

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Макаричев Юрий Александрович,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Электромеханика и автомобильное
электрооборудование» Самарского
государственного технического университета

Официальные оппоненты:

Ковалёв Константин Львович,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Электроэнергетические,
электромеханические и биотехнические системы»
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
г. Москва

Вавилов Вячеслав Евгеньевич
доктор технических наук, доцент, директор
передовой инженерной школы «Моторы
будущего»
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и
технологий», г. Уфа

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Южно-Уральский
государственный университет, г. Челябинск

Защита диссертации состоится «25» декабря 2024 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Самарский государственный технический университет".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18), и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://24237706.samgtu.ru>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.377.06
кандидат технических наук, доцент



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

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.

Типы и конструкции линейных двигателей весьма разнообразны и определяются конкретной областью использования: от мощных синхронных электроприводов скважных или плунжерных насосов, до зум-объективов фото и видео аппаратуры, в которых используют пьезоэлектрические микродвигатели. В системах электромеханической подвески автомобилей успешно применяют демпферы с возбуждением от постоянных магнитов, а линейные шаговые двигатели служат в приводах станков. Все типы и модификации линейных машин постоянного и переменного тока имеют существенные различия, которые должны учитываться при создании их математических моделей, расчетных методик и методов исследования.

Степень разработанности темы.

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. Plodradistha.

Однако, существует ряд нерешенных проблем при создании линейных двигателей, которые сдерживают внедрение этих безусловно перспективных электрических машин в некоторых специальных приложениях. Так линейные электромагнитные демпферы систем позиционирования, стабилизации и виброзащиты прецизионных бортовых комплексов кроме обеспечения заданного номинального усилия, должны иметь стабильную силовую характеристику во всем диапазоне рабочего хода якоря, обладать высоким электромагнитным и электромеханическим быстродействием при минимальных значениях габаритов и массы. Так как стоимость постоянных магнитов в большой мере определяет себестоимость всей машины, для обеспечения конкурентных преимуществ двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением должны обеспечивать заданные характеристики при минимальном объеме магнитов. 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 для научных и практических целей.

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.

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

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие **научно-практические задачи**:

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. Оптимизационный расчет линейного двигателя, основанный на современных методах численного моделирования электромагнитных и тепловых полей.

4. Техническая реализация и экспериментальные исследования двигателя с целью верификации теоретических положений диссертации.

Научная новизна работы:

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:

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.

Методы исследований.

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.

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 кругого восхождения по поверхности отклика, позволяющие оптимизировать машину по различным критериям и исходным данным.
4. Результаты экспериментальных исследований двигателя и верификации теоретических положений диссертации.

Научная квалификационная работа на соискание степени кандидата технических наук выполнена в соответствии с паспортом специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» и соответствует направлениям исследований: п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов ... анализ системных... связей... и компьютерное моделирование электротехнических комплексов и систем, включая... электромеханические... преобразователи энергии...», п.2. «Разработка научных основ проектирования... электротехнических комплексов... и их компонентов», п.3. «Оптимизация электротехнических комплексов».

Достоверность 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» (ТЭЕАС 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 7 работ, из них: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 цитируемая в базе Scopus. Общий объем опубликованных работ 3,63 п.л. с авторским вкладом 1,67 п.л.

Личный вклад автора в диссертационное исследование.

Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

Автором разработаны: математическая модель линейного двигателя, отличающаяся учетом функциональных соотношений в беспазовой конструкции якоря и уточненная результатами численного моделирования электромагнитного и теплового полей, алгоритм и программа оптимизационного расчета линейного двигателя на основе метода крутого восхождения по поверхности отклика, позволяющие оптимизировать машину по различным критериям и исходным данным, экспериментальные исследования опытного образца машины.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из: введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и 8 приложений. Общий объем работы – 145 страниц, включая 40 рисунков и 14 таблиц. Библиографический список содержит 100 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе был проведён научно-технический обзор и анализ работ, связанных с системами позиционирования и стабилизации, исследованы материалы, связанные с преобразованием вращательного движения в поступательное, или возвратно-поступательное, и с непосредственным преобразованием электрической энергии в линейное перемещение.

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 (рисунок 1 а) для функционирования системы требуется четыре линейных привода, а во втором (рисунок 1 б), 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.

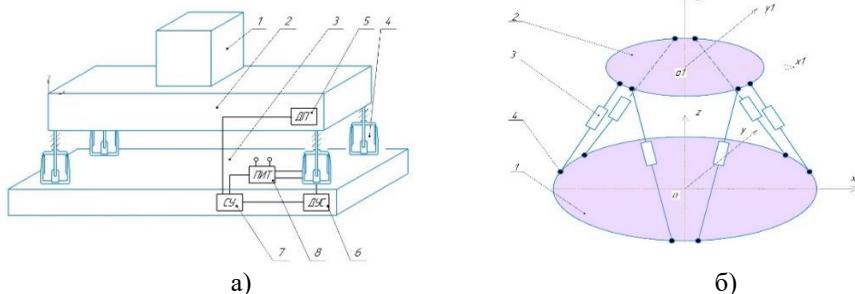


Рисунок 1 – Системы позиционирования и стабилизации оптико-механических комплексов летательных аппаратов. 1 – оптический прибор; 2 – платформа; 3 – основание платформы; 4 – линейный привод; 5 – датчик положения; 6 – датчик ускорения и скорости; 7 – система управления; 8 – источник тока.

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.

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.

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.

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.

По результатам анализа в качестве базового объекта исследования был выбран линейный двигатель постоянного тока (ЛДПТ) с полым якорем и магнитоэлектрическим возбуждением (рисунок 2). Этот тип двигателя отвечает в наиболее полной мере по совокупности параметров основным требованиям к силовому элементу электротехнической системы позиционирования и стабилизации бортового оптико-механического комплекса летательного аппарата.

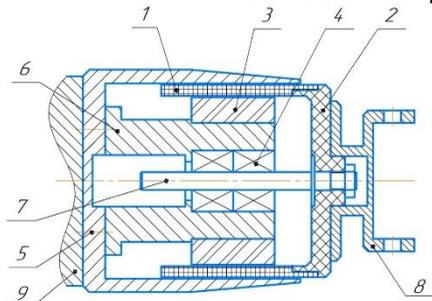


Рисунок 2 - Конструкция линейного двигателя постоянного тока с полым якорем. 1- катушка якоря; 2- основание якоря; 3- магнит; 4- линейный подшипник; 5- наружный магнитопровод; 6- внутренний магнитопровод; 7- шток; 8- крепление исполнительного механизма; 9- основание платформы.

Во второй главе диссертации представлена разработанная автором расчетная математическая модель линейного двигателя постоянного тока 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 оптимизации ЛДПТ.

В классической теории проектирования вращающихся электрических машин главные размеры – диаметр якоря и его расчетная длина, связаны с расчетной мощностью и электромагнитными нагрузками уравнением Арнольда.

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.

Другими исходными параметрами при расчете являются, как правило, значения, определяемые техническим заданием: номинальное напряжение U , V , рабочий ход якоря $l_{рх}$, м, марка постоянных магнитов (ПМ), материалы обмотки и магнитопроводов. Кроме этого в ТЗ могут быть ограничены габариты и потребляемая мощность двигателя. Параметрами ограничителями выступают тепловые нагрузки и некоторые технологические ограничения.

Для ЛДПТ главными размерами являются средний диаметр полого якоря D и длина магнита l_m (рисунок 3).

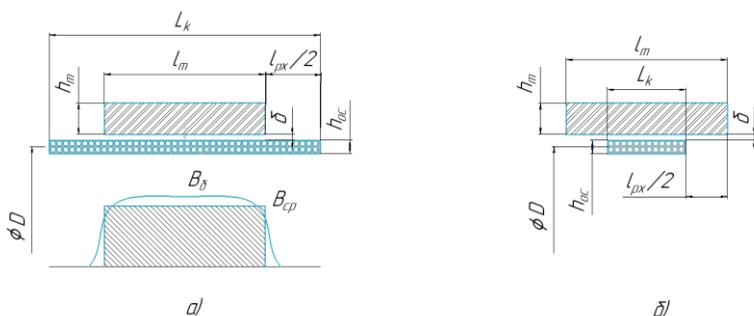


Рисунок 3 – Конструкции активной части ЛДПТ с полым якорем.

а) машина с «длинным» якорем; внизу кривая индукция в зазоре; б) конструкция с «коротким» якорем.

Основное уравнение (1), связывающее усилие, развиваемое якорем с электромагнитными параметрами, было получено из закона Ампера:

$$F = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot I \cdot w_{\text{эф}} \cdot \pi \cdot D, \quad \text{Н} \quad (1)$$

где α_δ – коэффициент полюсного перекрытия, который по аналогии с вращающимися машинами определяется отношением максимальной B_δ и средней индукции B_{cp} в зазоре

$$\alpha_\delta = \frac{B_\delta}{B_{cp}}$$

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 (рисунок 3).

Основное уравнение, связывающее главные размеры двигателя с электромагнитными нагрузками и номинальным усилием, имеет вид (2):

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

$k_{\text{зм}}$ – объёмный коэффициент заполнения меди, A – линейная нагрузка якоря, А/м.

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 были введены понятия радиального и линейного коэффициентов заполнения меди, определяемых соотношениями 4 и 5:

$$k_{\text{рзм}} = \frac{d_{\text{пр}} \cdot n_{\text{сл}}}{h_{oc}}; \quad (3)$$

$$k_{\text{лзм}} = \frac{d_{\text{пр}} \cdot N}{n_{\text{сл}} \cdot L_k}, \quad (4)$$

где $n_{\text{сл}}$ – число слоев обмотки; N – полное число витков обмотки якоря; L_k – полная длина катушки якоря, м.

Соотношение линейных и объёмных коэффициентов заполнения меди должно удовлетворять равенству (5):

$$\frac{k_{\text{лзм}} \cdot k_{\text{рзм}}}{k_{\text{зм}}} = \frac{4}{\pi} \quad (5)$$

Отметим важную особенность полученного выражения для диаметра провода якоря (6). В ЛДПТ с полым якорем провод не может быть выбран, как в традиционных зубцово-пазовых машинах исходя только 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.

$$d_{\text{пр}}^2 = \frac{F \cdot \rho_{\theta} \cdot L_k \cdot k_{\text{лзм}} \cdot k_{\text{рзм}}}{U \cdot B_{\delta} \cdot l_m \cdot k_{\text{зм}} \cdot \alpha_{\delta}}, \text{ м}^2 \quad (6)$$

Величина полезного магнитного потока, сцепленного с током обмотки якоря, определится интегралом (7):

$$\Phi = \pi D \int_0^{l_m} B \cdot dx = \pi D \cdot \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot l_m, \text{ Вб} \quad (7)$$

При допущении линейности кривой размагничивания можно рассчитать требуемую высоту магнитов для обеспечения необходимой максимальной индукции в воздушном зазоре:

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

где B_r – остаточная индукция ПМ, Тл; H_c – коэрцитивная сила магнита, А/м; δ – полный немагнитный зазор, складывающийся из двух воздушных зазоров δ_b и высоты обмоточного слоя h_{oc} .

Математическая модель позволяет рассчитать остальные размеры магнитной цепи, используя методики, традиционные для вращающихся электрических машин.

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 расчёт и математическая модель должны содержать блок расчёта температурного поля машины. Ввиду того, что расчёт нестационарного магнитного поля двигателя с минимальным количеством допущений весьма трудоёмкая задача, которая неоправданно “утяжила” бы алгоритм и программу оптимизации, автором предложено в ходе оптимизации использовать упрощённую методику и математическую модель теплового расчёта, основанную на методе тепловых схем замещения (рисунок 4). Эта методика позволяет рассчитывать средние значения температур отдельных блоков, например, среднюю температуру обмотки или постоянных магнитов. На этапе выбора оптимального варианта расчёт температурного поля проводился по уточнённой методике численного моделирования методом конечных элементов.

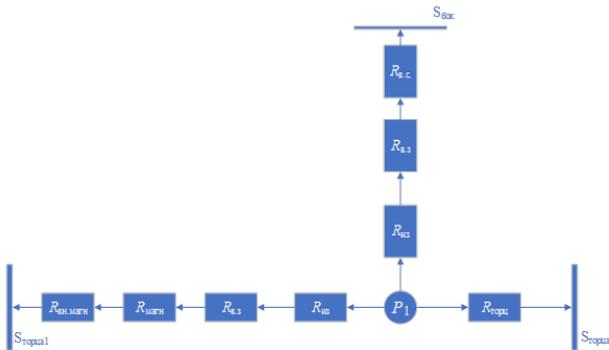


Рисунок 4 -Тепловая схема замещения ЛДПТ.

P_1 – потребляемая двигателем мощность (мощность тепловыделения), Вт; *первая ветвь*: $R_{об}$ – эквивалентное тепловое сопротивление изоляции обмотки; $R_{в,1}$, $R_{в,с}$ – тепловые сопротивления воздушного зазора и внешнего статора; *вторая ветвь*: $R_{магн}$, $R_{вн,магн}$ – тепловые сопротивления магнита и внутреннего магнитопровода; *третья ветвь*: $R_{горч}$ – тепловое сопротивление торца катушки.

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

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 φ . Моделировался установившийся тепловой режим.

Результаты моделирования температурного поля двигателя при этих условиях приведены на рисунке 5 в виде изотерм.

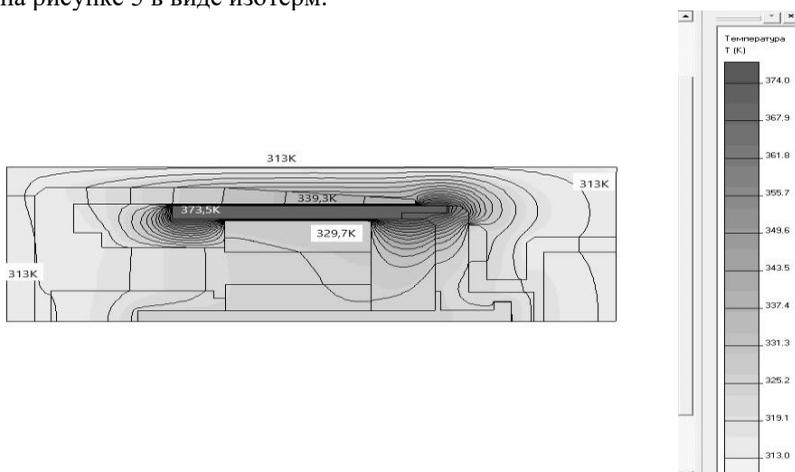


Рисунок 5 - Температурное поле ЛДПТ по результатам моделирования.

Результаты сравнения даны в таблице 1. Расхождение с расчетом методом схем замещения не превышает 5%.

Таблица 1

Температура элементов двигателя

| № | Элемент двигателя | Установившаяся температура, К (°С) | | |
|---|------------------------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| | | По тепловой схеме замещения | МКЭ | Эксперимент, $T_{нач}=313\text{К}$ |
| 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) |

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 и (или) длины магнитов).

Если задачей оптимизации является отыскание экстремума обобщенного критерия, то программа открыта для его вычисления различными методами.

В третьей главе описана постановка задачи и алгоритм выбранного метода оптимизации магнитоэлектрического линейного двигателя постоянного тока для бортового электротехнического комплекса.

Постановка задачи оптимизации заключалась в определении параметра (параметров) оптимизации, выборе варьируемых переменных (факторов), задании ограничений, выборе метода оптимизации и адаптации его к решению поставленной задачи.

Традиционно для бортовых систем летательных аппаратов критериями качества выступают минимумы полетной массы, габаритов, потребляемой мощности и себестоимости.

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 , ($D \cdot L_k$), m^2 - произведение расчетного диаметра якоря на активную длину катушки якоря;
- y_3 , (P_1), Вт - потребляемая мощность при номинальном усилии.

Для построения обобщенного параметра оптимизации ЛДПТ применялась функция желательности Харрингтона. В основе построения этой обобщенной функции лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу предпочтительности.

В настоящем исследовании при оптимизации в качестве ограничителей были заданы:

- максимальный перегрев обмотки якоря;
- перегрев постоянных магнитов;
- превышение индукции во внутреннем магнитопроводе.

Для обоснования выбора метода оптимизации были проведены предварительные исследования двумерных поверхностей отклика для частных параметров.

В качестве примера на рисунках 6, 7 и 8 показаны поверхности отклика и графики зависимости массы магнитов и потребляемой мощности от варьируемых параметров (числа слоев обмотки, индукции в зазоре, линейной нагрузки и т. д.).

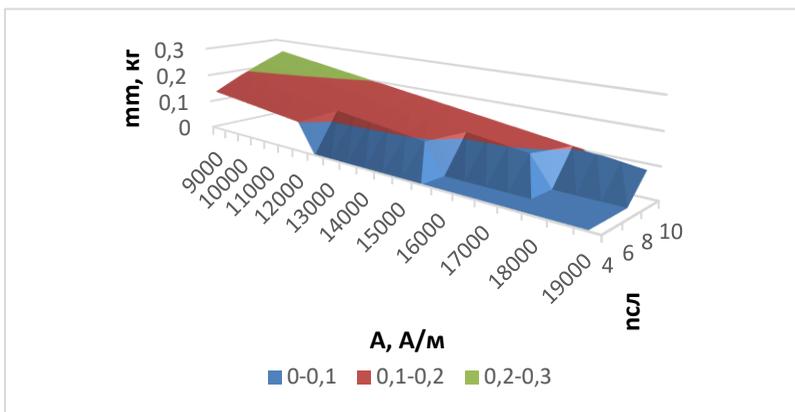
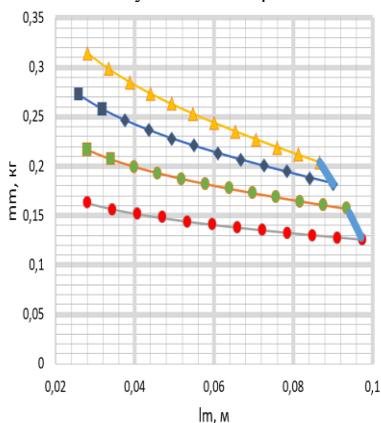
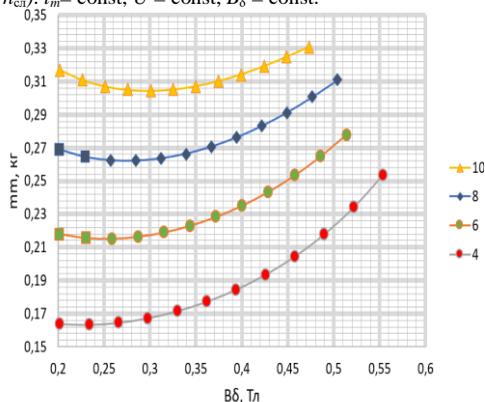


Рисунок 6 – Поверхность отклика $mm = f(A, n_{cl})$. $I_m = \text{const}$, $U = \text{const}$, $B_\delta = \text{const}$.



а)



б)

Рисунок 7 - Зависимости массы магнитов mm от числа слоев обмотки и а) длины магнитов. $A = \text{const}$, $U = \text{const}$, $B_\delta = \text{const}$, б) индукции в зазоре. $A = \text{const}$, $U = \text{const}$, $l_m = \text{const}$.

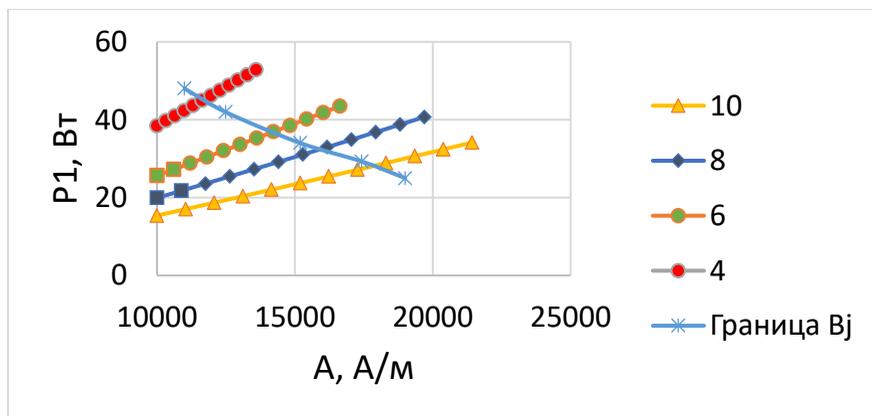


Рисунок 8 - Зависимости потребляемой мощности P_1 от числа слоев обмотки и линейной нагрузки. $B_\delta = \text{const}$, $U = \text{const}$, $l_m = \text{const}$.

Анализ поверхности отклика показывает ожидаемый результат: минимальные значения массы магнитов лежат на границе, определяемой перегревом якоря. Кривые имеют явный минимум в области значений индукции от 0,23 до 0,32 Тл. Исследования поверхностей уровня показали, что оптимальные значения частных параметров:

- 1) ожидаемо не совпадают;
- 2) как правило, лежат на границах ограничений;

Поверхности не содержат «оврагов», «седловых элементов», разрывов и относительно гладкие.

На основании этого, для оптимизации был выбран направленный метод поиска – метод Бокса-Уилсона, заключающийся в проведении численного полного факторного эксперимента и последующего крутого восхождения по поверхности отклика.

В четвертой главе приведены результаты оптимизационного проектирования двигателя и их анализ. Для нахождения компромиссного варианта оптимизации ЛДПТ по нескольким частным параметрам (многокритериальная задача) был предложен алгоритм, заключающийся в сведении её к однокритериальной, путем построения обобщенного параметра оптимизации.

Обобщенный параметр оптимизации Y_{Σ} был сформирован на основе суммы частных параметров в относительных единицах с весовыми коэффициентами α_i :

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{3} \cdot (\alpha_1 \cdot dy_1 + \alpha_2 \cdot dy_2 + \alpha_3 \cdot dy_3) \cdot K_{шт1} \cdot K_{шт2} \quad (9),$$

Перевод размерных частных параметров в безразмерные dy_{ji} осуществлялся по функции Харрингтона (9).

$$dy_{ji} = \exp[-\exp(-y_{ji})]. \quad (10),$$

Коэффициенты весомости α_i , определяется назначением объекта оптимизации и требованиями к его характеристикам. Для того, чтобы Y мог принимать значения от 0 до 1, необходимо выполнение условий:

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

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

где n – число частных параметров.

В описываемом конкретном расчете все коэффициенты были приняты равными 1, но программа допускает использование и других вариантов.

Для превышения температуры якоря коэффициент штрафа рассчитывался по выражению (11):

$$K_{шт1} = \left(1 - \frac{\theta_1 - \theta_{доп}}{\theta_{доп}} \right)^{\alpha}, \quad (11),$$

где θ_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.

$K_{шт2}$ принимает значение 0, при превышении допустимой индукции и 1, если индукция не превышена.

Оптимизационный расчет начинается с реализации полного факторного эксперимента, расчета коэффициентов линейной математической модели и шагов крутого восхождения.

Учитывая, что число слоев обмотки дискретно меняется в ограниченном диапазоне [2...14], эту варьируемую переменную использовать в алгоритме ПФЭ и крутого восхождения практически невозможно. Поэтому ПФЭ проводился для четырех факторов при фиксированном значении числа слоев. Так как исключить фактор ($n_{сл}$) из анализа нельзя ввиду его очевидной значимости, то матрица ПФЭ строилась для каждого значения $n_{сл}$ из диапазона варьирования. Соответственно, в каждом ПФЭ проводилось $2^4=16$ опытов.

Для крутого восхождения по поверхности отклика, были рассчитаны шаги крутого восхождения J_j для каждого фактора. Эти шаги прямо пропорциональны коэффициентам b_j линейной математической модели (12):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k, \quad (12)$$

Коэффициенты линейной математической модели рассчитывались по формуле (13):

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ij} \cdot y_i}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

На рис.9 показан алгоритм оптимизационного расчета ЛДПТ методом Бокса-Уилсона

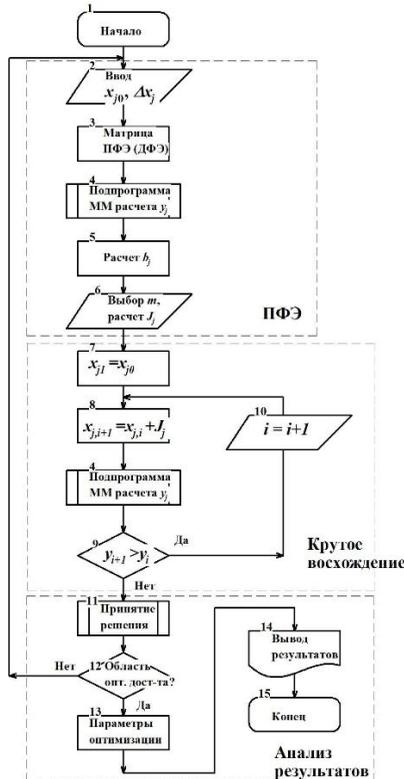


Рисунок 9 - Алгоритм оптимизации ЛДПТ методом Бокса-Уилсона.

На рис. 10 представлены кривые изменения величины обобщенного параметра оптимизации при различных значениях числа слоев обмотки якоря.

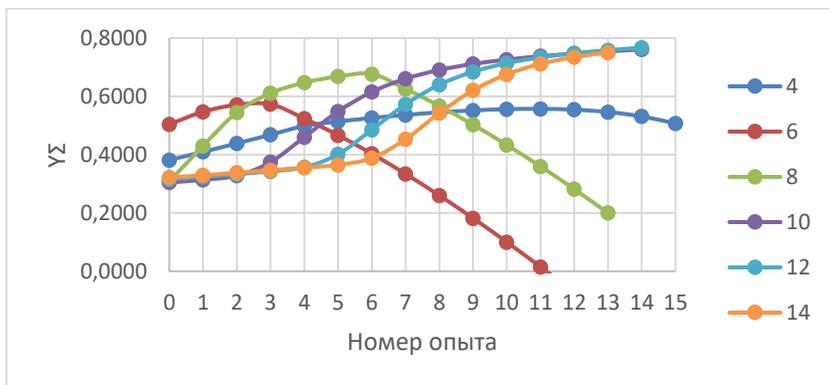


Рисунок 10 - Изменение обобщенного параметра $Y\Sigma$ при различном числе слоёв обмотки.

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

В итоге, для оптимального варианта ЛДПТ значение обобщенного параметра составило $Y=0,767$. Этому варианту соответствуют следующие оптимальные значения варьируемых переменных (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.

Значения оптимальных выходных параметров:

- $m_m = 0,104$, масса магнитов, кг;
- $P_1 = 14,6$, потребляемая, Вт;
- $D = 0,0452$, средний диаметр катушки якоря, м;
- $L_K = 0,0486$, длина катушки, м;

Так как оптимизационный расчет производился по аналитической модели, основанной на ряде допущений, изложенных во второй главе диссертации, то его верификация была проведена уточненным численным методом моделирования электромагнитного и теплового полей. Результаты этих расчетов приведены в главе 5.

В пятой главе диссертационного исследования описаны техническая реализация и экспериментальные исследования опытного образца линейного двигателя.

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 по методике, изложенной во второй главе настоящей работы.

Для определения статических характеристик двигателя был изготовлен стенд (Фото рис.14), позволяющий перемещать и фиксировать положение якоря во всем диапазоне рабочего хода. 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.

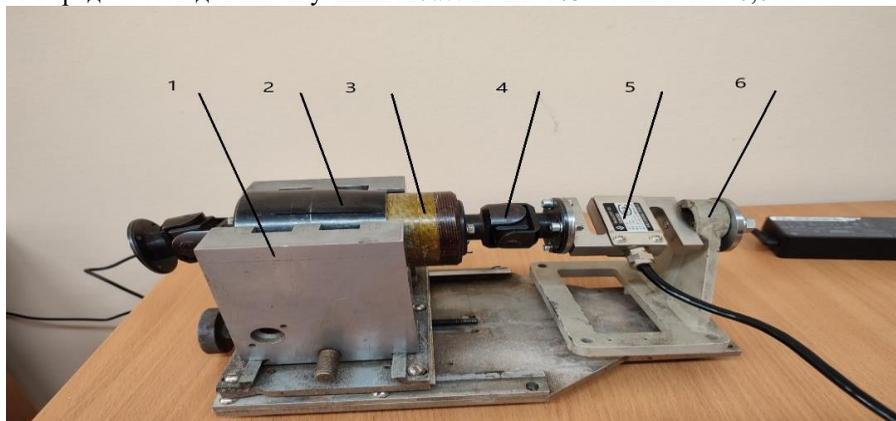


Рисунок 11 – Установка для определения статических характеристик ЛДПТ. 1 – Подвижная опора; 2 – статор; 3 – якорь; 4 – кардан; 5 – датчик усилия; 6 – неподвижная опора.

На рис. 12 приведены результаты эксперимента, где определялись зависимости пондеромоторной силы в функции тока якоря при различных значениях положительного смещения якоря.

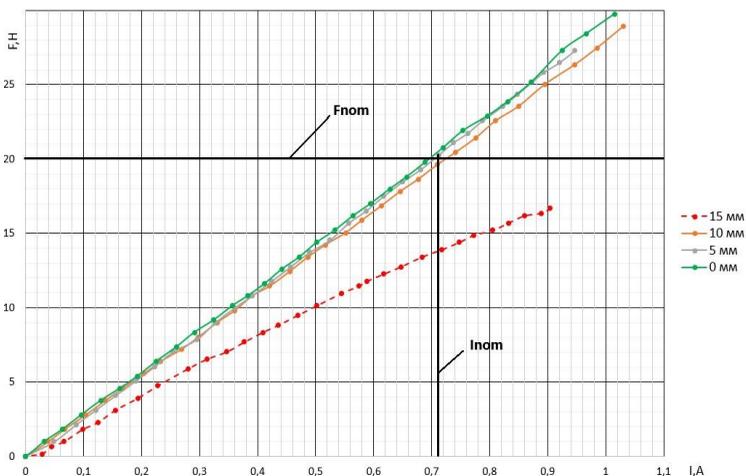


Рисунок 12 – Зависимость электромагнитного усилия от тока при положительном смещении якоря (эксперимент).

Во всех положениях в пределах рабочего хода якоря номинальное усилие обеспечивается. При смещении якоря за пределы рабочего хода усилие существенно ниже требуемого.

Для верификации тепловых расчетов был проведен эксперимент по определению кривых нагрева двигателя при различных значениях тока нагрузки в функции времени. Опыт проводился при температуре окружающей среды (+21°C) без обдува двигателя. Измерение температуры корпуса проводилось пирометром с ценой деления 0,1°C. Графики температуры корпуса представлены на рис.13.

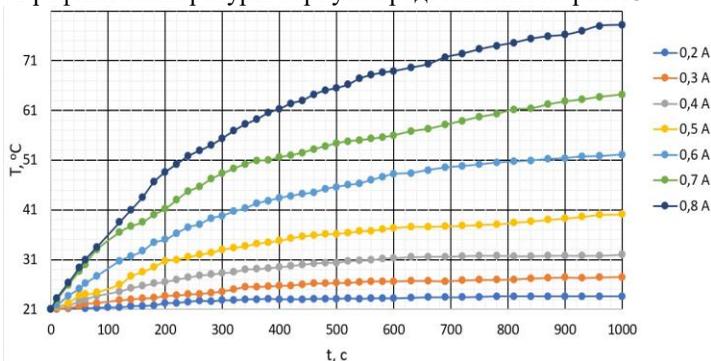


Рисунок 13 – Кривые нагрева корпуса двигателя (эксперимент).

На рис.14 показаны статические силовые характеристики двигателя, полученные по результатам аналитического «инженерного» расчета (1), моделирования МКЭ (2) и эксперимента (3).

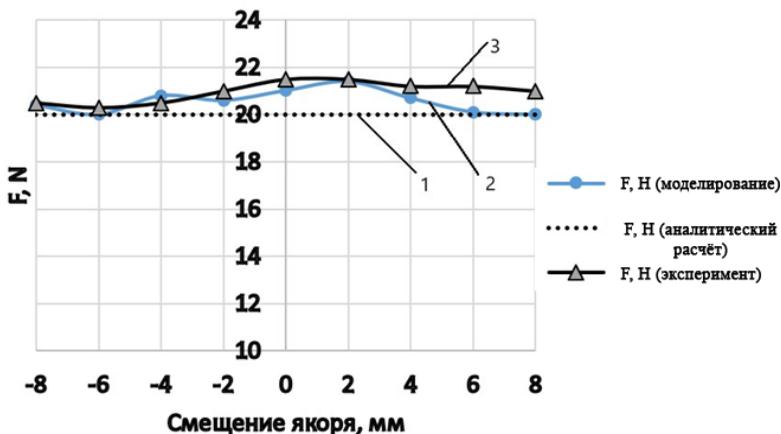


Рисунок 14 – Статические силовые характеристики ЛДПТ.

На рис. 15 приведены габариты прототипа и оптимизированного двигателя, а на диаграммах рис.16 сравнение их выходных параметров.

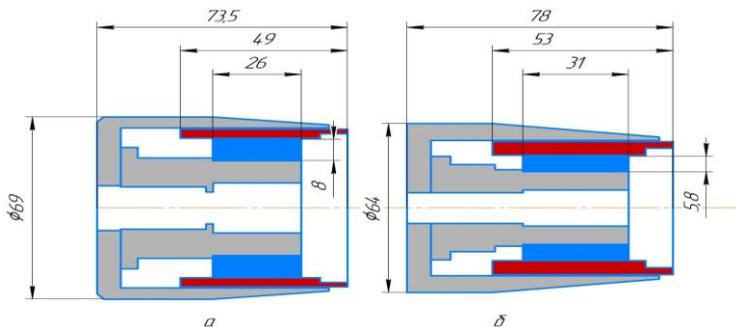


Рисунок 15 – Габариты двигателя ЛДПТ-2 (а) и оптимизированного варианта (б).

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.

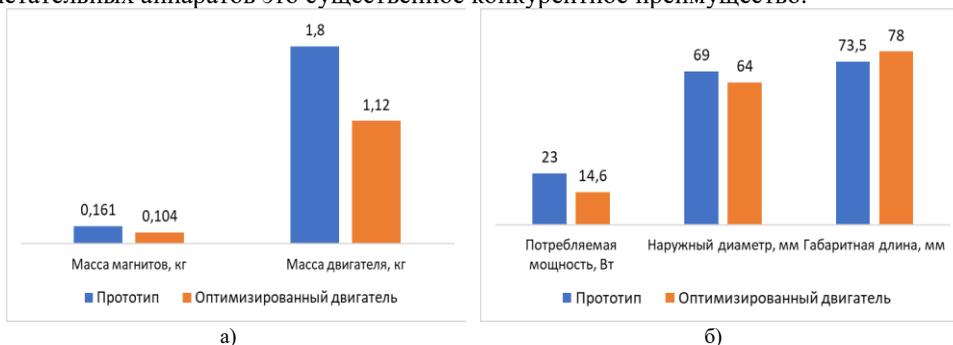


Рисунок 16 – Сравнение оптимизированного двигателя и прототипа по а) массе магнитов и двигателя, б) потребляемой мощности, наружному диаметру и габаритной длине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача создания линейного двигателя постоянного тока с улучшенными 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 вариативную

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 полой 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, которая может быть уменьшена в ходе поперочного расчета МКЭ.

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 круглого 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. Приемочные 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 аналоговых 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

В периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

5. Yu. A. Makarichev, V. N. Kozlovskii, A. S. Saksonov, and **Ya. A. Rattsev** Controlling the Influence of an Asymmetric Air Gap in a Synchronous Electrical Machine on the Unidirectional Attractive Force. ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2023, Vol. 43, No. 8, pp. 1003–1006. © Allerton Press, Inc., 2023. DOI 10.3103/S1068798X23080166

Публикации в других изданиях

6. Макаричев Ю.А., Ратцев Я.А. Математическое моделирование длинноходовых электромагнитов. Материалы XVI международной научно-практической конференции «Наука – промышленности и сервису». ПовГУС, Тольятти. 2021. <https://news.myseldon.com/ru/news/index/262777677> .
7. Макаричев, Ю. А. Сравнение параметров линейного двигателя постоянного тока с медной и алюминиевой обмотками якоря / Ю. А. Макаричев, Я. А. Ратцев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии

(XXII Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 2023 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06 ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол №7 от 22.10.2024 г.)

Заказ № 403. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.