

На правах рукописи



РОГОВА ОЛЬГА ВАЛЕРЬЕВНА

**ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С
УЛУЧШЕННЫМИ ТЯГОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
ДЛЯ ВИБРОКОМПРЕССОРА**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Нейман Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Угаров Геннадий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»

Татевосян Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», доцент кафедры «Электрическая техника»

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чувашская Республика, г. Чебоксары.

Защита состоится «16» февраля 2017 г. в 10⁰⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте <http://www.nstu.ru/>

Автореферат разослан «__» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р. техн. наук., профессор



В.Ю. Нейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Компрессоры объемного принципа действия находят широкое промышленное применение в различных отраслях народного хозяйства: топливной, горнодобывающей, химической, легкой и пищевой промышленности, машиностроении, сельскохозяйственном производстве и т.д. Ежегодно в России осуществляется продажа компрессоров объемного принципа действия на сумму порядка 2 млрд. руб. в год. В настоящее время рынок компрессорного оборудования представлен большим количеством моделей как промышленного, так и бытового назначения. Маломощные компрессоры с давлением до 10 атм. находят широкое применение на станциях техобслуживания автотранспортных средств, в бытовом холодильном и медицинском оборудовании, системах кондиционирования воздуха, аэрографии, строительном пневмоинструменте и т.д.

В большинстве современных компрессоров рабочий орган приводится в движение электродвигателями вращательного принципа действия. В данном оборудовании наиболее слабым звеном, наряду с клапанной системой, являются передаточные механизмы, преобразующие вращательное движение двигателя в возвратно-поступательное движение рабочего органа. Поэтому актуальным является разработка конструкций компрессоров, в которых отсутствуют передаточные механизмы. Это возможно при использовании в электроприводе компрессоров вместо двигателей вращательного движения двигателей возвратно-поступательного движения, в частности электромагнитных.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в теорию проектирования, исследования и совершенствования конструкций электромагнитных двигателей внесли Г.К. Ротерс, Б.К. Буль, А.И. Московитин, М.А. Любчик, А.В. Гордон, А.Г. Сливинская, Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.В. Ивашин, Е.М. Тимошенко, Б.Ф. Симонов, В.И. Мошкин, К.М. Усанов, Г.П. Свинцов, В.П. Певчев, В.Ю. Нейман и др.

Использование линейных электромагнитных двигателей (ЛЭМД) для электропривода виброкомпрессоров нашло свое отражение в трудах таких специалистов, как А.И. Смелягин, Н.П. Ряшенцев, А.Н. Мирошниченко, Н.И. Финченко, В.Р. Райс и др.

Наибольшее распространение в 70-80-х годах получили конструкции ЛЭМД с фиксацией конечного положения якоря, позволяющие получать высокие значения тягового усилия. Несмотря на очевидные достоинства данные конструкции не получили массового применения в электроприводе виброкомпрессоров. В первую очередь это было связано с тем, что при неравномерной подаче рабочей среды могли возникать соударения якоря с элементами конструкции двигателя, что снижало надежность устройств.

В настоящее время электропривод электромагнитных компрессоров находится на новом витке развития. Мировая потребность в таких устройствах подтверждается выпуском с 2001 г. компанией LG холодильных компрессоров с линейными электромагнитными двигателями. Однако разработчики данного оборудования так же столкнулись с проблемой соударения элементов конст-

рукции компрессора. Одним из перспективных путей решения данной проблемы является разработка и внедрение двигателей с зубчатыми элементами конструкции магнитной системы, что позволит добиться улучшения тяговых характеристик и безударного режима работы ЛЭМД.

Диссертационное исследование проводилось в рамках выполненной в 2012 г. НИР НГТУ «Силовые устройства электромеханики для технологических виброимпульсных систем с электромагнитным возбуждением».

Цель работы заключается в улучшении тяговых характеристик и массогабаритных показателей линейного электромагнитного двигателя для электропривода виброкомпрессора путем разработки новых конструкций магнитных систем с зубцово-пазовой зоной и методик для их расчета.

Для достижения цели были **поставлены следующие задачи**:

1. Обосновать и разработать новые эффективные конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной для электропривода виброкомпрессора, обеспечивающие получение высоких значений тяговых усилий при малых значениях рабочего хода якоря.

2. Установить степень влияния конструктивного исполнения элементов магнитной системы и соотношений геометрических размеров этой системы на характер распределения магнитного поля и формирование тяговых характеристик на всем интервале рабочего хода якоря.

3. Выполнить поиск и выбор конструкций ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, обеспечивающих получение высоких значений статического тягового усилия при минимальном расходе активных материалов магнитной системы.

4. Разработать методики и выработать рекомендации по расчету рациональных геометрических соотношений ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.

Объект исследования – линейный электромагнитный двигатель с зубцово-пазовой зоной для электропривода виброкомпрессора.

Предмет исследования – методики расчета и конечно-элементные модели ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись основные положения теории магнитного поля, математическое имитационное моделирование магнитного поля методом конечных элементов с использованием стандартного пакета прикладной программы «FEMM». При расчете и анализе математических зависимостей использовался программный пакет «MathCAD». Корректность полученных результатов оценивалась сходимостью результатов аналитических расчетов и конечно-элементного моделирования. Достоверность результатов численного моделирования проверялась путем сопоставления с данными, имеющимися в научной литературе.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработана комбинированная методика расчета магнитной проводимости, представляющая собой сочетание метода вероятных путей потока и результатов конечно-элементного моделирования, позволяющая получать уточненные значения магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой

зоны в широком диапазоне ее геометрических соотношений и положений якоря.

2. Установлена степень влияния конструктивного исполнения и геометрических соотношений элементов магнитной системы с зубцово-пазовой зоной на характер распределения магнитного поля и получаемые значения статического тягового усилия, что позволяет обосновать рациональные конструкции ЛЭМД с улучшенными тяговыми характеристиками.

3. Разработана методика расчета ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, позволяющая осуществлять выбор рациональных геометрических соотношений магнитной системы по критерию максимального тягового усилия в минимальном объеме электромагнитного двигателя.

4. На уровне изобретения предложены новые варианты ЛЭМД с различным конструктивным исполнением зубцово-пазовой зоны элементов магнитной системы для электропривода виброкомпрессора, обеспечивающие повышение его эксплуатационных и технических характеристик. Новизна полученных технических решений защищена патентами РФ на изобретение и полезные модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования магнитного поля ЛЭМД, позволяющие при изменении соотношений геометрических размеров и конструктивного исполнения элементов магнитной системы получать максимальные значения статического тягового усилия и интегральной работы двигателя при минимальном расходе активных материалов.

2. Комбинированная методика расчета магнитной проводимости, представляющая собой сочетание метода вероятных путей потока и результатов конечно-элементного моделирования, позволяющая в диапазоне соотношения размеров $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ получать уточненные значения магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД на всем интервале рабочего хода якоря.

3. Методика расчета ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, позволяющая при выборе рациональных геометрических соотношений двигателя получать конструкции с минимальным расходом активных материалов и максимальными значениями статического тягового усилия.

4. Новые конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной для электропривода виброкомпрессора, обеспечивающие повышение значений тягового усилия, безударную работу и регулировку хода рабочего органа, сопряженного с якорем.

Практическая ценность результатов работы

Даны практические рекомендации по расчету и выбору рациональных геометрических соотношений ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, обеспечивающие получение максимальных значений статического тягового усилия при минимальном расходе активных материалов. Предложены новые варианты конструктивного исполнения ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, оригинальность которых защищена 3 патентами на полезные модели и 1 на изобретение.

Реализация результатов работы

Основные результаты работы были использованы в ходе выполнения

НИР, проводимой в ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ) при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Инв. № 02201258335, а также в учебном процессе в ходе выполнения НИРС и дипломных работ студентов факультета мехатроники и автоматизации ФГБОУ ВО НГТУ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях «Инновационная энергетика 2010» 10-12 ноября 2010 г. (Новосибирск); «Энергоэффективность» 12–13 мая 2010 г. (Омск), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 24-25 февраля 2011 г. (Москва), «Актуальные проблемы энергетике АПК» 24-25 апреля 2011г. и 23-25 апреля 2013г. (Саратов), «Современные техника и технологии» 24-25 ноября 2011 г. и 2014 г. (Томск), «Научный потенциал XXI века. Естественные и технические науки» 2011г. (Ставрополь), «Актуальные проблемы качества и конкурентоспособности товаров и услуг» 22 марта 2013 г. (Набережные Челны), «Актуальные проблемы в машиностроении» 26 марта 2014 г., 25 марта 2015 г. и 30 марта 2016 г. (Новосибирск); научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 3-5 декабря 2010 г. и 29 ноября–2 декабря 2012 г. (Новосибирск); международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электротехнологий» 1-3 июня 2011 г. (Иваново), «Современные проблемы машиностроения» 28 сентября - 02 октября 2011 г. и 11-15 ноября 2013 г. (Томск), «Электромеханические преобразователи энергии» 9-11 октября 2013 г. (Томск), «Будущее технической науки» 2011 г. и 2014 г. (Нижний Новгород); «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» 9-12 июня 2015 г. (Новосибирск); «Автоматизация, энерго- и ресурсосбережение в промышленном производстве» 21 апреля 2016 г. (Стерлитамак); всероссийских научно-технических конференциях «Молодежь и наука» 19-25 апреля 2011 г. (Красноярск) и «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» 4-6 декабря 2013 г. (Томск); дней науки НГТУ 2011-2016 г.г. и на Международном форуме по стратегическим технологиям IFOST-2016 1-3 июня 2016 г. (Новосибирск).

Публикации

Основные научные результаты опубликованы в 18 научных работах, из них 3 – в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в зарубежных журналах, включенных в базу Scopus, 9 – в сборниках трудов конференций, размещенных в базе РИНЦ, 3 патента РФ на полезные модели и 1 на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 172 наименований и 5 приложений. Общий объем составляет 199 страниц машинописного текста, включая 92 рисунка и 15 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, представлены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлены обзор, классификация и основные области применения маломощных компрессоров объемного принципа действия. Предложены новые варианты конструктивного исполнения ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной. Путем сопоставления с данными, имеющимися в научной литературе, подтверждена достоверность результатов численного моделирования ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.

Выполнен ретроспективный патентно-информационный поиск и дан классификационный анализ получивших наибольшее распространение конструкций линейных электромагнитных компрессоров одно- и двухстороннего принципа действия с выявлением путей их дальнейшего развития.

Определены конструкции ЛЭМД, получившие наибольшее распространение в электроприводе электромагнитных компрессоров. Установлены основные причины, по которым рассматриваемые варианты двигателей не получили дальнейшего развития, а именно: низкие максимальные значения тягового усилия и возникновение при увеличении нагрузки соударений якоря с элементами конструкции.

Одним из перспективных путей решения данной проблемы является разработка и внедрение двигателей с зубчатыми элементами конструкций магнитных систем, что позволяет добиться улучшения тяговых характеристик и обеспечения безударного режима

работы ЛЭМД. В подтверждение этого были предложены перспективные варианты ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной (рисунок 1), обеспечивающие получение высоких значений статического тягового усилия при относительно малых значениях рабочего хода якоря. Оригинальность предлагаемых решений защищена патентами РФ № 112722 и № 2526852.

На рисунке 2 представлен вариант виброкомпрессора, в электроприводе которого используется ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной. Компрессор оснащен амортизирующими элементами, обеспечивающими снижение вибраций при работе устройства, а так же ресивером, осуществляющим

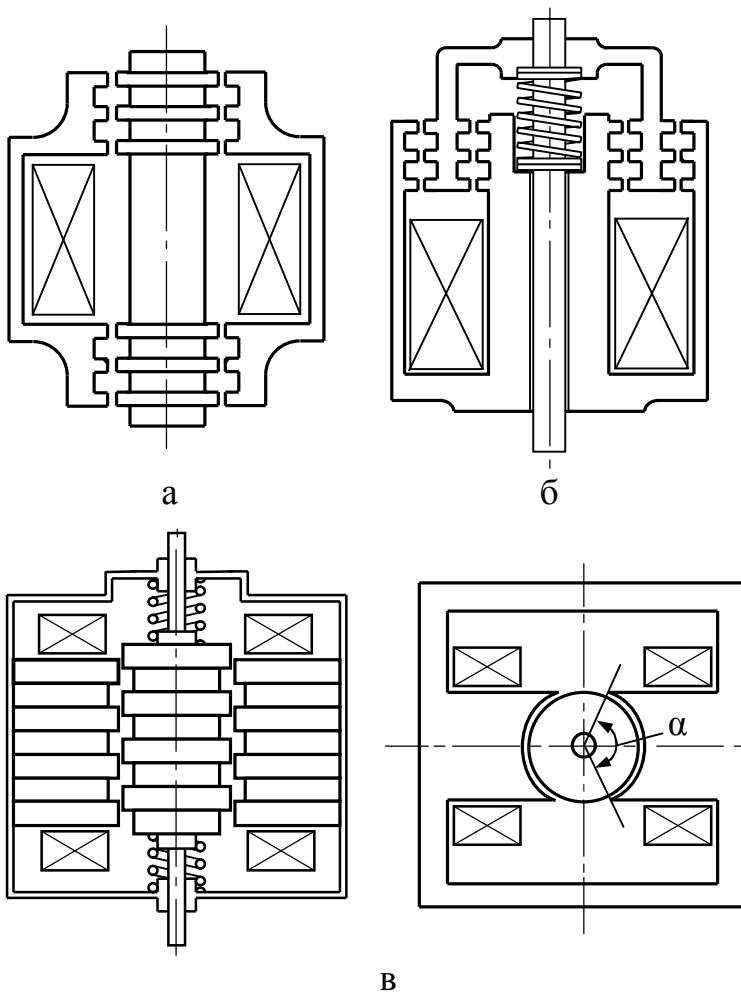


Рисунок 1 – Варианты исполнения ЛЭМД для электропривода виброкомпрессора

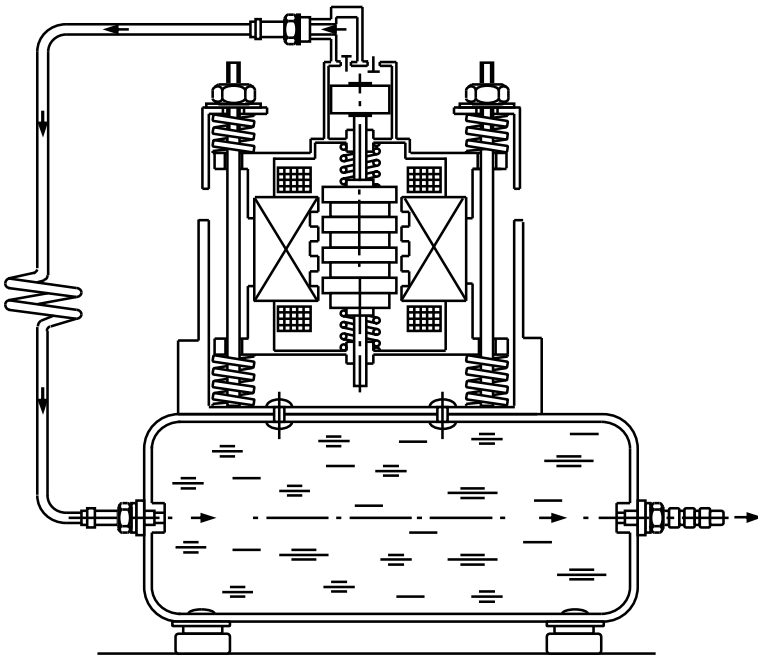


Рисунок 2 – Виброкомпрессор

сглаживание пульсаций давления и демпфирование пиковых нагрузок при работе устройства. На данное конструктивное решение получен патент на полезную модель (Патент РФ № 116916).

Вторая глава диссертации посвящена исследованию магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД. Выполнена развертка цилиндрических вариантов ЛЭМД и дана оценка ее влияния на точность получаемых значений магнитной проводимости. Проведен анализ методик расчета магнитной

проводимости, разработанных для магнитных систем с выраженной зубцово-пазовой зоной и основанных на методе вероятных путей потока.

Установлено, что при эквивалентной замене цилиндрической структуры развернутой структурой, максимальная разница в значениях магнитной проводимости не превышает 6-8%.

При развертке двигателей учитывалось, что в конструкции на рисунке 1, в полюса статора охватывают якорь только частично, а область их взаимодействия определяется углом раскрытия полюсов α и числом пар полюсов z статора. На основании этого было предложено при развертке двигателя использовать корректирующий коэффициент k_1 , учитывающий конструктивное исполнение данного варианта ЛЭМД:

$$k_1 = \frac{1,06 \cdot \alpha \cdot z}{180}, \quad (1)$$

где α – угол раскрытия полюсов статора, z – число пар полюсов статора, 1,06 – коэффициент, учитывающий разницу в значениях магнитной проводимости, полученных при переходе от осесимметричной модели к плоскопараллельной модели в численном эксперименте.

При выполнении конечно-элементного моделирования воздушное пространство зубцово-пазовой зоны ограничивалось полуокружностями с радиусом r (рисунок 3). Значение радиуса r определялось из геометрических соотношений исследуемой зубцово-пазовой зоны магнитной системы: $r = 0,4c$ при $0,4c < b$ и $r = b$ при $0,4c \geq b$.

Установлено, что расхождение между результатами численного эксперимента (кривая $\Lambda_{\text{экс}}$ на рисунке 4) и расчетными значениями магнитной проводимости, полученными по известным методикам достигает: 25-47% по методу вероятных путей потока; 57-70 % по методике Ю.С. Русина, в которой

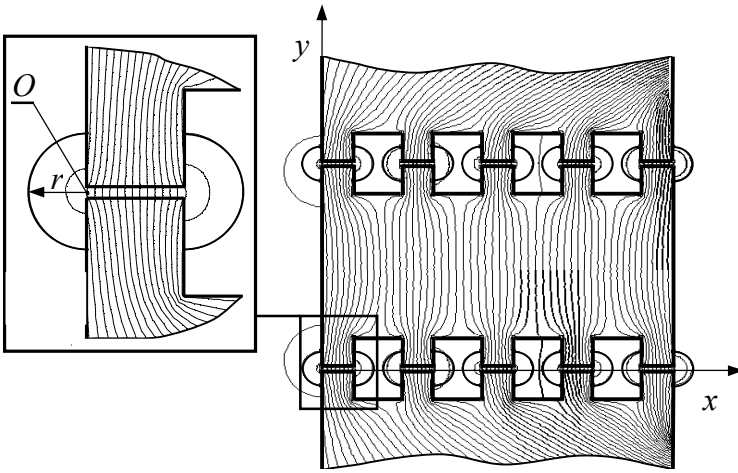


Рисунок 3 – Распределение линий магнитного потока в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД

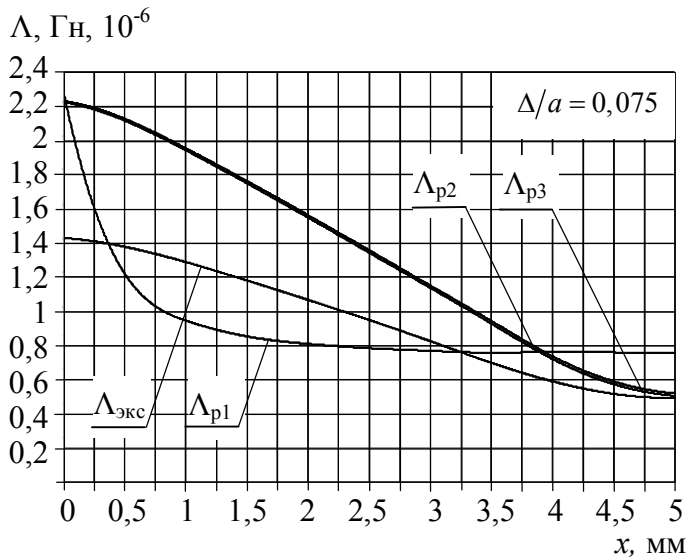


Рисунок 4 – Зависимость магнитной проводимости от смещения x

полуколец, и для уменьшения погрешности необходимо применять поправочные коэффициенты к составляющим магнитной проводимости, определяющим наибольшую долю в ее суммарном значении.

Третья глава диссертации посвящена повышению точности расчета магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД. Даны рекомендации, позволяющие снизить погрешность расчетных значений магнитной проводимости. Предложена комбинированная методика расчета магнитной проводимости, представляющая собой сочетание метода вероятных путей потока и результатов конечно-элементного моделирования.

По результатам численного эксперимента и аналитических расчетов были определены доли составляющих магнитной проводимости в ее суммарном значении $\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \dots + \Lambda_{10}$ (рисунок 5). Составляющие магнитной проводимости определялись согласно методу вероятных путей потока. Расстояние m , согласно рекомендаций Ротерса, принималось равным $\Delta/2$.

предлагается использовать поправочный коэффициент, учитывающий размеры межзубцового расстояния; 35-58% по методике Б.Э. Коца, в которой производится замена фактических боковых стенок зубцов фиктивными с наклоном под определенным углом к горизонтальной оси (кривая Λ_{p1} на рисунке 4); 53-55% по методике, предложенной авторами И.Я. Емельяновым, В.В. Воскобойниковым и др., где расчет магнитной проводимости осуществляется с учетом поправочных коэффициентов, полученных в ходе натуральных экспериментов (Λ_{p2} и Λ_{p3} на рисунке 4).

Анализ известных методик позволил предположить, что значительные расхождения значений магнитной проводимости связаны с тем, что во всех рассматриваемых методиках поправочные коэффициенты вводились для формул, определяемых фигурами в виде полукругов и

Максимальный внешний радиус фигур в виде полуколец был ограничен высотой зубца b .

Конечно-элементное моделирование выполнялось при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны ЛЭМД: $b/a = 1$; $1 \leq c/a \leq 2$; $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$; $l_1/a = 11$, где a – ширина зубца, Δ – технологический воздушный зазор, b – высота зубца, c – межзубцовое расстояние, l_1 – длина зубца (рисунок 6).

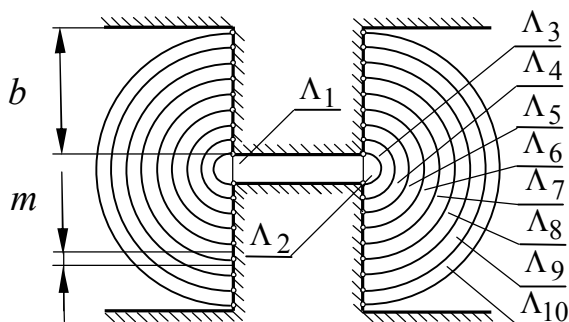


Рисунок 5 – Составляющие магнитной проводимости

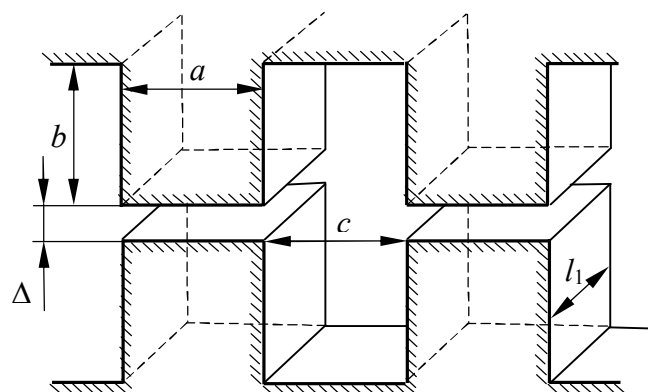


Рисунок 6 – Эскиз зубцово-пазовой зоны

Установлено, что на интервале $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ наибольшая доля в суммарном значении магнитной проводимости Λ_{Σ} приходится на составляющую Λ_1 , определяемую геометрической фигурой в виде призмы: так при конечно-элементном моделировании отношение $\Lambda_1/\Lambda_{\Sigma}$ составляет $0,88 \div 0,73$, а при аналитических расчетах – $\Lambda_1/\Lambda_{\Sigma} = 0,87 \div 0,72$. Выявлено, что изменение значений соотношения c/a в интервале $c/a = 1 \div 2$ не оказывает существенного влияния на значение $\Lambda_1/\Lambda_{\Sigma}$, которое изменяется в пределах 1-3 %.

Установлено, что в диапазоне значений индукции в стали $B_{ст} = 0,15 \div 0,45$ Тл, доли составляющих магнитной проводимости практически не изменяются.

По результатам выполненных исследований применительно к составляющей магнитной проводимости Λ_1 был введен поправочный коэффициент k_2 , учитывающий индукцию в стали, число зубцов n якоря и геометрические размеры зубцово-пазовой зоны ЛЭМД:

$$k_2 = \frac{\Delta \Lambda_{\text{экс}1}}{n l_1 \mu_0 a}, \quad (2)$$

где n – число зубцов, a – ширина зубца, l_1 – длина зубца, Δ – воздушный технологический зазор, $\Lambda_{\text{экс}1}$ – экспериментальное значение составляющей магнитной проводимости Λ_1 , μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

В качестве наглядного примера на рисунке 7 представлены результаты исследования по определению поправочного коэффициента k_2 для значения индукции в стали $B_{ст} = 0,2$ Тл.

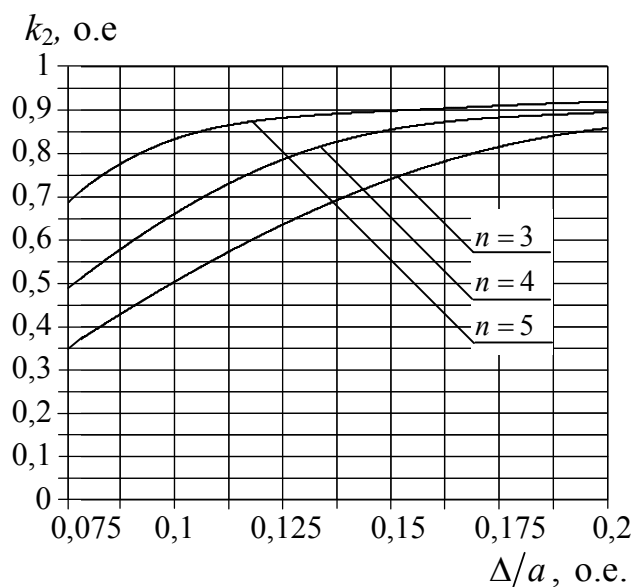


Рисунок 7 – График зависимости значений k_2 от соотношения Δ/a

предлагаемая методика позволяет получать уточненные значения магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны в широком диапазоне ее геометрических соотношений и положений якоря.

Методика заключается в следующем: задаются геометрические размеры зубцово-пазовой зоны ЛЭМД и число зубцов n якоря, на основании которых выбирается значение поправочного коэффициента k_2 и производится расчет магнитной проводимости Λ_Σ по формулам (3) и (4).

Графическое пояснение к комбинированной методике расчета магнитной проводимости представлено на рисунке 8, где числовым обозначениям геометрических фигур соответствуют числовые индексы составляющих магнитной проводимости Λ_Σ в формулах (3) и (4).

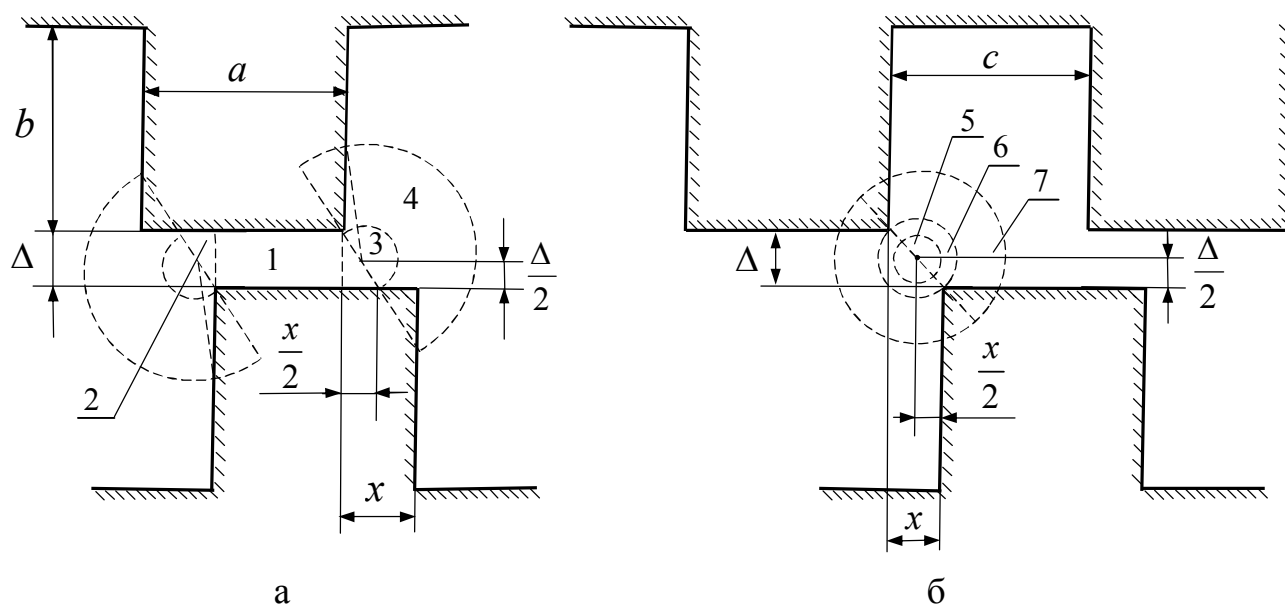


Рисунок 8 – Картина разбивки магнитного поля

Установлено, что в интервале соотношений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости, полученных согласно методу вероятных путей потока с учетом поправочного коэффициента k_2 , не превышает 16-20%.

На основании выполненных исследований была разработана комбинированная методика расчета магнитной проводимости, представляющая собой сочетание метода вероятных путей потока и результатов конечно-элементного моделирования. В отличие от рассмотренных ранее, предлагаемая методика позволяет получать уточненные значения магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны в широком диапазоне ее геометрических соотношений и положений якоря.

Для интервала значений $0 \leq x < a$ (рисунок 8, а) суммарная магнитная проводимость Λ_{Σ} будет определяться как

$$\Lambda_{\Sigma} = n(\Lambda_1 + 2\Lambda_2 + 2\Lambda_3 + 2\Lambda_4) = n l_1 \mu_0 \left(\frac{\left(a - \frac{3}{4}x\right) k_2}{\Delta} + 0,52 + \frac{2}{\pi - \gamma} \ln \left(\frac{0,8c}{\Delta} \right) \right). \quad (3)$$

Для интервала значений $a \leq x \leq \frac{a+c}{2}$ (рисунок 8, б):

$$\Lambda_{\Sigma} = n(2\Lambda_5 + 2\Lambda_6 + 2\Lambda_7) = n l_1 \mu_0 \left(\frac{2}{\frac{\pi}{2} + \alpha + \beta} \times \ln \left(\frac{0,8c}{\Delta} \right) + 0,52 + \frac{2}{\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta} \times \ln \left(\sqrt{\frac{1}{\Delta^2} \left[\frac{k_2}{2} (x - a) \right]^2 + 1} \right) \right), \quad (4)$$

$$\text{где } \gamma = \arccos \frac{\frac{5}{16}x^2 + c\Delta}{c\sqrt{\Delta^2 + \frac{x^2}{4}}}, \quad \alpha = \arccos \sqrt{1 - \frac{\Delta^2}{0,64c^2}}, \quad \beta = \arccos \sqrt{1 - \frac{(x-a)^2}{0,64c^2}}.$$

В качестве наглядного примера на рисунке 9 представлены результаты определения магнитной проводимости для варианта ЛЭМД на рисунке 1, а. Экспериментальные значения магнитной проводимости характеризуют кривые, обозначенные $\Lambda_{\text{экс}}$. Кривые, обозначенные Λ_p и Λ_p^I , характеризуют значения, полученные по предлагаемой методике соответственно без учета и с учетом

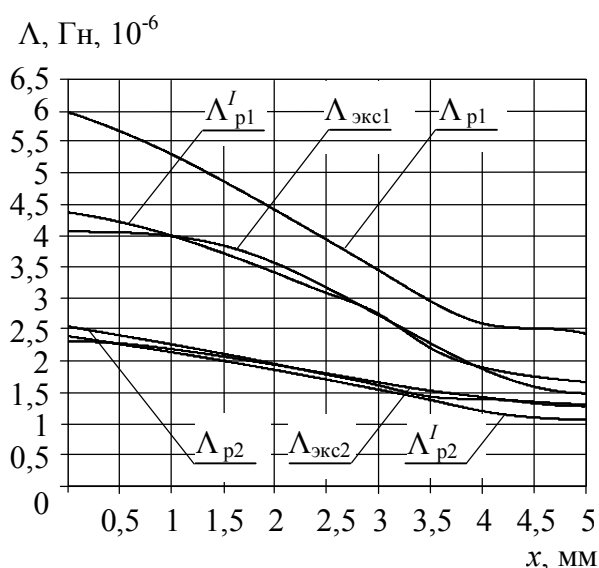


Рисунок 9 – Графики магнитной проводимости

поправочного коэффициента k_2 . Для значения соотношения $\Delta/a = 0,075$ и $\Delta/a = 0,2$ Λ_p и Λ_p^I индексируются цифрами 1 и 2 соответственно.

Установлено, что в интервале значений $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ для варианта ЛЭМД, приведенного на рисунке 1, а, относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости с учетом поправочного коэффициента k_2 не превышает 15%, а без учета k_2 – 35%.

Выявлено, что на участке смещения зубцов $0 < x < a$ производная составляющей магнитной проводимости Λ_1 в 1,5 раза превышает зна-

чение производной магнитной проводимости, характеризующей поле выпучивания. Поэтому с целью уменьшения погрешности расчетных значений магнитной проводимости и ее производной рекомендуется использовать поправочный коэффициент k_2 к составляющей магнитной проводимости Λ_1 и ее производной.

В четвертой главе диссертации выполнен анализ максимальных значений статического тягового усилия и интегральной работы вариантов ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной. Предложена методика расчета и выбора рациональных геометрических соотношений ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, обеспечивающая получение максимальных значений статического тягового усилия при минимальной массе двигателя.

По максимальным значениям статического тягового усилия и интегральной работы из шести вариантов ЛЭМД (рисунок 10) были выбраны варианты с рациональным конструктивным исполнением магнитной системы. Исследование проводилось в интервале значений индукции в стали $B_{ст} = 0,6 \div 2$ Тл.

Установлено, что в диапазоне значений $B_{ст} = 0,6 \div 2$ Тл максимальные значения статического тягового усилия, создаваемые различными вариантами ЛЭМД, достигаются при одних и тех же значениях смещения зубцов якоря относительно зубцов статора.

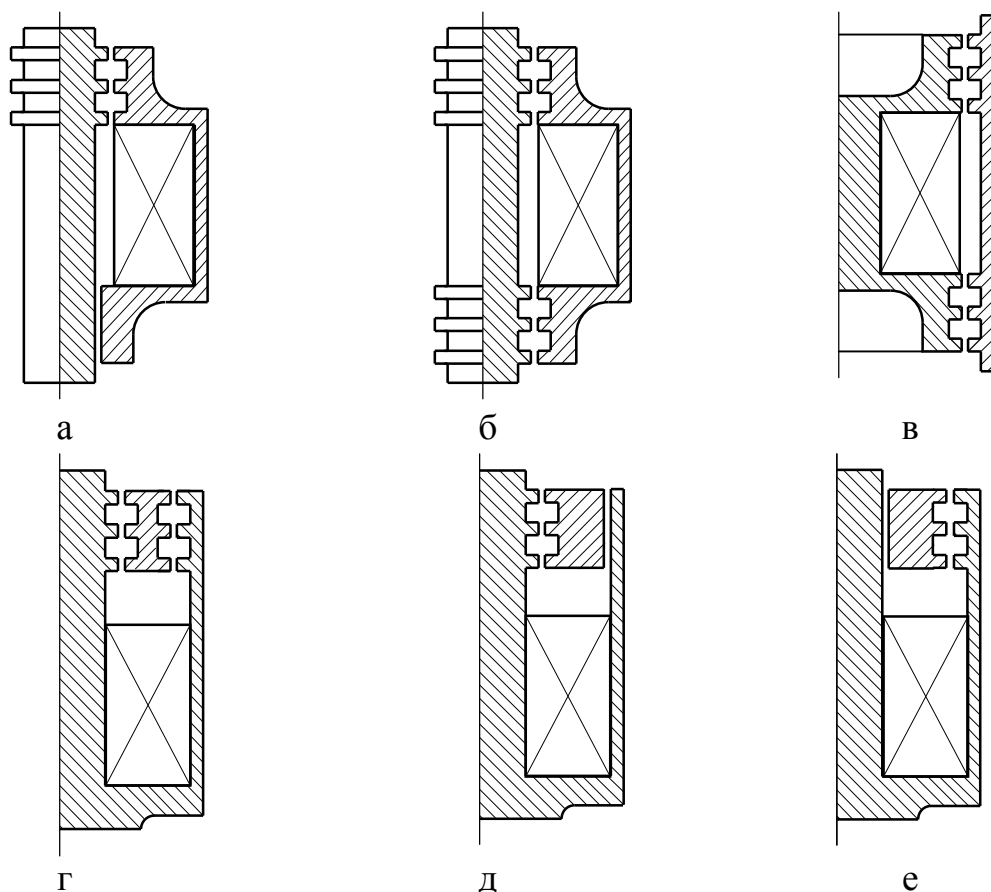


Рисунок 10 – Варианты ЛЭМД

В качестве одного из примеров на рисунке 11 приведены статические тяговые характеристики для значения индукции в стали $B_{ст} = 2$ Тл. Обозначения кривых, представленных на рисунке 11, соответствуют вариантам схем двигателей на рисунке 10.

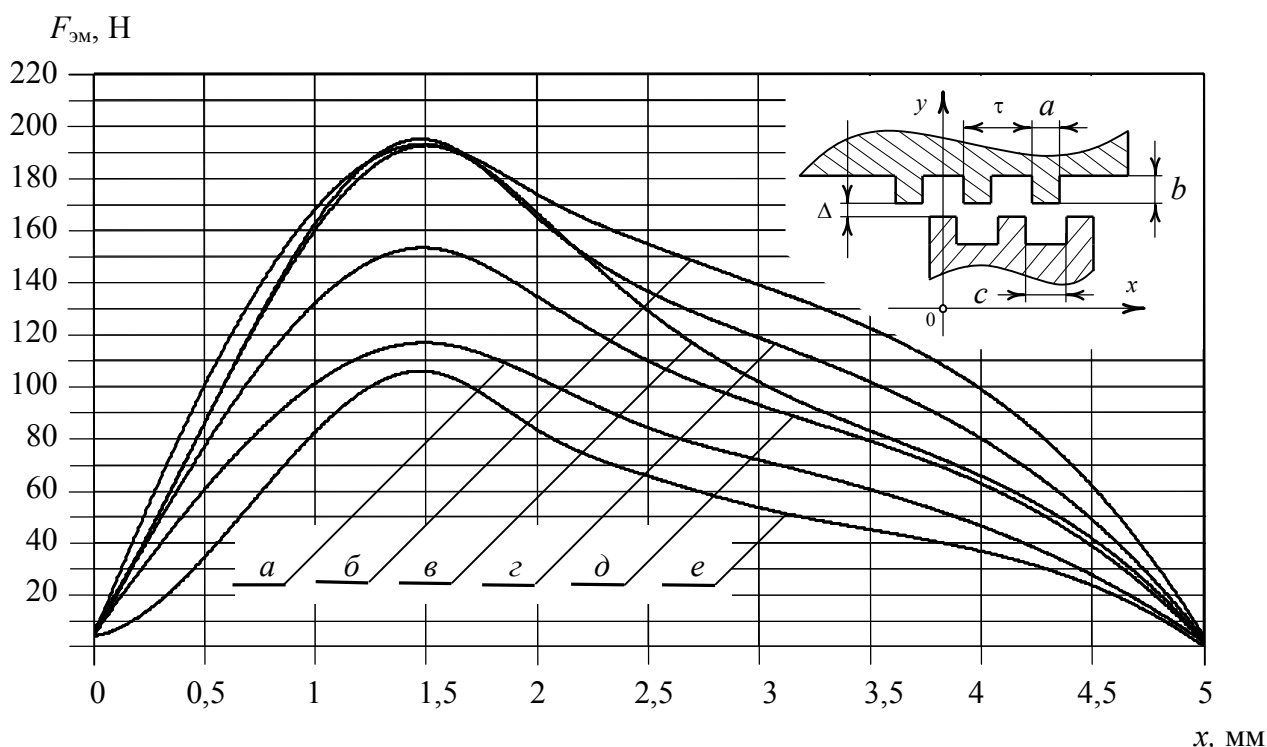


Рисунок 11 – График статических тяговых характеристик вариантов ЛЭМД

Выявлено, что наилучшими показателями обладают варианты ЛЭМД, представленные на рисунке 10, б и рисунке 10, г.

Установлено, что в варианте ЛЭМД на рисунке 10, г наблюдается неравномерность распределения линий магнитного потока в зубцово-пазовой зоне магнитной системы (рисунок 12, а). Для устранения данного недостатка предлагается выполнять зубцово-пазовую зону двигателя в соответствии с рисунком 12, б. Предлагаемое новое конструктивное решение защищено патентом на полезную модель (Патент РФ № 149508).

Выявлено, что при переходе от варианта схемы на рисунке 12, а к варианту схемы на рисунке 12, б происходит повышение максимального значения статического тягового усилия на 12% и значения интегральной работы на 7,5%.

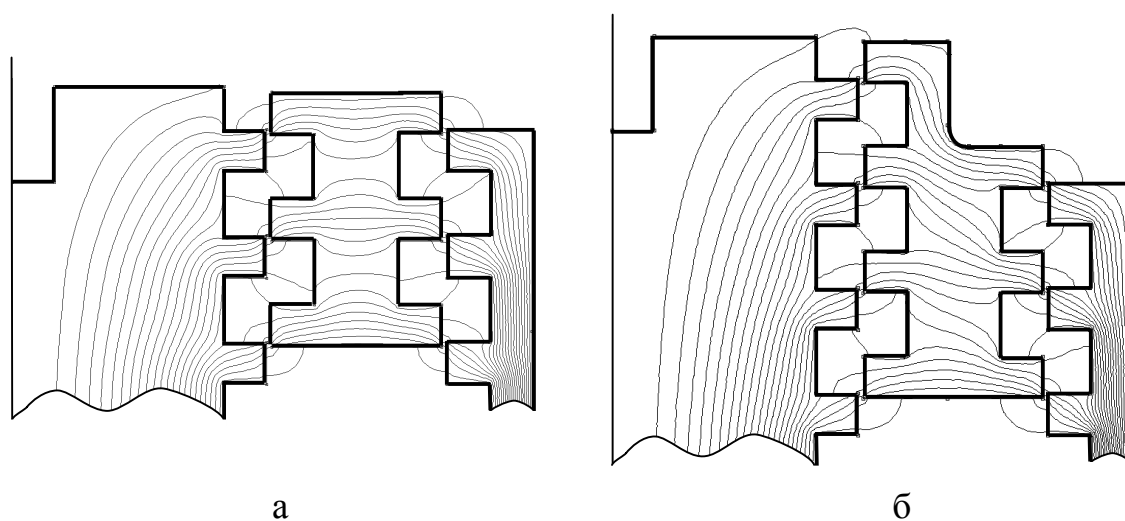


Рисунок 12 – Геометрическая структура и распределение линий магнитного потока в зубцово-пазовых зонах ЛЭМД

Дальнейшие исследования по поиску и выбору рациональных геометрических соотношений ЛЭМД, обеспечивающих получение максимальных значений статического тягового усилия, выполнялись для варианта, представленного на рисунке 10, б.

Для интервала соотношения размеров $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ получены рациональные соотношения размеров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД ($b/a = 1$ и $c/a = 1,25 \div 2$) и рациональное число зубцов n якоря ($n = 4 \div 5$).

При этом максимальные удельные значения статического тягового усилия достигаются при $n = 3 \div 4$.

Следующий этап исследований заключался в разработке методики расчета рациональных геометрических соотношений ЛЭМД, обеспечивающей получение минимальных массогабаритных показателей двигателя при максимальном значении статического тягового усилия.

Методика заключается в следующем. Задаются размерами немагнитной втулки h_1 , длиной окна обмоточного пространства l_3 , числом зубцов n якоря и значениями Δ , a , b , c из рациональных диапазонов соотношений зубцово-пазовой зоны, полученных ранее для интервала $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$.

Затем, исходя из условия равенства сечений элементов магнитопровода, по формулам (5)-(9), представленным ниже, определяются значения геометрических размеров h_2 , h_3 , h_4 , h_5 и l_2 (рисунок 13), которым соответствуют переменные Y_1 , Y_5 , Y_2 , Y_3 , Y_4 .

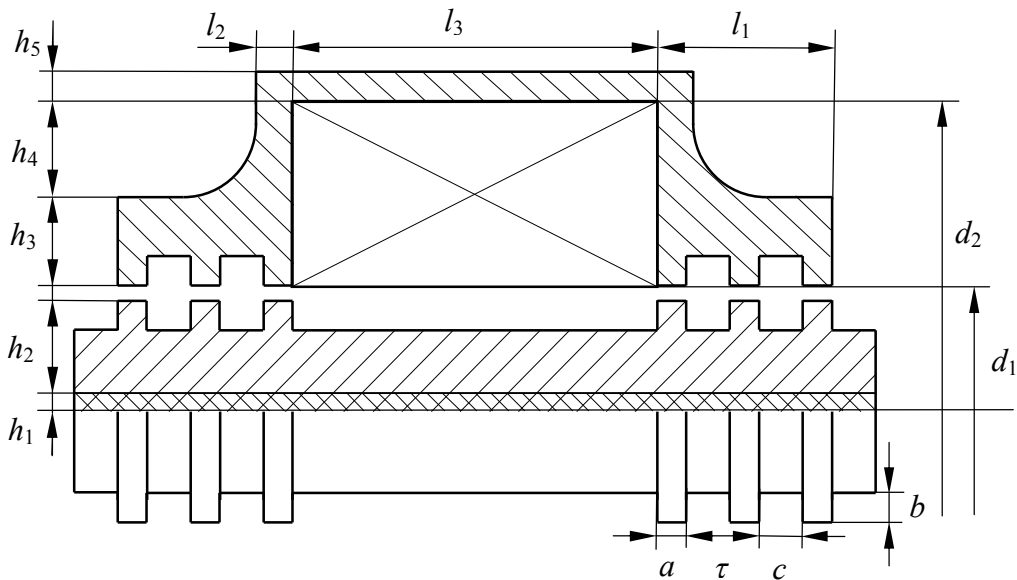


Рисунок 13 – Конструктивная схема ЛЭМД

Таким образом,

$$h_2 = Y_1 = \frac{-(2h_1 - 2b - an)}{2} + \sqrt{\left[\frac{(2h_1 - 2b - an)^2}{4} - (b^2 - 2h_1b - 2anh_1) \right]}; \quad (5)$$

$$h_4 = \bar{Y}_2 = \frac{Y_{2 \max} + Y_{2 \min}}{2}; \quad (6)$$

где \bar{Y}_2 – усредненное значение переменной Y_2 .

$$h_5 = Y_3 = -(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2) + \sqrt{[(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2)^2 + (h_1 + Y_1)^2 - h_1^2]}; \quad (7)$$

$$l_2 = Y_4 = \frac{(h_1 + Y_1)^2 - h_1^2}{2(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5)}; \quad (8)$$

$$h_3 = Y_5 = -(h_1 + h_2 + \Delta) + \sqrt{(h_1 + h_2 + \Delta)^2 + (h_2^2 + 2h_1h_2 + 2b\Delta)}. \quad (9)$$

После нахождения значений переменных $Y_1 - Y_5$ производился расчет массы двигателя M_Σ через массы отдельных элементов конструкции: ярма статора $M_{яс}$, полюса статора $M_{пс}$, полюсного наконечника статора $M_{пн}$, якоря $M_я$, немагнитной втулки $M_в$ и обмотки $M_{об}$:

$$M_\Sigma = M_{яс} + 2M_{пс} + 2M_{пн} + M_я + M_в + M_{об}. \quad (10)$$

Далее переменная Y_2 выражается через массу двигателя M_Σ и максимальное значение статического тягового усилия $F_{э \max}$, которое определяется, как

$$F_{э \max} = \frac{(jk_{3.ок}l_3Y_2)^2}{2} \frac{d\Lambda}{dx}, \quad (11)$$

где j – плотность тока, $k_{3.ок}$ – коэффициент заполнения обмоточного пространства, $d\Lambda/dx$ – производная магнитной проводимости по перемещению якоря x , которая определяется согласно предложенной ранее комбинированной методике расчета.

Затем производится расчет переменной Y_2 в заданном диапазоне значений переменной Y_1 . По найденным зависимостям $Y_2 = f(F_{э}, Y_1)$ и $Y_2 = f(M_\Sigma, Y_1)$ строятся кривые, координаты точек пересечения которых позволяют определить рациональные значения Y_1 и Y_2 , после чего производится уточненный расчет переменных $Y_3 - Y_5$ по формулам (7)-(9).

В качестве примера в таблице 1 представлены результаты расчета ЛЭМД с числом зубцов якоря $n = 2 \div 4$ и следующими геометрическими соотношениями зубцово-пазовой зоны: $b/a = 1$, $c/a = 1,5$, $\Delta/a = 0,125$.

Таблица 1 – Расчетные значения массогабаритных параметров двигателя

Число зубцов, n	$Y_1, 10^{-3} \text{ м}$	$Y_2, 10^{-3} \text{ м}$	$Y_3, 10^{-3} \text{ м}$	$Y_4, 10^{-3} \text{ м}$	$Y_5, 10^{-3} \text{ м}$	Масса, кг
2	19,7	4	6,7	8,1	9,5	1,942
3	22	4	7,4	8,9	10,5	3,053
4	25	4,2	8,3	7,4	11,7	4,748

Максимальная относительная погрешность полученных расчетных значений относительно результатов численного эксперимента не превышает 15%.

Далее для варианта ЛЭМД с геометрическими размерами, приведенными в таблице 1, были определены рациональные геометрические соотношения обмоточного пространства. Оценка проводилась по критерию, определяемому как отношение массы двигателя $M_{\text{дв}}$ к значению максимальной интегральной работы $A_{\text{и}}$. Высота обмоточного пространства определялась по зависимости указанного критерия от значения отношения внутреннего диаметра обмоточного пространства d_1 к внешнему диаметру d_2 при $l_3/d_1 = \text{const}$ (рисунок 13). По полученным зависимостям строились графики и определялись интервалы соотношений d_1/d_2 , обеспечивающие минимальные значения указанного критерия.

Для граничных значений полученного диапазона d_1/d_2 аналогичным образом определялся рациональный ряд значений l_3/d_2 . В качестве наглядного примера на рисунке 14 представлены результаты исследования для числа зубцов якоря $n = 3$. Результаты исследования представлены в таблице 2.

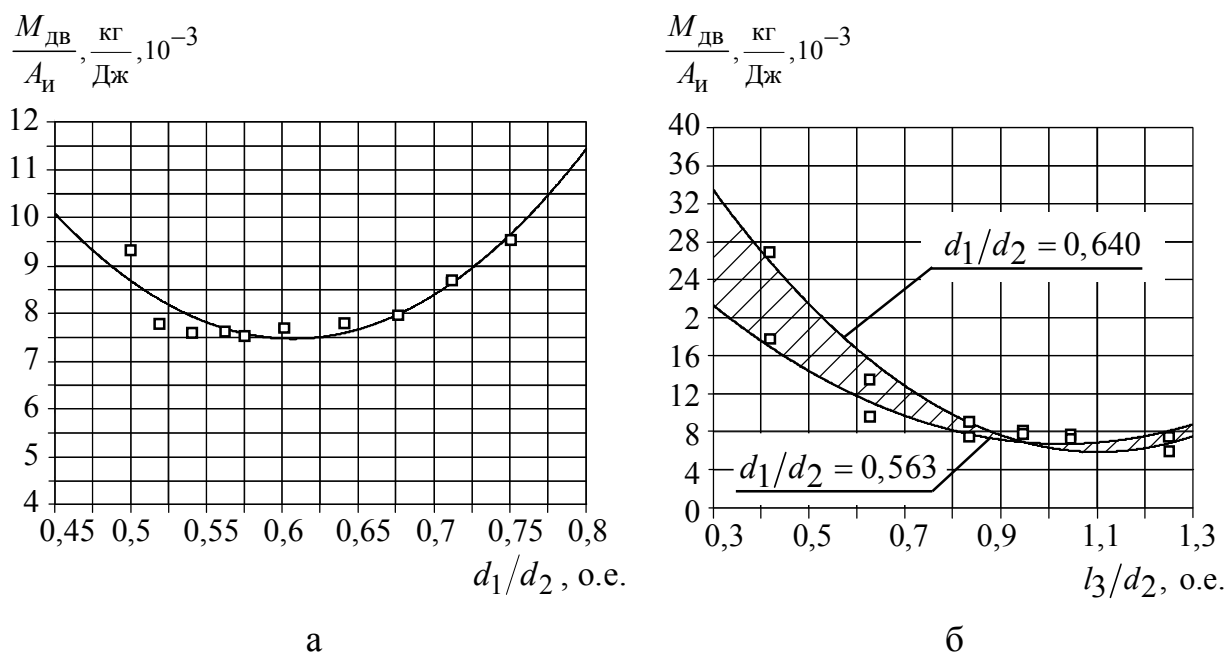


Рисунок 14 – Зависимость $M_{\text{дв}}/A_{\text{и}}$ от соотношений d_1/d_2 и l_3/d_2 при $n = 3$

Таблица 2 – Рациональные соотношения обмоточного пространства ЛЭМД

Число зубцов	d_1/d_2	l_3/d_2	l_3/d_1
2	0,54÷0,64	0,8÷1,2	0,675
3	0,563÷0,64	0,9÷1,2	0,675
4	0,563÷0,659	1÷1,2	0,675

В диссертационной работе также приведено обоснование конструкции виброкомпрессора с ЛЭМД.

Значения основных параметров виброкомпрессора близки к значениям основ-

ных параметров маломощных компрессоров, получивших наибольшее распространение на отечественном рынке. Все приведенные в работе исследования и методики расчета выполнены для новых вариантов ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной и могут быть использованы при их проектировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Выполнен ретроспективный патентно-информационный поиск в области создания ЛЭМД для компрессоров мощностью до 0,5 кВт, на основании которого обоснованы и предложены на уровне изобретения новые конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, позволяющие получать максимальные значения статического тягового усилия при малых значениях рабочего хода якоря и обеспечивающие безударную работу компрессора. Оригинальность полученных технических решений защищена патентами РФ на изобретение и полезные модели.

2. Установлено, что при переходе от цилиндрической конструкции ЛЭМД к развернутой значения магнитной проводимости и статического тягового усилия изменяются в пределах 6-8 %. По результатам конечно-элементного моделирования предложено при развертке ЛЭМД использовать поправочный коэффициент k_1 , учитывающий угол раскрытия полюсов α и число пар полюсов z статора, что позволяет повысить точность получаемых значений магнитной проводимости до 6 %.

3. Определена степень влияния геометрических соотношений размеров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД и индукции в стали на суммарное значение магнитной проводимости и ее отдельных составляющих. Предложен поправочный коэффициент k_2 , применение которого позволяет снизить погрешность расчетных значений магнитной проводимости, полученных методом вероятных путей потока в 1,5-2,4 раза в диапазоне соотношений размеров $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$.

4. Разработана комбинированная методика расчета магнитной проводимости, представляющая собой сочетание метода вероятных путей потока и результатов конечно-элементного моделирования, позволяющая в диапазоне соотношений размеров $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ получать значения магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны с относительной погрешностью не превышающей 15 %.

5. По критериям максимального значения статического тягового усилия и интегральной работы определены конструкции ЛЭМД с рациональным исполнением элементов магнитной системы. На уровне изобретения предложено новое конструктивное исполнение зубцово-пазовой зоны, обеспечивающее повышение максимального значения статического тягового усилия на 12 % и интегральной работы на 8 % по сравнению с известной конструкцией.

6. Определены рациональные геометрические соотношения обмоточного пространства и зубцово-пазовой зоны ЛЭМД для числа зубцов $n = 2 \div 4$, обеспечивающие получение максимальных значений статического тягового усилия и интегральной работы при минимальной массе магнитной системы.

7. Предложена методика расчета ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, позволяющая осуществлять выбор рациональных геометрических соотношений по критерию максимального тягового усилия в минимальном объеме электромагнитного двигателя с относительной погрешностью, не превышающей 15%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов

1. Нейман, В.Ю. Бытовое компрессорное оборудование с линейным электромагнитным двигателем / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2012. - № 2. - С.257-261.

2. Нейман, Л.А. К исследованию тяговых характеристик электромагнитных приводов с учетом зубчатости элементов магнитопровода / Л.А. Нейман, О.В. Рогова // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2013. - № 1. - С. 100-108.

3. Рогова, О.В. Сравнение тяговых характеристик электромагнитных двигателей с двухсторонней зубчатостью якоря / О.В. Рогова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2013. - № 2. - С. 317-320.

Патенты по теме диссертации

4. Пат. 112722, МПК F04B45/00. Электромагнитный компрессор / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова. – № 2011133626/06; Заявлено 10.08.11; Оpub. 20.01.12, Бюл № 2. - 2 с.: ил.

5. Пат. 116916, МПК F04B45/04. Электромагнитный компрессор / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, О.В. Рогова. – № 2011151028/06; Заявлено 14.12.11; Оpub. 10.06.12, Бюл № 16. – 2 с.: ил.

6. Пат. 2526852, H02K33/02, H02K1/06. Электромагнитный двигатель (варианты) / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, О.В. Рогова. – № 2012146808/07; Заявлено 01.11.12; Оpub. 27.08.14, Бюл № 24. – 7 с.: ил.

7. Пат. 149508, H02K33/02. Электромагнитный двигатель / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, О.В. Рогова. – № 2014106191/07; Заявлено 19.02.12; Оpub. 10.01.15, Бюл № 1. – 2 с.: ил.

Прочие публикации

8. Нейман, В.Ю. Линейные электромагнитные компрессоры / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова // Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 92–99.

9. Нейман, В.Ю. О повышении энергоэффективности маломощного компрессорного оборудования / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы 2 междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: СГАУ, 2011. – С. 278–282.

10. Рогова, О.В. К вопросу улучшения тяговых характеристик линейных электромагнитных двигателей с зубчатой структурой магнитопровода / О.В. Рогова // Электромеханические преобразователи энергии: материалы : материалы 6 междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 70-73.

11. Рогова, О.В. Повышение энергоэффективности электромагнитных двигателей с зубчатой системой магнитопровода / О.В. Рогова // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы тр. 19 всерос. науч.-техн. конф. – Томск: Скан, 2013. – Т.1. – С. 143-146.

12. Рогова, О.В. Расчет зубчатых магнитных систем для технологического виброимпульсного оборудования / О.В. Рогова // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 60-62.

13. Рогова, О.В. Расчет магнитной проводимости воздушных зазоров зубчатых магнитных систем / О.В. Рогова // Современная техника и технологии: сб. докл. 20 междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТПУ, 2014. – Т.1. – С. 255-256.

14. Рогова, О.В. К решению задачи повышения точности расчета магнитной проводимости / О.В. Рогова // Современная техника и технологии : сб. докл. 20 междунар. науч.-практ. конф. – Томск: ТПУ, 2014. – Т.1. – С. 257-258.

15. Нейман, В. Ю. Новые типы конструкций линейных электромагнитных устройств для вибрационных технологий / В.Ю. Нейман, Л. А. Нейман, О. В. Рогова // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 260-263.

16. Рогова, О.В. Проектный расчет линейного электромагнитного двигателя с активной зубцово-пазовой зоной для привода виброкомпрессора / О.В. Рогова, В.Ю. Нейман // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 213-219.

17. Rogova, O.V. Electromagnetic Motor with an Active Teeth-Slot Zone for Vibration Technologies / O.V. Rogova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792: Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. – P. 67-72.

18. Neyman V. New Construction Types of a Linear Electromagnetic Motor with the Active Teeth-Slot Zone / V. Neyman, O. Rogova // IFOST 2016: Proceedings of the 11d International Forum on Strategic Technology. – 2016. – Vol. 22 – P. 28-32.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84x1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1695. Подписано в печать 01.12.2016 г.