36	0,6682
6	0,029	0,301	27,9	8	15503	100,8	0,108	21,7	0,00240	4,23	0,83	0,12	0,99	0,65	0,41	0,6767
7	0,030	0,301	28,0	8	16087	109,5	0,101	22,5	0,00230	4,88	0,75	0,25	0,99	0,62	0,46	0,6255
8	0,030	0,301	28,2	8	16671	118,7	0,095	23,3	0,00221	5,49	0,67	0,36	1,00	0,60	0,50	0,5672
9	0,030	0,301	28,3	8	17255	128,3	0,089	24,1	0,00213	6,05	0,59	0,47	1,00	0,57	0,53	0,5030
10	0,031	0,301	28,5	8	17839	138,4	0,084	25,0	0,00205	6,58	0,50	0,57	1,00	0,55	0,57	0,4336
11	0,031	0,301	28,6	8	18423	149,0	0,079	25,8	0,00197	7,07	0,42	0,66	1,00	0,52	0,60	0,3596
12	0,032	0,301	28,8	8	19007	160,0	0,075	26,6	0,00190	7,54	0,34	0,75	1,00	0,49	0,62	0,2817
13	0,032	0,301	28,9	8	19591	171,5	0,070	27,4	0,00184	7,98	0,26	0,83	1,00	0,46	0,65	0,2001
14	0,032	0,301	29,1	8	20175	183,5	0,066	28,2	0,00177	8,39	0,18	0,91	1,00	0,43	0,67	0,0000
15	0,033	0,302	29,2	8	20758	196,0	0,062	29,1	0,00172	8,78	0,09	0,98	1,00	0,40	0,69	0,0000

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $psl=10$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	$y_1$ (мм), кг	$y_2$ (P1), Вт	$y_3$ (D*Lk), м2	$y_1'$ , о.е.	$y_2'$ , о.е.	$y_3'$ , о.е.	$dy_1$ , о.е.	$dy_2$ , о.е.	$dy_3$ , о.е.	$Y\Sigma$ , о.е.
0	0,027	0,300	27,0	10	12000	45,8	0,180	13,4	0,00321	-3,03	1,66	-0,89	0,00	0,83	0,09	0,305
1	0,027	0,300	26,9	10	12344	48,7	0,172	13,8	0,00310	-2,24	1,62	-0,75	0,00	0,82	0,12	0,314
2	0,028	0,301	26,8	10	12689	51,7	0,165	14,1	0,00300	-1,47	1,59	-0,62	0,01	0,82	0,16	0,328
3	0,028	0,301	26,8	10	13033	54,8	0,158	14,4	0,00290	-0,75	1,56	-0,50	0,12	0,81	0,19	0,374
4	0,028	0,301	26,7	10	13378	58,0	0,151	14,7	0,00281	-0,06	1,53	-0,39	0,35	0,81	0,23	0,460
5	0,029	0,302	26,6	10	13722	61,3	0,144	15,0	0,00272	0,60	1,50	-0,28	0,58	0,80	0,27	0,548
6	0,029	0,302	26,5	10	14067	64,7	0,138	15,3	0,00264	1,23	1,47	-0,17	0,75	0,79	0,30	0,615
7	0,030	0,302	26,4	10	14411	68,3	0,132	15,6	0,00256	1,84	1,44	-0,08	0,85	0,79	0,34	0,660
8	0,030	0,303	26,4	10	14756	71,9	0,126	15,9	0,00249	2,42	1,41	0,02	0,91	0,78	0,37	0,690
9	0,030	0,303	26,3	10	15100	75,6	0,120	16,2	0,00242	2,98	1,38	0,10	0,95	0,78	0,41	0,711
10	0,031	0,303	26,2	10	15445	79,5	0,115	16,5	0,00235	3,52	1,35	0,19	0,97	0,77	0,44	0,726
11	0,031	0,304	26,1	10	15789	83,5	0,110	16,8	0,00229	4,03	1,32	0,27	0,98	0,76	0,47	0,738
12	0,031	0,304	26,1	10	16134	87,5	0,105	17,1	0,00223	4,53	1,29	0,34	0,99	0,76	0,49	0,747
13	0,032	0,304	26,0	10	16478	91,7	0,100	17,4	0,00217	5,02	1,26	0,42	0,99	0,75	0,52	0,754
14	0,032	0,304	25,9	10	16823	96,0	0,095	17,7	0,00211	5,48	1,23	0,48	1,00	0,75	0,54	0,761
15	0,033	0,305	25,8	10	17167	100,4	0,091	18,0	0,00206	5,94	1,20	0,55	1,00	0,74	0,56	0,000

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $n_{сл}=12$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	$y_1$ (мм), кг	$y_2$ (P1), Вт	$y_3$ (D*Lk), м2	$y_1'$ , о.е.	$y_2'$ , о.е.	$y_3'$ , о.е.	$dy_1$ , о.е.	$dy_2$ , о.е.	$dy_3$ , о.е.	$Y\Sigma$ , о.е.
0	0,027	0,300	27,0	12	12000	38,3	0,197	11,2	0,00321	-4,69	1,88	-0,89	0,00	0,86	0,09	0,316
1	0,027	0,300	26,9	12	12316	40,5	0,188	11,4	0,00311	-3,83	1,86	-0,76	0,00	0,86	0,12	0,324
2	0,028	0,301	26,9	12	12632	42,8	0,180	11,7	0,00302	-3,02	1,83	-0,65	0,00	0,85	0,15	0,333
3	0,028	0,301	26,8	12	12947	45,2	0,172	11,9	0,00293	-2,24	1,81	-0,54	0,00	0,85	0,18	0,343
4	0,028	0,301	26,8	12	13263	47,6	0,165	12,2	0,00285	-1,49	1,78	-0,43	0,01	0,84	0,21	0,357
5	0,028	0,301	26,7	12	13579	50,1	0,158	12,4	0,00277	-0,77	1,76	-0,33	0,12	0,84	0,25	0,401
6	0,029	0,302	26,6	12	13895	52,7	0,151	12,7	0,00269	-0,08	1,73	-0,24	0,34	0,84	0,28	0,485
7	0,029	0,302	26,6	12	14210	55,3	0,144	12,9	0,00262	0,58	1,71	-0,15	0,57	0,83	0,31	0,573
8	0,029	0,302	26,5	12	14526	58,0	0,138	13,2	0,00255	1,22	1,68	-0,06	0,74	0,83	0,34	0,640
9	0,030	0,302	26,5	12	14842	60,8	0,132	13,4	0,00249	1,83	1,66	0,02	0,85	0,83	0,37	0,684
10	0,030	0,303	26,4	12	15158	63,7	0,126	13,7	0,00242	2,43	1,63	0,10	0,92	0,82	0,40	0,714
11	0,030	0,303	26,4	12	15473	66,6	0,120	13,9	0,00236	3,00	1,61	0,17	0,95	0,82	0,43	0,734
12	0,030	0,303	26,3	12	15789	69,6	0,114	14,1	0,00231	3,55	1,59	0,24	0,97	0,82	0,46	0,748
13	0,031	0,303	26,2	12	16105	72,7	0,109	14,4	0,00225	4,09	1,56	0,31	0,98	0,81	0,48	0,758
14	0,031	0,304	26,2	12	16823	75,9	0,104	14,6	0,00220	4,61	1,54	0,38	0,99	0,81	0,50	0,767
15	0,031	0,304	26,1	12	17167	79,1	0,099	14,8	0,00215	5,11	1,52	0,44	0,99	0,80	0,53	0,000

Крутой спуск по поверхности отклика (обобщённый параметр оптимизации) при  $n_{сл}=14$ 

№ шага	$\tilde{x}_1$ , м	$\tilde{x}_2$ , Тл	$\tilde{x}_3$ , В	$\tilde{x}_4$	$\tilde{x}_5$ , А/м	$\Delta\Theta$ , оС	y1(mm), кг	y2(P1), Вт	y3(D*Lk), м2	y1', о.е.	y2', о.е.	y3', о.е.	dy1, о.е.	dy2, о.е.	dy3, о.е.	YΣ, о.е.
0	0,03	0,30	27,00	14	12000	33,0	0,209	9,6	0,00321	-5,94	2,04	-0,89	0,00	0,88	0,09	0,322
1	0,03	0,30	26,96	14	12281	34,7	0,201	9,8	0,00312	-5,06	2,02	-0,78	0,00	0,88	0,11	0,330
2	0,03	0,30	26,93	14	12563	36,4	0,192	10,0	0,00304	-4,21	2,00	-0,68	0,00	0,87	0,14	0,338
3	0,03	0,30	26,89	14	12844	38,2	0,184	10,2	0,00296	-3,40	1,98	-0,58	0,00	0,87	0,17	0,347
4	0,03	0,30	26,85	14	13125	40,1	0,176	10,4	0,00289	-2,62	1,96	-0,48	0,00	0,87	0,20	0,355
5	0,03	0,30	26,81	14	13407	42,0	0,169	10,6	0,00281	-1,87	1,94	-0,39	0,00	0,87	0,23	0,365
6	0,03	0,30	26,78	14	13688	43,9	0,161	10,8	0,00275	-1,14	1,92	-0,31	0,04	0,86	0,26	0,388
7	0,03	0,30	26,74	14	13970	45,9	0,154	11,0	0,00268	-0,44	1,90	-0,23	0,21	0,86	0,29	0,453
8	0,03	0,30	26,70	14	14251	47,9	0,148	11,1	0,00262	0,24	1,89	-0,15	0,45	0,86	0,31	0,542
9	0,03	0,30	26,66	14	14532	50,0	0,141	11,3	0,00256	0,89	1,87	-0,07	0,66	0,86	0,34	0,621
10	0,03	0,30	26,63	14	14814	52,2	0,135	11,5	0,00250	1,52	1,85	0,00	0,80	0,85	0,37	0,676
11	0,03	0,30	26,59	14	15095	54,4	0,129	11,7	0,00244	2,13	1,83	0,07	0,89	0,85	0,39	0,711
12	0,03	0,30	26,55	14	15376	56,6	0,123	11,9	0,00239	2,73	1,81	0,14	0,94	0,85	0,42	0,735
13	0,03	0,30	26,52	14	15658	58,9	0,117	12,1	0,00234	3,30	1,79	0,20	0,96	0,85	0,44	0,751
14	0,03	0,30	26,48	14	15939	61,3	0,111	12,3	0,00229	3,86	1,77	0,26	0,98	0,84	0,46	0,000
15	0,03	0,30	26,44	14	16220	63,7	0,106	12,5	0,00224	4,41	1,75	0,32	0,99	0,84	0,49	0,000



## Продолжение Приложения Ж

При разработке линейных двигателей на ООО НПО «Штурм» использовались математические модели, методика проектирования и рекомендации по выбору конструктивных схем, изложенные в диссертации.

Использование указанных результатов работы позволило повысить эффективность бортовых электротехнических комплексов за счет снижения их массы и потребляемой мощности. Конкурентоспособность изделий возросла за счет уменьшения массы постоянных магнитов двигателя при сохранении его основных технических характеристик.

Члены комиссии:

Заместитель генерального директора



С.К.Котяков

Начальник КБ№1



Д.С.Ротонос

Главный специалист по САУ и ПЧ



В.А.Кабаков

Начальник сборочного цеха №101



А.О.Конников

## Приложение 3

## Акт использования результатов работы в учебном процессе СамГТУ



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Самарский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

« 10 » 09 2024.

№ 01.13.05/0621

УТВЕРЖДАЮ



директор по учебной работе СамГТУ

д.п.н., профессор

О.В. Юсупова

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024г.

## Акт

Использования результатов диссертационной работы Ратцева Ярослава Алексеевича  
в учебном процессе.

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель декана электротехнического факультета Л.Г. Мигунова, заведующий кафедрой ЭПА А.В. Стариков составили настоящий акт о том, что

программы расчета и оптимизации линейного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами, разработанные Я.А. Ратцевым, используются в курсовом и дипломном проектировании студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Опытный образец линейного двигателя с постоянными магнитами (авторы разработки д.т.н. Ю.А. Макаричев и аспирант Я.А. Ратцев) используется в лабораторных работах по курсу «Специальные электрические машины».

Названные программы и макетный образец, способствуют более полному усвоению передовых технологий в области электромашиностроения студентами старших курсов электротехнического факультета.

Зам. декана ЭТФ

К.т.н., доцент

Заведующий кафедрой ЭПА

Д.т.н., профессор

Л.Г. Мигунова

А.В. Стариков