

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи



Рогова Ольга Валерьевна

ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С УЛУЧШЕННЫМИ
ТЯГОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ВИБРОКОМПРЕССОРА

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Нейман Владимир Юрьевич

Новосибирск – 2016

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕННЫХ РАНЕЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ КОМПРЕССОРОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ.....	11
1.1 Общее состояние вопроса использования маломощного компрессорного оборудования.....	11
1.2 Тенденции в развитии электромагнитных компрессоров различного принципа действия.....	20
1.2.1 Компрессоры одностороннего принципа действия.....	20
1.2.2 Компрессоры двухстороннего принципа действия.....	26
1.3 Системный анализ конструктивных решений электромагнитных компрессоров.....	32
1.4 Направления и перспективы развития конструкций ЛЭМД для электроприводов компрессоров.....	37
1.5 Конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.....	43
1.6 Применение конечно-элементного моделирования в задачах анализа...	49
1.7 Выводы.....	54
2 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ ЗУБЦОВО-ПАЗОВОЙ ЗОНЫ.....	55
2.1 Исследование магнитной проводимости при эквивалентной замене цилиндрической структуры развернутой.....	55
2.2 Применение корректирующего коэффициента в задачах определения магнитной проводимости.....	63
2.3 Сравнение подходов расчета магнитной проводимости, основанных на методе вероятных путей потока.....	68
2.4 Выводы.....	85

3 ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ ЗУБЦОВО-ПАЗОВОЙ ЗОНЫ.....	86
3.1 Исследование и учет фактического влияния геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны при определении магнитной проводимости.....	86
3.1.1 Исследование и учет влияния размеров воздушного технологического зазора при определении магнитной проводимости.....	86
3.1.2 Исследование и учет влияния размеров межзубцового расстояния при определении магнитной проводимости.....	90
3.2 Исследование и анализ влияния геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны на значения производной магнитной проводимости.....	95
3.3 Способ определения поправочного коэффициента для повышения точности расчета магнитной проводимости.....	100
3.4 Разработка комбинированной методики расчета магнитной проводимости.....	105
3.5 Выводы.....	116
4 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЭМД С УЛУЧШЕННЫМИ УДЕЛЬНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ.....	118
4.1 Критерии выбора рациональных конструкций ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.....	118
4.2 Исследование конструктивных схем ЛЭМД с различной конфигурацией зубцово-пазовой зоны по силовым и интегральным критериям оценки.....	121
4.3 Разработка и обоснование новой конфигурации зубцово-пазовой зоны	132
4.4 Результаты поиска и выбора рациональных геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны ЛЭМД по критерию максимальных значений статического тягового усилия.....	138

4.5 Разработка методики расчета и выбора рациональных геометрических соотношений ЛЭМД.....	144
4.6 Результаты анализа и выбора конструкций ЛЭМД с минимальной массой по критерию максимального значения интегральной работы	154
4.7 Обоснование применения новых конструкций ЛЭМД в электроприводе виброкомпрессора	165
4.8 Выводы.....	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	198
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	199

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Компрессоры объемного принципа действия находят широкое промышленное применение в различных отраслях народного хозяйства: топливная, горнодобывающая, химическая, легкая и пищевая промышленности, машиностроение, сельскохозяйственное производство 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 огромным 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 компрессорах 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 специали-

стов, 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 конструкции 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 по-

лучение 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, 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 конструк-

ции 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 энергетики 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 конференция «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. Энергетик» 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); днях 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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕННЫХ РАНЕЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ КОМПРЕССОРОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

1.1 Общее состояние вопроса использования маломощного компрессорного оборудования

На сегодняшний день компрессоры широко используются в таких отраслях народного хозяйства, как топливная, горнодобывающая, химическая, медицинская, легкая и пищевая промышленности, машиностроение, сельскохозяйственное производство, жилищно-коммунальное хозяйство, торговля и общественное питание [1-7].

Компрессор является устройством, предназначенным для повышения давления и перемещения рабочей среды в виде сжатого газа под давлением потребителю [2-4]. Классификация компрессорного оборудования представлена на рисунке 1.1 [2, 6].

В компрессорах динамического принципа действия рабочий процесс осуществляется путем динамического воздействия на непрерывный поток сжимаемого газа и циклического изменения объемов рабочих камер. Данные компрессоры используются только в промышленных масштабах [8].

В компрессорах объемного принципа действия рабочий процесс осуществляется в результате циклического изменения объемов рабочих камер. Сравнительная характеристика данных компрессоров представлена в таблице 1.1 [7-10].

В бытовых устройствах наибольшее распространение получили компрессоры с рабочими органами в виде мембран и поршней.

В поршневых компрессорах изменение объемов рабочих камер осуществляется поршнями, совершающими прямолинейное возвратно-поступательное движение (рисунок 1.2) [4].

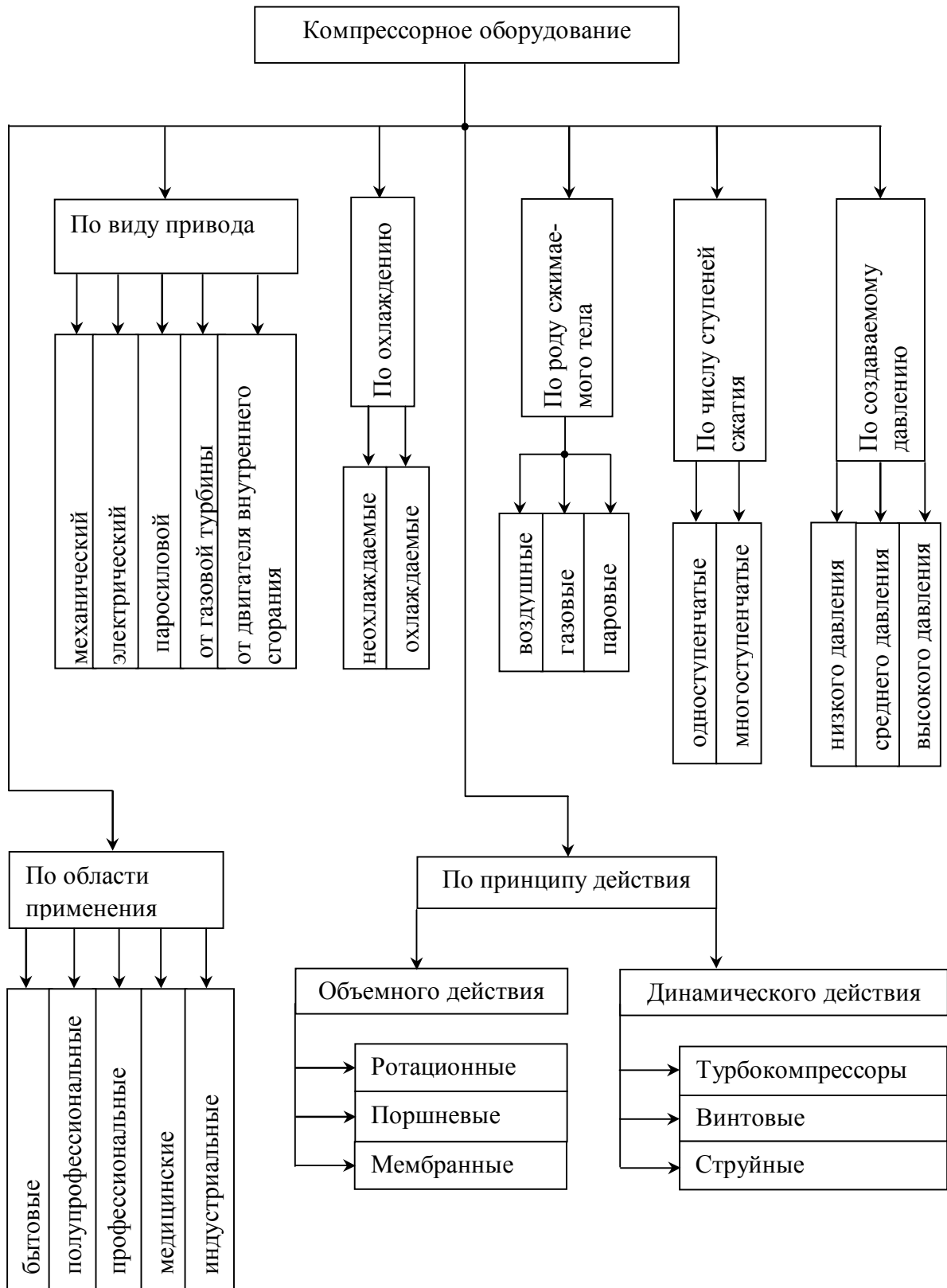


Рисунок 1.1 – Классификация компрессорного оборудования

Таблица 1.1. – Сравнительная характеристика компрессоров объемного принципа действия

Тип компрессора	Условное обозначение	Достоинства	Недостатки
Ротационный		- хорошие массогабаритные показатели.	- низкий ресурс работы и КПД при работе без смазки; - сложность изготовления.
Поршневой		- широкий диапазон производительности; - высокий КПД.	- плохо уравновешен; - низкий ресурс работы клапанов и кольцевого уплотнителя при сжатии газов.
Мембранный		- не загрязняет газовую среду; - слабо чувствителен к роду газа.	- тихоходен; - низкий ресурс непрерывной работы; - низкий КПД.

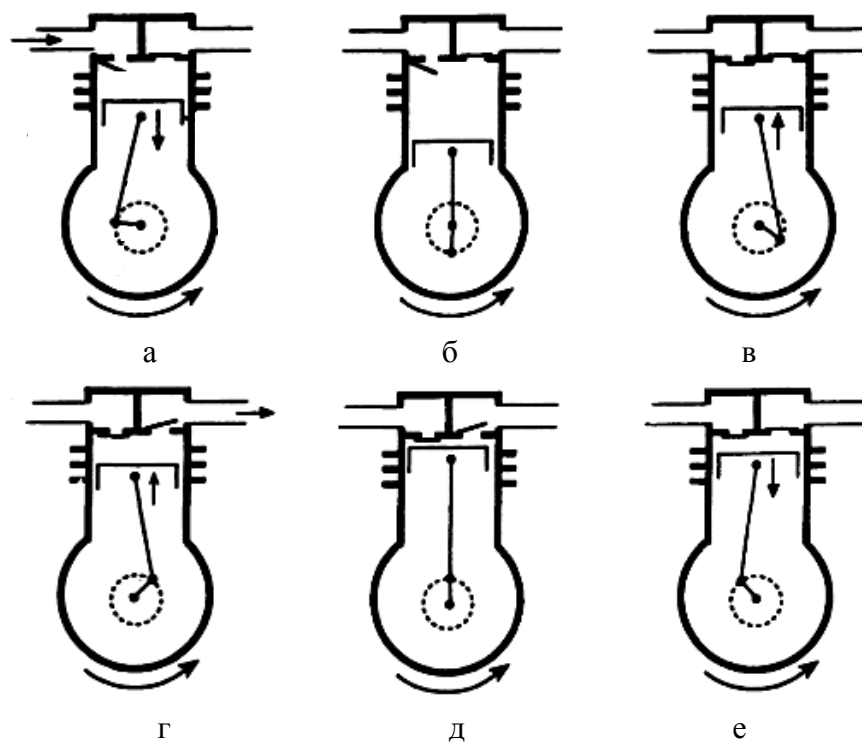


Рисунок 1.2 – Принцип работы поршневого компрессора

Принцип работы поршневого компрессора заключается в следующем: при движении поршня вниз, рабочий объем (объем цилиндра над поршнем) увеличивается, и давление газа в нем падает. Когда давление в цилиндре становится ниже, чем давление в камере всасывания, открывается всасывающий клапан, и сжимаемый газ поступает из трубопровода в цилиндр (рисунок 1.2, а) [11-13]. При этом начнется процесс всасывания, который продолжается до тех пор, пока поршень, достигнув крайнего нижнего положения (нижняя мертвая точка) в цилиндре (рисунок 1.2, б), не начинает движение вверх, при этом рабочий объем цилиндра уменьшается, а давление растет. Как только давление газа в цилиндре начинает превышать давление в камере всасывания, всасывающий клапан закрывается и процесс всасывания заканчивается. Начинается процесс сжатия (рисунок 1.2, в), который происходит до тех пор, пока давление газа в цилиндре не превысит давления в камере нагнетания, в результате чего открывается нагнетательный клапан и начнется процесс нагнетания (рисунок 1.2, г). Однако при этом небольшое количество сжатого газа остается в цилиндре, вследствие того, что при крайнем верхнем положении поршня (верхняя мертвая точка) в цилиндре должен быть зазор между доньшком поршня и клапанной пластинкой, с целью предотвращения соударений (рисунок 1.2, д). Сжатый газ, оставшийся в мертвом объеме, расширяется в цилиндре при последующем движении поршня вниз до тех пор, пока давление в цилиндре, не станет ниже, чем давление газа в области всасывания компрессора (рисунок 1.2, е). После чего цикл повторяется [11-13].

Ресурс работы поршневых компрессоров обусловлен условиями эксплуатации и зависит от надежности и долговечности составляющих его деталей и узлов, что определяется в основном точностью обработки, прочностью и износостойкостью используемых материалов [14].

Наиболее распространенными в бытовой, медицинской и холодильной технике являются поршневые компрессоры с производительностью до 83 л/мин и КПД в пределах 0,7-0,9 [15-16]. Это компрессоры бытового холодильного оборудования; компрессоры стационарных и автомобильных систем кондиционирования; медицинское компрессорное оборудование; компрессоры для строительного

пневмоинструмента и бытовые воздушные компрессоры, предназначенные для аэрографии, подкачки шин автомобилей и т.д.

Мембранные компрессоры, так же как и поршневые относятся к устройствам объемного принципа действия, в которых изменение объемов рабочих камер осуществляется циклически колеблющимися мембранами.

Основным узлом мембранного компрессора является мембранный блок, в котором происходит сжатие газа. Он выполняет функцию цилиндра в компрессоре и при работе полностью изолирует сжимаемый газ от внешних воздействий. Данный тип рабочего органа не требует смазки, поэтому обеспечивает сохранение высокого качества газа. Но наряду с этим мембранные компрессоры имеют ограниченный срок службы мембраны и низкие удельные характеристики, что снижает их рабочий ресурс и долговечность. Так ресурс безотказной работы компрессора составляет 1000-1200 ч [6]. Поэтому совершенствование данных устройств направлено на снижение напряжений в материалах мембран и повышение их долговечности.

Мембранные компрессоры используются в мало- и микрорасходных устройствах для получения сжатого газа давлением не выше 4 атм. при производительности от 0,17 до 12 л/мин. Это аэраторы семян; аквариумные компрессоры; медицинское компрессорное оборудование (например, небулайзеры); бытовые воздушные компрессоры, предназначенные для аэрографии, подкачки шин автомобилей и т.д.

В настоящее время на рынке существует большое разнообразие маломощных компрессоров, которые по ряду параметров условно можно разделить на 5 групп (таблица 1.2).

Для качественной и количественной оценки рассматриваемых параметров с точки зрения потребительского спроса, был проведен опрос [17], результаты которого были сведены в таблицу 1.3. В ходе опроса были так же определены основные области применения маломощного компрессорного оборудования (рисунок 1.3).

Таблица 1.2 – Основные параметры маломощного компрессорного оборудования

Наименование параметра	1 группа	2 группа	3 группа	4 группа	5 группа
Потребляемая мощность, кВт	1-0,5	0,36	0,2	0,1-0,2	0,1-0,17
Производительность, л./мин.	90	35	20	5-10	5-20
Давление, Атм.	7,89	9,74	7,89	6,91-7,89	3,95/6,91
Напряжение, В	220	220	12	12	12
Объем ресивера, л.	-	3(6)	3(6)	-	-
Тип рабочего органа	поршень	поршень	поршень	поршень	мембрана
Стоимость, тыс. руб.	8-9	11-18	5-6	1,5-3,5	0,6-2,5

Таблица 1.3 – Результаты опроса потребителей по основным параметрам компрессорного оборудования

Мощность, кВт	Доля, %	Давление Атм.	Доля, %	Производительность м ³ /мин	Доля, %	Масса, кг	Доля, %
< 0,3	18	1	12	10-30	34	0,3-1	35
0,3-0,6	18	1-3	9	30-50	20	1-2	20
0,6-1	16	3-5	15	50-80	18	2-3	13
1-1,5	20	5-6	15	80-120	12	4-5	10
1,5-3	18	7	12	120-150	10	5-7	19
3-5	4	8	17	150-180	2	8-12	2
5-8	3	9	12	180-200	2	12-18	1
8-12	3	10	8	200-230	2	18-20	0

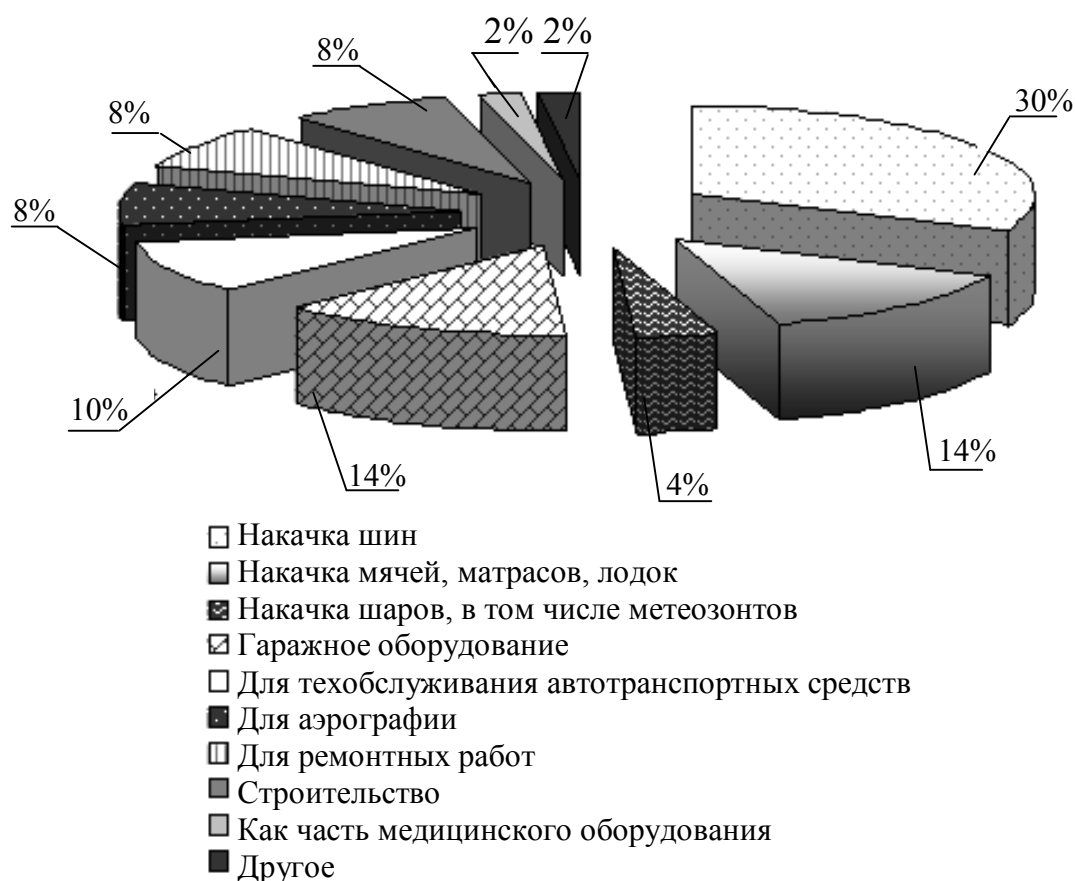


Рисунок 1.3 – Области применения компрессорного оборудования

Установлено, что покупатели при выборе компрессорного оборудования в первую очередь обращают внимание на стоимость, технические и массогабаритные параметры устройства [17]. Следует отметить, что время непрерывной работы компрессора и качество выполнения им основной функции (сжатие газа до установленного давления за определенный промежуток времени) в значительной степени определяется техническими параметрами устройства и безотказной работой двигателя.

В большинстве современных серийно выпускаемых маломощных компрессорах бытового назначения рабочий орган приводится в движение электродвигателями вращательного принципа действия. Например, асинхронные двигатели используются в бытовом холодильном оборудовании, аэрографах и компрессорах для систем кондиционирования воздуха. А коллекторные двигатели – в дентальных, гаражных, автомобильных компрессорах для накачки шин и компрессорах для автомастерских.

Основными требованиями, предъявляемыми к электродвигателям малой мощности, являются высокие энергетические показатели и хорошие пусковые свойства. В некоторых случаях к двигателям малой мощности предъявляются повышенные требования в отношении массогабаритных параметров, надежности, уровня шума и вибраций [18-22].

Компрессоры с вращательным типом двигателя исследованы достаточно хорошо, однако их существенным недостатком является наличие между двигателем и рабочим органом кинематических пар, преобразующих движение из вращательного в возвратно-поступательное. Движение рабочего органа компрессора наиболее оптимально осуществлять без дополнительных передаточных механизмов, за счет его непосредственного сопряжения с двигателем возвратно-поступательного принципа действия.

Использование данных двигателей в компрессорах вместо двигателей вращательного принципа действия так же позволит добиться уменьшения числа пар трения, снижения массогабаритных параметров, повышения энергоэффективности, ремонтпригодности и надежности конструкции в целом. Подтверждением этого является использование линейных электромагнитных двигателей возвратно-поступательного движения в электроприводе холодильных компрессоров, аэраторах семян, аквариумных компрессорах, небулайзерах и т.д. [23-24].

Первые предпосылки к приведению конструкции компрессорного оборудования к наиболее оптимальному виду, с отсутствием передаточных механизмов, можно отметить в начале шестидесятых годов. Например, в [25] предлагается компрессор, принцип действия которого основан на том, что ротор однофазного асинхронного двигателя и связанные с ним рабочие органы в виде поршней осуществляют возвратно-поступательное движение за счет циклического сжатия и нагнетания газа в буферных полостях, расположенных по обе стороны от поршневой системы.

Подобные конструкции, несмотря на простоту изготовления, не получили широкого распространения в виду наличия ряда недостатков: отсутствие системы торможения при подходе поршня к крышке цилиндра и наличие большого вред-

ного пространства, необходимого для образования буфера в виде сжатого газа для предотвращения удара поршня об элементы конструкции. В результате этого происходит снижение КПД компрессора.

В это же время предпринимались попытки к упрощению передаточных механизмов, например, путем изменения конструкции статора асинхронного двигателя в электроприводе компрессора. Это усовершенствование приводит к тому, что магнитное поле совершает сложное движение: равномерное вращение вокруг оси статора и возвратно-поступательное движение вдоль оси вращения, в результате чего ротор и соединенные с ним поршни совершают возвратно-поступательное движение [26].

Со временем, наряду с использованием компрессоров с электродвигателями вращательного принципа действия, начинают появляться конструкции с возвратно-поступательным движением рабочего органа без передаточных механизмов за счет использования, например, электромагнитных, электро- и индукционно-динамических двигателей.

Из значительного количества типов электрических двигателей возвратно-поступательного движения наибольшее распространение в электроприводе мало-мощных компрессоров получили линейные электромагнитные двигатели [27], отличающиеся простотой и компактностью конструкции, высокой надежностью и низкой стоимостью. В связи с возросшим в настоящее время интересом к энергосберегающим технологиям [28-31], в бытовом оборудовании отмечается тенденция применения линейных электромагнитных двигателей в холодильных компрессорах нового поколения, аэраторах семян, аквариумных компрессорах, небулайзерах и других маломощных устройствах [24, 32-34].

Интерес к подобным конструкциям периодически проявляется, о чем, например, свидетельствует промышленный выпуск холодильных компрессоров с линейным электромагнитным двигателем (ЛЭМД) компанией LG, которая в 2001 году первой вывела на рынок линейные электромагнитные компрессоры [33-34]. В настоящее время производством подобных компрессоров так же занимаются такие ведущие мировые компании, как Samsung и Electrolux. Поэтому использо-

вание в электроприводе компрессорного оборудования с ЛЭМД является весьма перспективным, однако, несмотря на кажущуюся простоту, данный тип двигателей обладает рядом особенностей, связанных с нелинейностью свойств используемых магнитных материалов и сложным пространственным распределением магнитных полей.

1.2 Тенденции в развитии электромагнитных компрессоров различного принципа действия

1.2.1 Компрессоры одностороннего принципа действия

Электромагнитные компрессоры по принципу действия делятся на одно- и двухстороннего принципа действия, когда устройство имеет два рабочих органа, совершающих процесс нагнетания газа в обоих направлениях.

Отличительной особенностью компрессоров одностороннего принципа действия является то, что рабочий орган жестко связан через шток с якорем двигателя. За некоторым исключением встречаются шарнирные соединения штока с рабочим органом [35], а также конструкции, где функцию якоря со штоком выполняет ферромагнитная жидкость [36]. Такие устройства отличаются простотой конструкции и в основном используются в качестве микрокомпрессоров, так как они маломощны и не могут создавать на выходе высокое давление.

В качестве рабочих органов электромагнитных компрессоров в основном используются мембраны и поршни.

По количеству катушек наиболее распространенными являются компрессоры с однокатушечными электромагнитными двигателями, так же существует ряд конструкций, относящихся к свободнопоршневым компрессорам с двухкатушечным электромагнитным двигателем.

Например, в [37] представлена конструкция электромагнитного однокатушечного компрессора с рабочими органами в виде поршней. В данном электромагнитном компрессоре (рисунок 1.4) при подаче тока на катушку 1, якорь 2 с

поршнями 4 и 5 втягивается в нее. При этом происходит растяжение пружины 3 и всасывание газа, а при отключении тока – сжатие пружины и нагнетание газа.

Преимуществом данного конструктивного исполнения является то, что с целью устранения заклинивания якоря и поломки рабочего органа, последний выполняется в виде двух поршней, расположенных параллельно по одну сторону от якоря и жестко соединенных с ним. Недостаток конструкции заключается в отсутствии фиксации и регулировки хода рабочего органа, что в процессе работы компрессора при переменных нагрузках может вызывать биение поршня и якоря о корпус компрессора, а это в свою очередь – снижает надежность устройства.

В некоторых поршневых электромагнитных компрессорах рабочий орган и якорь двигателя могут быть совмещенными. Также существует ряд устройств, в которых поршень компрессора имеет каналы для прохода нагнетаемой среды. Например, в [38] описывается компрессор, содержащий электромагнитный двигатель с обмоткой 1 и магнитопроводом 2, цилиндром 3, с размещенным в нем подпружиненным и выполняющим функцию якоря поршнем 4, всасывающими и нагнетающими клапанами 5 и 6 (рисунок 1.5). При этом якорь и поршень двигателя являются совмещенными, что позволяет снизить материалоемкость конструкции. Но наряду с этим свободнопоршневые электромагнитные компрессоры обладают существенным недостатком – усложняется процесс торможения якоря-поршня.

С целью предотвращения удара поршня о крышку цилиндра чаще всего применяется система упругих элементов, но в таком случае создается дополнительное вредное пространство, в результате чего снижается производительность компрессора.

Функцию торможения так же может выполнять рабочая среда, с этой целью в продольном сечении якоря-поршня выполняется канал, по которому рабочая среда через нагнетательный клапан попадает в цилиндр. Подобные конструкции нашли свое отражение в иностранных патентных документах, например, в патенте США [39] описывается однокатушечный электромагнитный компрессор, в котором поршень движется по направляющему полуму валу, благодаря чему происходит четкое позиционирование рабочего органа во время работы устройства.

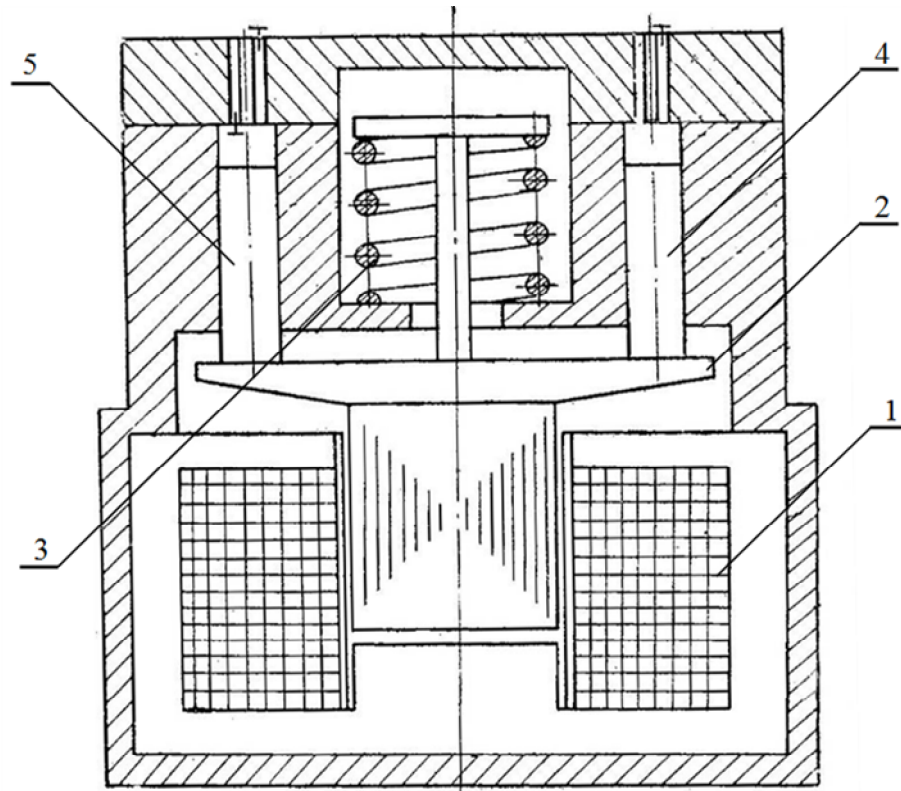


Рисунок 1.4 – Электромагнитный однокатушечный поршневой компрессор

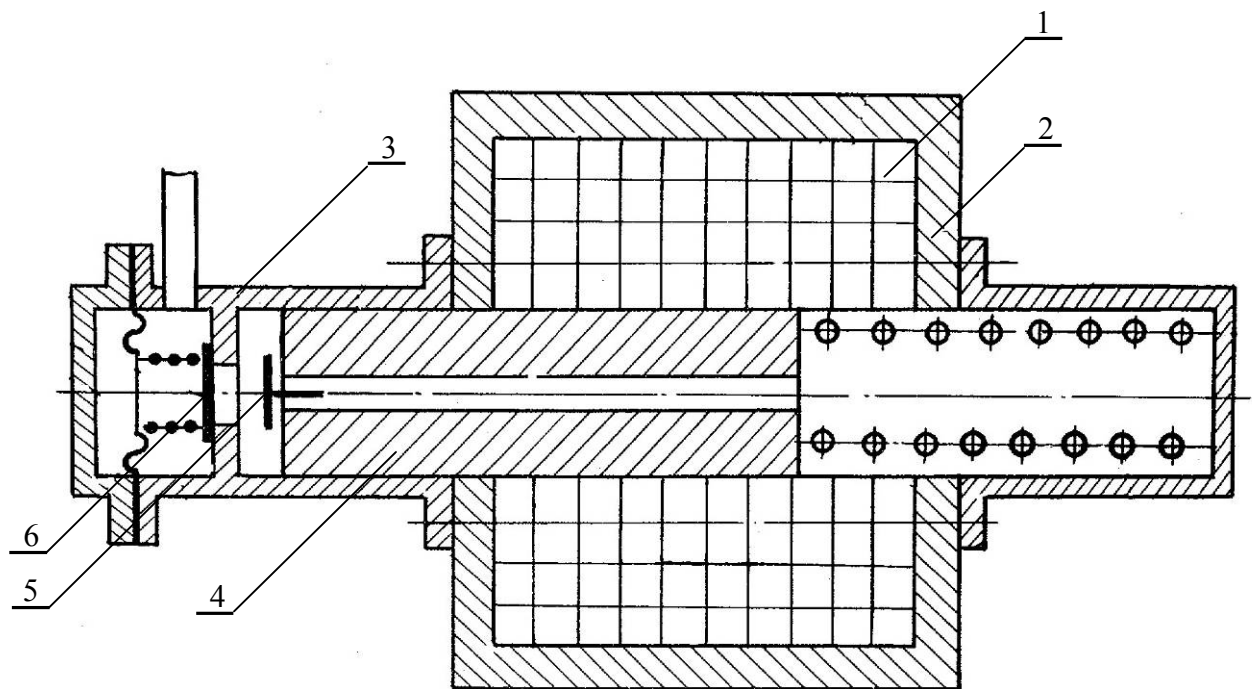


Рисунок 1.5 — Однокатушечный электромагнитный свободнопоршневой компрессор

При этом рабочая среда, систематически проходя через внутреннюю полость поршня в момент токовой паузы, охлаждает поршень изнутри, а попадая далее в корпус компрессора, охлаждает катушки, полюса статора, поршень, якорь, и одновременно предотвращает чрезмерное увеличение температуры подшипников скольжения, снижая тем самым трение о них поршня.

Отличительной особенностью электромагнитного компрессора, описанного в [40] является то, что воздух вводится в аппарат через заднюю сторону воздухозаборников и ведется в сторону передней камеры поршня, при этом охлаждая механические части компрессора, что сводит к минимуму потери, вызывающие перегрев отдельных элементов конструкции.

В патенте США [41] описывается электромагнитное устройство (рисунок 1.6), используемое в качестве компрессора в небулайзерах, и состоящее из таких основных элементов, как сердечник 1 из магнитно-проницаемого материала; взаимодействующие с ним катушки 2 и якорь 3 из магнитно-проницаемого материала, который передает возвратно-поступательное движение посредством вала 4 поршню 5, который осуществляет сжатие и нагнетание рабочей среды в камеру цилиндра 6.

Согласно данным из [41], при использовании этого электромагнитного двигателя в небулайзерах (для диапазона значений давления 0-1,7 атм.) потребляемая мощность уменьшается в 1,75-3,5 раза по сравнению с двигателями вращательного принципа действия. Так же в данном устройстве отсутствует необходимость в фиксированных технологических воздушных зазорах, что сводит к минимуму количество силовых линий, не проходящих через рабочий зазор, в результате чего происходит снижение энергетических и тепловых потерь.

В патенте США [42] описывается линейный электромагнитный компрессор (рисунок 1.7), имеющий следующие основные элементы: магнитный сердечник 1, обмотки 2 и 3, которые взаимодействуют с якорем 4, выполненным в виде усеченного конуса, который посредством вала 5 соединен с поршнем 6. Недостатком данного компрессора является его горизонтальное исполнение, так как при этом увеличивается осевое усилие от двигателя на поршень, а вес поршня приводит к

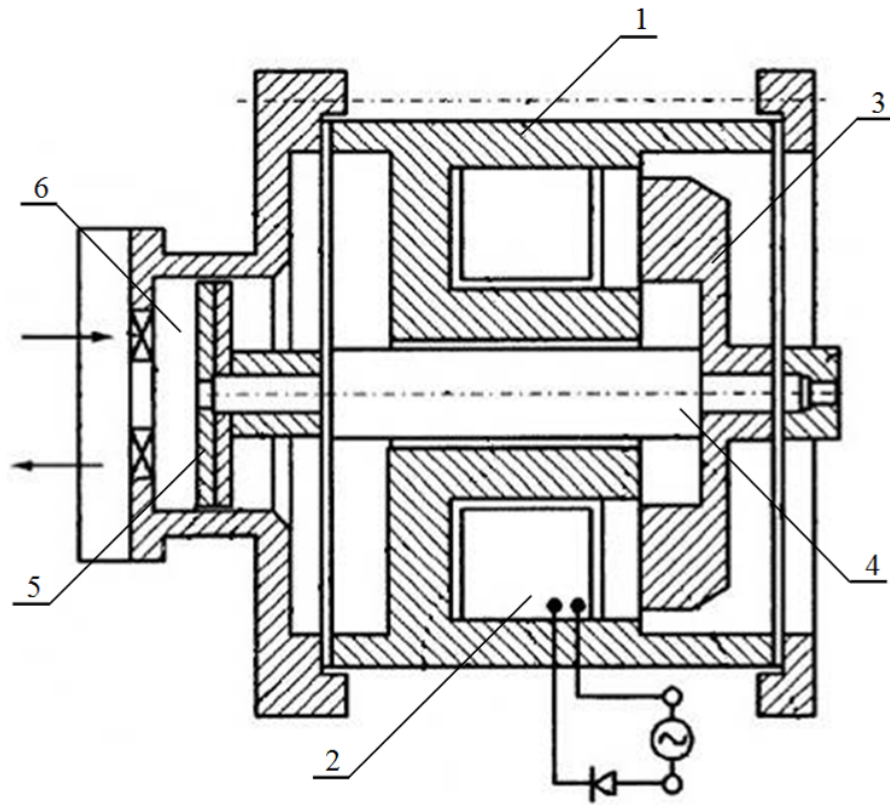


Рисунок 1.6 – Электромагнитный компрессор для небулайзера

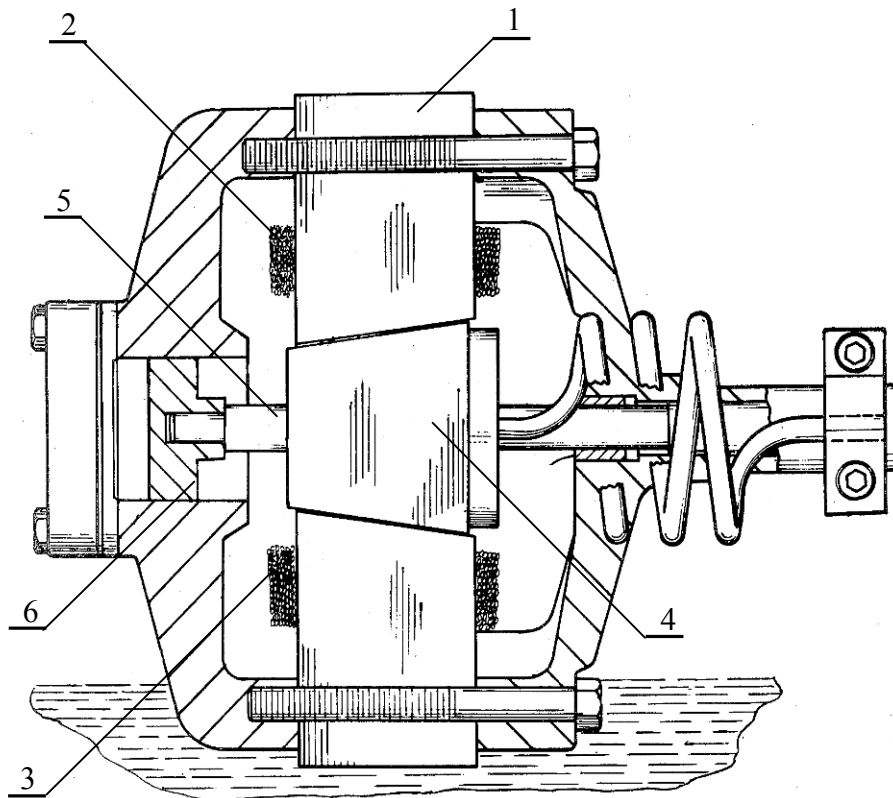


Рисунок 1.7 – Линейный электромагнитный компрессор горизонтального исполнения

появлению боковой нагрузки, действующей в направлении, перпендикулярном оси движения рабочего органа. Этому недостатка лишены компрессоры вертикального исполнения.

Например, в линейном электромагнитном компрессоре [43] вертикальное расположение линейного электромагнитного двигателя обеспечивает отсутствие боковой нагрузки на элементы конструкции и безотказную работу компрессора без смазочных материалов.

Подобное конструктивное исполнение описано в патенте [44], где возвратно-поступательное движение якоря и жестко связанного с ним рабочего органа осуществляется по однополупериодной схеме управления.

Отличительной особенностью данного устройства является то, что в верхней и нижней части корпуса компрессора располагаются амортизирующие элементы, выполненные в виде мембран, действие которых препятствует отклонению колеблющегося тела от прямолинейного движения и направлено в основном на гашение высокочастотных составляющих вибраций, возникающих при работе компрессора. Однако из-за малой амплитуды колебаний амортизирующих элементов не происходит гашения низкочастотных составляющих вибраций. Помимо этого, из-за цикличности работы компрессора, возникает неравномерность подачи рабочей среды.

Кроме описанных конструкций однокатушечных электромагнитных компрессоров одностороннего принципа действия, встречаются двухкатушечные с рабочим органом, как в виде поршня, так и в виде мембраны.

Примером может служить электромагнитный компрессор, описанный в [45], где при поочередном импульсном питании намагничивающих обмоток энергия первой обмотки расходуется на сжатие и нагнетание газа, а второй обмотки – на возвращение рабочего органа в исходное положение и сжатие упругого элемента. При рабочем ходе потенциальная работа, накопленная упругим элементом, суммируется с энергией первой обмотки.

Такое конструктивное решение позволяет подобрать параметры упругого элемента и нагрузку таким образом, чтобы потребляемая из сети энергия распределялась равномерно между намагничивающими обмотками.

Проанализировав описанные выше конструкции можно выделить ряд преимуществ и недостатков электромагнитных компрессоров одностороннего принципа действия, по сравнению с компрессорами, в электроприводе которых используются двигатели вращательного принципа действия.

К преимуществам следует отнести высокую ремонтпригодность и износостойкость, простоту конструкции и системы смазки; уменьшение материалоемкости, габаритов компрессора и числа пар трения за счет исключения передаточных механизмов; снижение уровня шума при работе устройства.

К недостаткам следует отнести: невысокий КПД, низкое давление на выходе устройства; необходимость введения системы торможения и ограничения движения рабочего органа в виде упругих элементов.

1.2.2 Компрессоры двухстороннего принципа действия

Приступая к анализу электромагнитных компрессоров двухстороннего принципа действия следует отметить, что в зависимости от количества и расположения рабочих камер их можно классифицировать следующим образом:

- с одной рабочей камерой [45, 46];
- с рабочей камерой, разделяемой свободно перемещающимися рабочими органами на несколько независимых камер [47];
- с двумя независимыми рабочими камерами, расположенными на внешних сторонах компрессора [48, 49];
- с двумя независимыми рабочими камерами, расположенными во внутренних полостях якоря [50].

В зависимости от типа рабочего органа электромагнитные компрессоры двухстороннего принципа действия, так же как и одностороннего принципа действия, выполняются мембранными или поршневыми. Встречаются конструкции, в

которых рабочие органы помимо выполнения основной функции сжатия и нагнетания газа, могут выступать в качестве элементов системы торможения. Подобное конструктивное решение описано в [48], где изменение объема рабочей камеры, как за счет свободного движения якоря, так и за счет мембран, перемещающихся совместно с ним, позволяет при одном и том же ходе якоря, увеличивать производительность компрессора.

Подобное конструктивное решение с рабочими органами в виде поршней предложено в патенте США [49] (рисунок 1.8), где компрессор содержит катушки 1-4, взаимодействующие с якорями-поршнями 5 и 6, посредством которых происходит сжатие и нагнетание рабочей среды, поступающей из камеры 7 через выходное отверстие 8 в нагнетающий трубопровод 9.

В данном случае поршни соединены через рабочий вал, обеспечивающий их осевое перемещение. Для улучшения позиционирования рабочих органов в крайних положениях, предусмотрены две пары обмоток: когда поршни расположены в первом рабочем положении, то обмотка 1 одной из пар находится одновременно под напряжением с внешней обмоткой 4 из другой пары, а, когда поршни расположены во втором рабочем положении, то вторая обмотка 2 одновременно находится под напряжением с обмоткой 3 [49].

Однако описанные компрессоры двухстороннего принципа действия обладают существенным недостатком – они динамически неуравновешенны, в результате чего возникают дополнительные вибрации при их работе.

Данный недостаток устранен в одном из вариантов схемного решения (рисунок 1.9), так же описанном в [49]: во время работы компрессора переменный ток подается на механизм переключения, который поочередно запитывает током соответствующие пары катушек: во время активизации внешних обмоток 2 и 4, поршни 5 и 6 втягиваются в их электромагнитные поля и начинают двигаться в сторону выходных отверстий 7 и 8.

Так же динамически уравновешенным является компрессор, в котором на сторонах поршней, обращенных внутрь рабочей камеры, расположены упругие элементы в виде пластин, благодаря которым происходит смягчение соударения

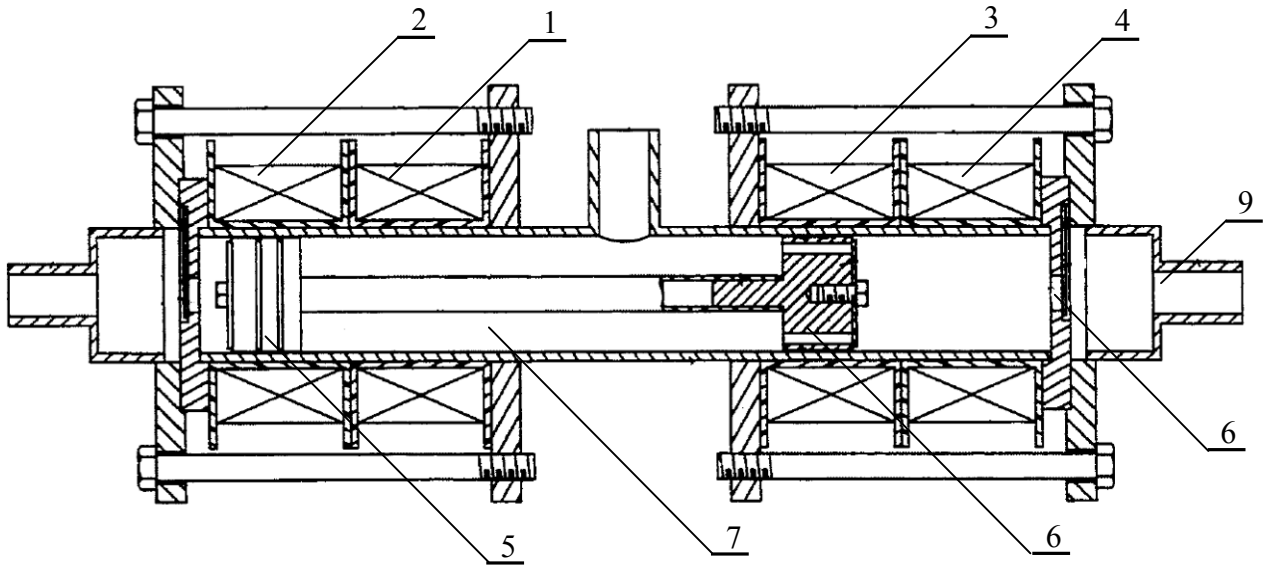


Рисунок 1.8 – Двухсторонний электромагнитный компрессор
с зависимыми рабочими органами

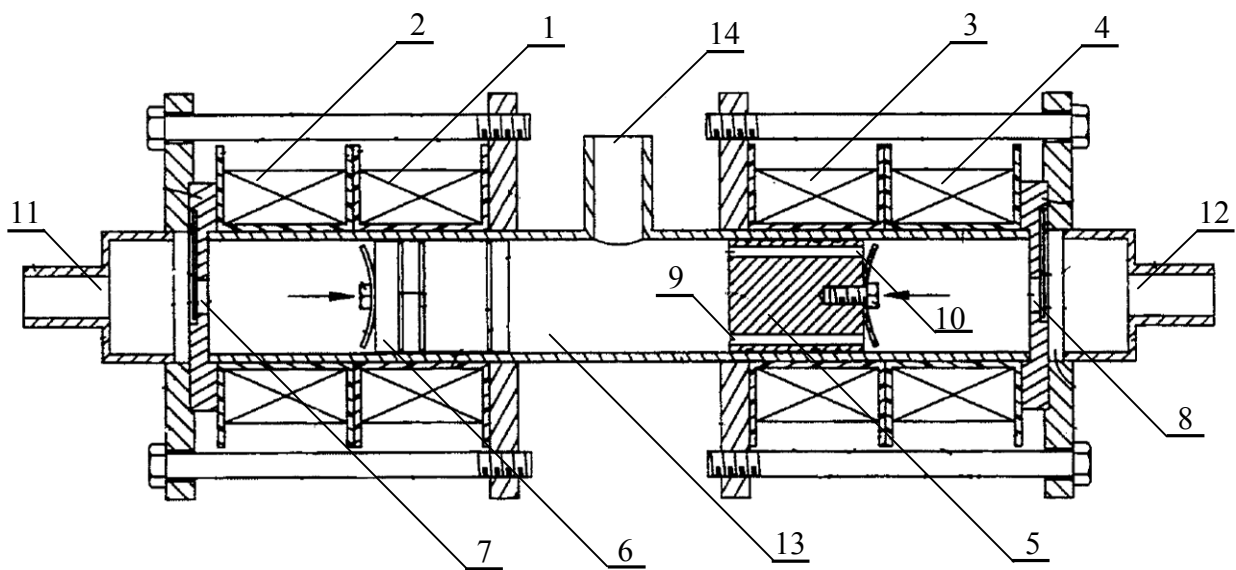


Рисунок 1.9 – Двухсторонний электромагнитный компрессор с
независимыми рабочими органами

рабочих органов, а мертвый объем в рабочей камере компрессора практически равен нулю [46]. Во время этого движения, клапаны на поршнях 9 и 10 закрыты, тем самым не давая рабочей среде выходить. Под действием давления, создаваемого поршнями, происходит нагнетание рабочей среды через нагнетающие трубопроводы 11 и 12. Одновременно, из-за создаваемого поршнями разрежения, в камеру 13, через всасывающий трубопровод 14 поступает рабочая среда. При достижении рабочими органами крайних внешних точек обмотки 2 и 4 обесточиваются, и происходит активация внутренних обмоток 1 и 3, при этом поршни начинают движение в сторону всасывающего трубопровода 14. За счет создания избыточного давления в камере 13 и движения поршней навстречу друг другу открываются клапаны, и происходит нагнетание рабочей среды через клапаны 9 и 10. Далее цикл повторяется.

Еще одним вариантом динамически уравновешенного компрессора является виброкомпрессор В. Кенига, который состоит из двух односторонних компрессоров, соединенных так, чтобы их колеблющиеся массы находились всегда в противофазе. Для уменьшения эффекта асимметрии магнитных полей вместо одной намагничивающей обмотки используются две.

Исследования, проведенные на модели компрессора, выполненного по схеме В. Кенига, показали, что компрессор легко поддается регулировке, устойчив в работе и динамически уравновешен [45].

Помимо представленных выше существует ряд устройств, в которых рабочие органы неподвижны. Например, в [50] описан электромагнитный компрессор, в котором якорь 1 движется возвратно-поступательно при переменной подаче тока на силовые обмотки 2 и 3 (рисунок 1.10). При движении якоря происходит сжатие и нагнетание газа через клапан 4, канал 5 и отверстие 6. Одновременно происходит интенсивное охлаждение движущихся частей газом, всасываемым через клапан 7 в кольцевое пространство, образованное каналом 8 и стаканом 9.

В результате выполнения цилиндров поршневой пары непосредственно в теле якоря (в виде соосных каналов) значительно уменьшаются габаритные размеры компрессора, а поскольку поршни неподвижно закреплены на торцевых

крышках корпуса, то якорь опирается на поршни как на направляющие, что существенно упрощает конструкцию.

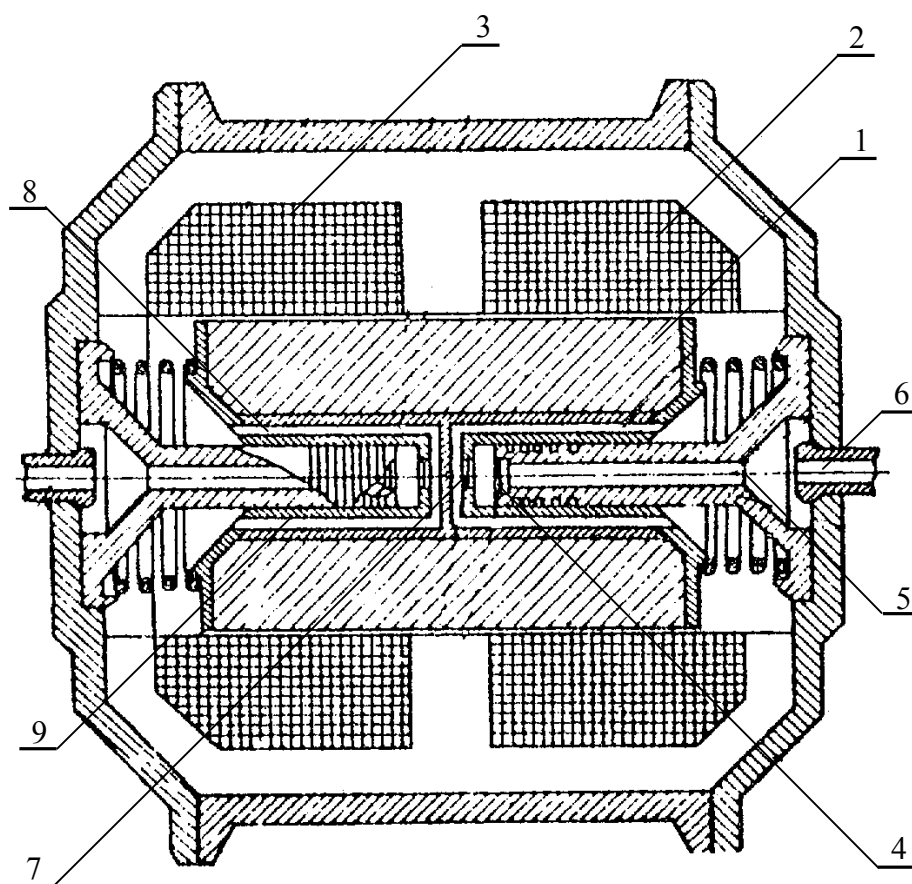


Рисунок 1.10 – Электромагнитный компрессор с неподвижными рабочими органами

Все описанные выше электромагнитные компрессоры двойного принципа действия в зависимости от количества катушек можно подразделить на двухкатушечные и многокатушечные, причем первые получили наибольшее распространение. К многокатушечным в основном относятся свободнопоршневые компрессоры, где якорь двигателя совмещен с рабочими органами.

Например, в [47] описывается электромагнитный компрессор, в котором при подаче напряжения на кольцевые обмотки 1 по обе стороны камеры 2 создаются противоположно направленные магнитные поля (рисунок 1.11). Под действием этих полей поршни 3 и 4 начинают синхронное встречное движение, в результате чего в камере 2 происходит сжатие газа, а в крайних камерах 5 и 6 – раз-

ряжение. В следующий момент времени, под действием цепи управления, электромагнитные поля изменяют свое направление и поршни начинают синхронно расходиться. При этом в рабочих камерах 5 и 6 происходит сжатие газа, а в центральной камере 2 – разряжение. Компрессор имеет три рабочие полости, поэтому поршни совершают рабочий ход как при движении навстречу друг к другу, так и при движении в противоположных направлениях, что обеспечивает непрерывность подачи газа, увеличение производительности и динамическую уравновешенность устройства.

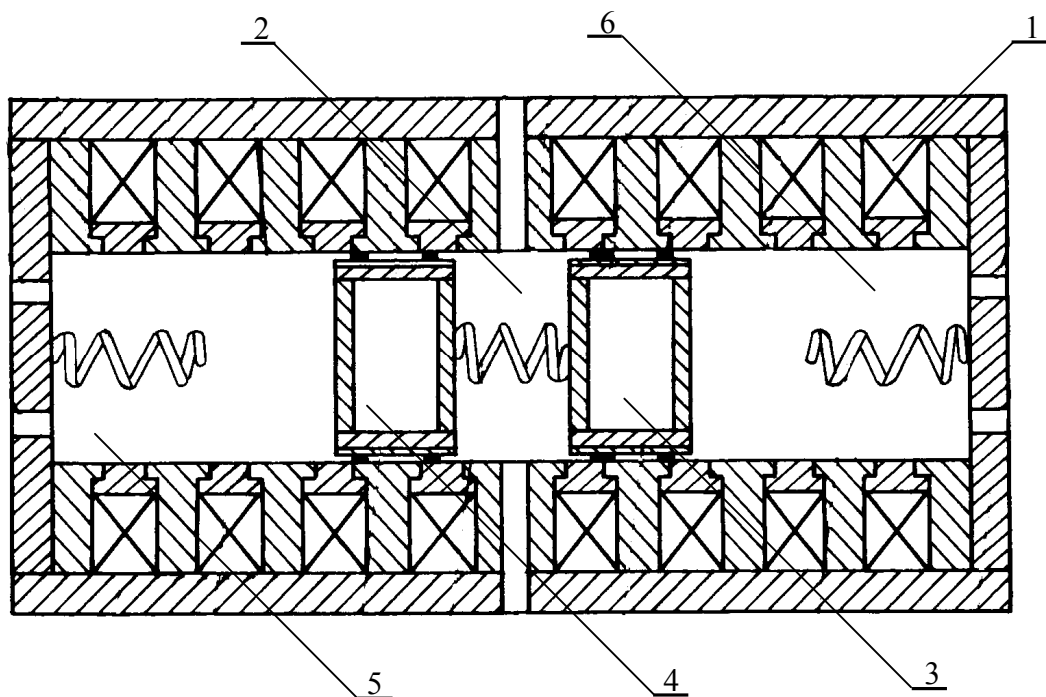


Рисунок 1.11 – Свободнопоршневой электромагнитный компрессор

Существенными недостатками конструкций динамически уравновешенных электромагнитных компрессоров двухстороннего принципа действия являются сложность конструктивного исполнения и обязательное наличие системы управления для обеспечения синхронного движения рабочих органов. К преимуществам следует отнести непрерывность подачи рабочей среды и высокую производительность по сравнению с компрессорами одностороннего принципа действия.

1.3 Системный анализ конструктивных решений электромагнитных компрессоров

В результате анализа конструкций электромагнитных компрессоров одно- и двухстороннего принципа действия были выявлены и сведены в таблицу 1.4 варианты схем, получившие преимущественное распространение [51-53].

К наиболее простым по конструкции следует отнести варианты схем компрессоров одностороннего принципа действия с однокатушечным подпружиненным электромагнитным двигателем и рабочим органом в виде мембраны (таблица 1.4, п. 1) или поршня (таблица 1.4, п. 2) [37, 38, 54].

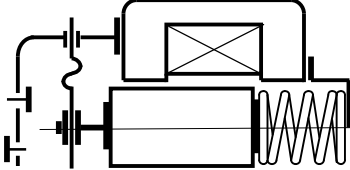
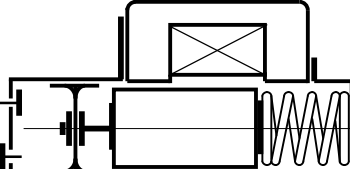
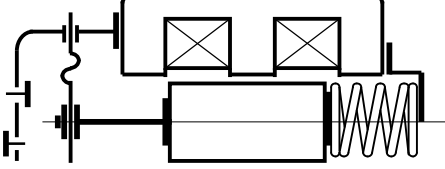
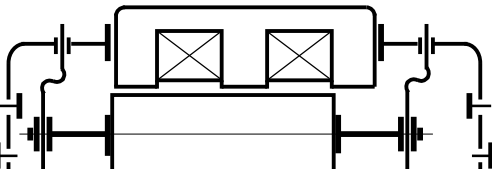
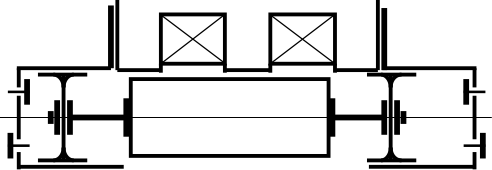
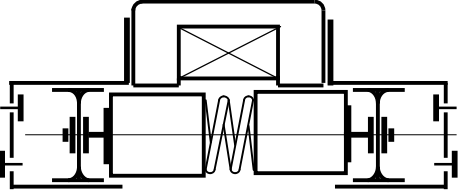
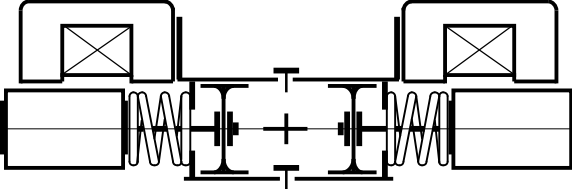
Электромагнитная сила в данном случае создается катушкой, питаемой полуволнами переменного тока по однополупериодной схеме выпрямления, вызывая возвратно-поступательное движение якоря и жестко связанного с ним рабочего органа компрессора. При протекании в катушке полуволны тока якорь сжимает пружину и производит всасывание газа в рабочую полость. За время бестоковой паузы под действием сил пружины якорь и связанный с ним рабочий орган возвращается в исходное состояние, производя сжатие и нагнетание газа. Частота хода якоря равна частоте питающего катушку тока.

При некотором изменении компоновки варианта схемы компрессора процесс сжатия и нагнетания газа может осуществляться под действием электромагнитных сил, а процесс всасывания – под действием сил пружины за время бестоковой паузы [35].

Свободная схема компоновки двигательной части компрессора предусматривает его работу на продольном и на поперечном магнитном поле.

В варианте мембранного компрессора одностороннего принципа действия с двухкатушечным электромагнитным двигателем и пружиной (таблица 14, п. 3) возвратно-поступательное движение якоря, жестко связанного с рабочим органом, осуществляется поочередным питанием катушек полуволнами переменного тока.

Таблица 1.4 – Анализ конструктивных схем электромагнитных компрессоров

№ п/п	Вариант принципиальной схемы компрессора	Классификационные признаки
1.		Мембранный, одностороннего действия с однокатушечным ЛЭМД и пружиной
2.		Поршневой, одностороннего действия с однокатушечным ЛЭМД и пружиной
3.		Мембранный, одностороннего действия с двухкатушечным ЛЭМД и пружиной
4.		Поршневой, одностороннего действия с двухкатушечным ЛЭМД и пружиной
5.		Симметричный, мембранный, двухстороннего действия с двухкатушечным ЛЭМД
6.		Симметричный, поршневой, двухстороннего действия с двухкатушечным ЛЭМД
7.		Динамически уравновешенный, поршневой, двухстороннего действия с однокатушечным ЛЭМД
8.		Динамически уравновешенный, поршневой, двухстороннего действия с двухкатушечным электромагнитным двигателем

Полезная энергия левой катушки, расходуется на работу сжатия и нагнетания газа. Энергия правой катушки – на работу всасывания газа и сжатия пружины. Основной особенностью конструктивного исполнения компрессора является то, что процесс сжатия и нагнетания газа осуществляется за счет магнитной энергии катушки и потенциальной энергии накопленной пружины. Частота хода якоря равна частоте питающего тока [45].

В варианте поршневого компрессора одностороннего действия с двухкатушечным электромагнитным двигателем и пружиной (таблица 1.4, п. 4) рабочий процесс аналогичен варианту по схеме в таблице 1.4, п.3. Питание катушек осуществляется поочередно по схеме однополупериодного выпрямления.

Схемы таблицы 1.4, п. 5 и п. 6 представляют собой вариант беспружинного симметричного компрессора двухстороннего принципа действия с двухкатушечным электромагнитным двигателем соответственно мембранного и поршневого типов [55-57]. При поочередном протекании тока по катушкам якорь и жестко связанные с ним рабочие органы совершают возвратно-поступательное движение. При этом если в одной полости рабочей камеры будет осуществляться процесс сжатия и нагнетания газа, то в другой – процесс всасывания газа. Нагнетание и всасывание газа происходит только за счет энергии катушек [58].

Динамически уравновешенным следует считать вариант поршневого компрессора двухстороннего принципа действия с однокатушечным электромагнитным двигателем (таблица 1.4, п. 7). В приведенной схеме якорь разделен на две симметричные части. Питание двигателя осуществляется от сети переменного тока по схеме однополупериодного выпрямления. При протекании тока по катушке якоря притягиваются, уменьшая рабочий зазор между ними, сжимают пружину и увлекают за собой поршни компрессора. Процесс всасывания газа осуществляется за счет энергии катушки. В бестоковую паузу происходит процесс сжатия и нагнетания газа за счет потенциальной энергии, накопленной пружиной при протекании тока по катушке. В [59] предлагается вместо пружины использовать пневматическую буферную полость.

К оригинальному решению следует отнести вариант схемы динамически уравновешенного поршневого компрессора двухстороннего действия (таблица 1.4, п. 8) [45]. Данная схема сочетает в себе два независимых поршневых компрессора одностороннего принципа действия с однокатушечным двигателем и пружиной. Рабочий процесс компрессора аналогичен варианту схемы таблицы 1.4, п. 2, с той разницей, что левая и правая катушки получают питание от одной полувольты тока, что обеспечивает движение якорей в противофазе. В варианте из таблицы 1.4, п. 8 энергия левой и правой катушки расходуется на работу сжатия пружины и всасывания газа. Процесс сжатия и нагнетания осуществляется в период бестоковой паузы за счет потенциальной энергии, накопленной пружиной. Частота хода поршней равна частоте питающего тока. Питание катушек осуществляется по однополупериодной схеме выпрямления. Компоновка схемы компрессора не исключает возможности использовать энергию катушек для процесса сжатия и нагнетания газа, а потенциальную энергию, запасенную пружиной, – для процесса всасывания газа.

В таблице 1.4 отражена тенденция преимущественного применения на практике основных видов схем электромагнитных компрессоров. Анализ других возможных разработок в рассматриваемой области показывает, что в частном случае варианты принципиальных схем соответствуют приведенной классификации. Например, якорь двигателя может одновременно являться поршнем компрессора [38, 60], а вместо возвратного элемента пружинного типа использоваться мембранный [44, 61], который обеспечивает строгую линейность движения рабочего органа, но обладает малыми значениями рабочего хода. Упругие элементы пружинного типа устанавливаются в основном в компрессорах с большим ходом поршня [32].

На основании проведенных исследований были выявлены и систематизированы основные пути совершенствования линейных электромагнитных компрессоров (рисунок 1.12).

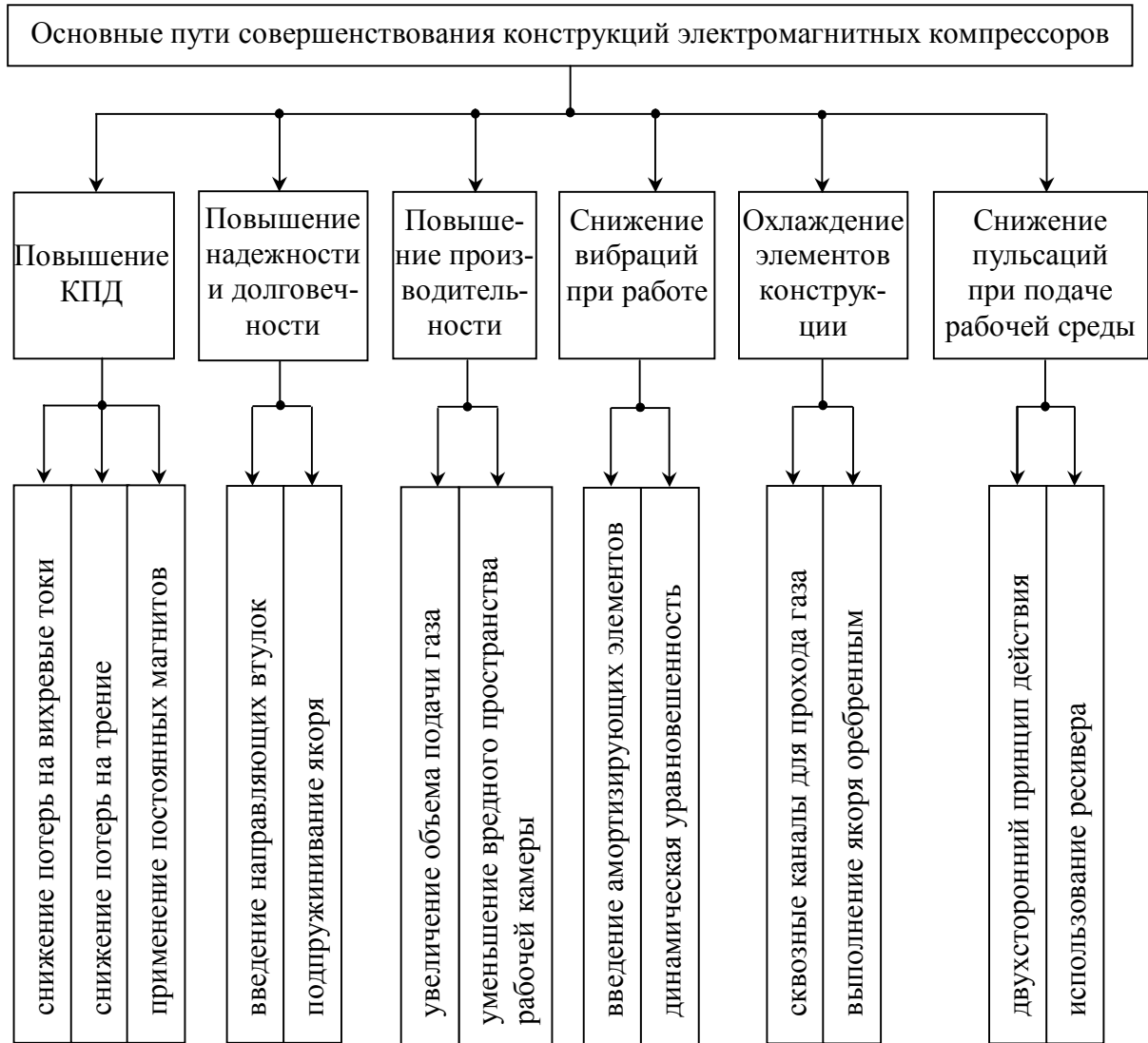


Рисунок 1.12 – Пути совершенствования электромагнитных компрессоров

Несмотря на кажущуюся простоту, электромагнитные компрессоры в принципе, имеют множественные пути развития. Использование новых типов линейных электромагнитных двигателей в электроприводе компрессорного оборудования позволит повысить эффективность работы и вывести данный тип оборудования на новый качественный уровень [32-34].

1.4 Направления и перспективы развития конструкций ЛЭМД для электроприводов компрессоров

Электромагнитные двигатели применяются не только в электроприводах горнодобывающего, сельскохозяйственного и пищевого оборудования [62-71], но и в электроприводах бытовых устройств, в частности в маломощных компрессорных машинах. На основании анализа, представленного в параграфе 1.3, были определены варианты конструктивных схем ЛЭМД, получивших наибольшее распространение в электроприводе компрессорного оборудования (рисунок 1.13).

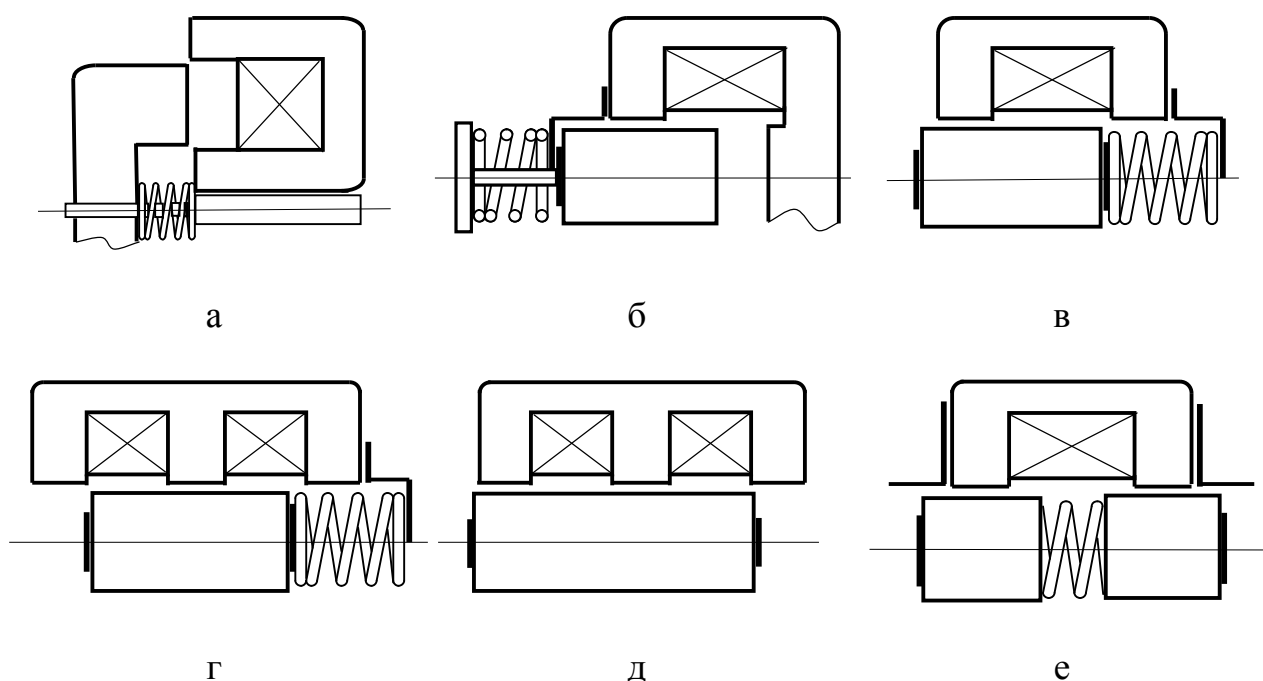


Рисунок 1.13 – Конструктивные схемы линейных электромагнитных двигателей

В электроприводах электромагнитных компрессоров одностороннего принципа действия наибольшее распространение получили конструктивные схемы, представленные на рисунке 1.13, а-г.

В варианте, изображенном на рисунке 1.13, а, при подаче тока на катушку, якорь втягивается внутрь статора и сжимает пружину. При этом в упругом элементе запасается потенциальная энергия, которая расходуется на перемещение якоря в обратном направлении во время бестоковой паузы [41].

В данном варианте конструктивной схемы отсутствует необходимость в фиксированных технологических воздушных зазорах, что сводит к минимуму количество силовых линий, не проходящих через рабочий зазор. В результате этого происходит снижение энергетических и тепловых потерь. Согласно [41] данный электромагнитный двигатель может быть использован в электроприводе мало-мощных компрессоров, обеспечивающих на выходе давление порядка 1-1,5 атм.

В компрессорном оборудовании, где давление на выходе должно составлять не менее 2 атм., рекомендуется использовать конструктивные схемы ЛЭМД рисунка 1.13, б-е.

В варианте, изображенном на рисунке 1.13, б, при подаче тока на катушку, якорь втягивается в нее и растягивает пружину. При этом в упругом элементе запасается потенциальная энергия, которая расходуется на перемещение якоря в обратном направлении во время бестоковой паузы [37].

Наличие стопа в данном случае обеспечивает повышение максимальных значений тягового усилия, однако в ходе работы устройства при увеличении нагрузки могут возникать соударения якоря со стопом. Это приводит к снижению надежности конструкции.

Данного недостатка лишен вариант ЛЭМД, изображенный на рисунке 1.13, в. Двигатель работает следующим образом: при подаче тока на катушку, якорь, сжимая пружину, втягивается внутрь статора. Затем, в момент бестоковой паузы, якорь под действием кинетической энергии, запасенной упругим элементом, возвращается в исходное положение. Далее цикл повторяется [39, 40, 42].

В данном варианте ЛЭМД отсутствуют соударения якоря с элементами магнитопровода, но при этом происходит снижение максимальных значений тягового усилия по сравнению с максимальными значениями тягового усилия конструктивной схемы двигателя, представленной на рисунке 1.13, б.

В варианте исполнения двигателя (рисунок 1.13, г), в котором возвратно-поступательное движение якоря осуществляется поочередным питанием катушек от источника переменного напряжения [45], полезная энергия правой катушки, расходуется на работу сжатия пружины и перемещения якоря вправо, а энергия

левой – на его перемещение влево. Частота хода якоря равна частоте питающего тока.

Основной особенностью конструктивного исполнения компрессора, оснащенного таким двигателем, является то, что процесс сжатия и нагнетания газа осуществляется за счет магнитной энергии катушки и потенциальной энергии, накопленной пружиной.

В электроприводе компрессоров двухстороннего принципа действия преимущественное распространение получили конструкции ЛЭМД, представленные на рисунке 1.13, д-е.

В варианте ЛЭМД рисунка 1.13, д возвратно-поступательное движение якоря осуществляется поочередным питанием катушек от источника переменного напряжения. Двигатель работает на поперечном магнитном поле, по однополупериодной схеме управления [50, 58].

Конструктивная схема, приведенная на рисунке 1.13, е, содержит два якоря, расположенных симметрично. При протекании тока по катушке якоря притягиваются, уменьшая рабочий зазор между ними, и сжимают пружину. В бестоковую паузу поршни возвращаются в исходное положение за счет потенциальной энергии, накопленной пружиной в момент протекания тока по катушке [47, 59]. Данный вариант ЛЭМД предлагается использовать в динамически уравновешенных компрессорах двухстороннего принципа действия.

Еще одним вариантом электромагнитного двигателя для электропривода компрессора двухстороннего принципа действия может выступать конструктивная схема, представляющая собой сочетание двух однотипных симметрично расположенных на одной оси ЛЭМД, выполненных согласно рисунку 1.13, г или рисунку 1.13, д [47, 72].

В данных конструкциях при подаче напряжения на катушки создаются магнитные поля, под действием которых якоря начинают синхронное встречное движение. В следующий момент времени, под действием цепи управления, якоря начинают синхронно расходиться. Далее цикл повторяется.

Так же возможно исполнение двигателя, представляющего собой сочетание двух односторонних симметрично расположенных ЛЭМД, выполненных согласно рисунку 1.13, в, с аналогичным принципом работы, с той лишь разницей, что обе катушки будут получать питание от одной полуволны тока, что обеспечивает движение якорей в противофазе. При этом частота хода якорей равна частоте питающего тока [45].

Классификация ЛЭМД, используемых в электроприводах электромагнитных компрессоров представлена на рисунке 1.14.

Согласно приведенной классификации возврат якоря энергией катушек как правило осуществляется в двух- и многокатушечных электромагнитных двигателях, предназначенных для электроприводов компрессоров двухстороннего принципа действия.

Возврат якоря энергией упругих элементов в основном применяется в компрессорах одностороннего принципа действия, причем при малом значении хода (микрокомпрессорное оборудование) используются, как правило, упругие элементы мембранного типа.

В настоящее время наибольшее распространение в компрессорном оборудовании получили одно- и двухкатушечные ЛЭМД [73-75]. Многокатушечные (три и более катушек) ввиду сложности конструктивного исполнения двигателя практического применения не получили.

По приведенной классификации в настоящее время сложно судить о предпочтительности использования тех или иных конструктивных схем ЛЭМД. Однако применение приведенных вариантов электромагнитных двигателей, по мнению авторов, открывает новые возможности для их использования в электроприводе компрессорного оборудования.

На основании проведенного ретроспективного патентно-информационного поиска и классификационного анализа конструкций [76-82] были определены основные пути развития ЛЭМД для электропривода компрессоров, позволяющие улучшить технические характеристики электромагнитных двигателей (рисунок 1.15).

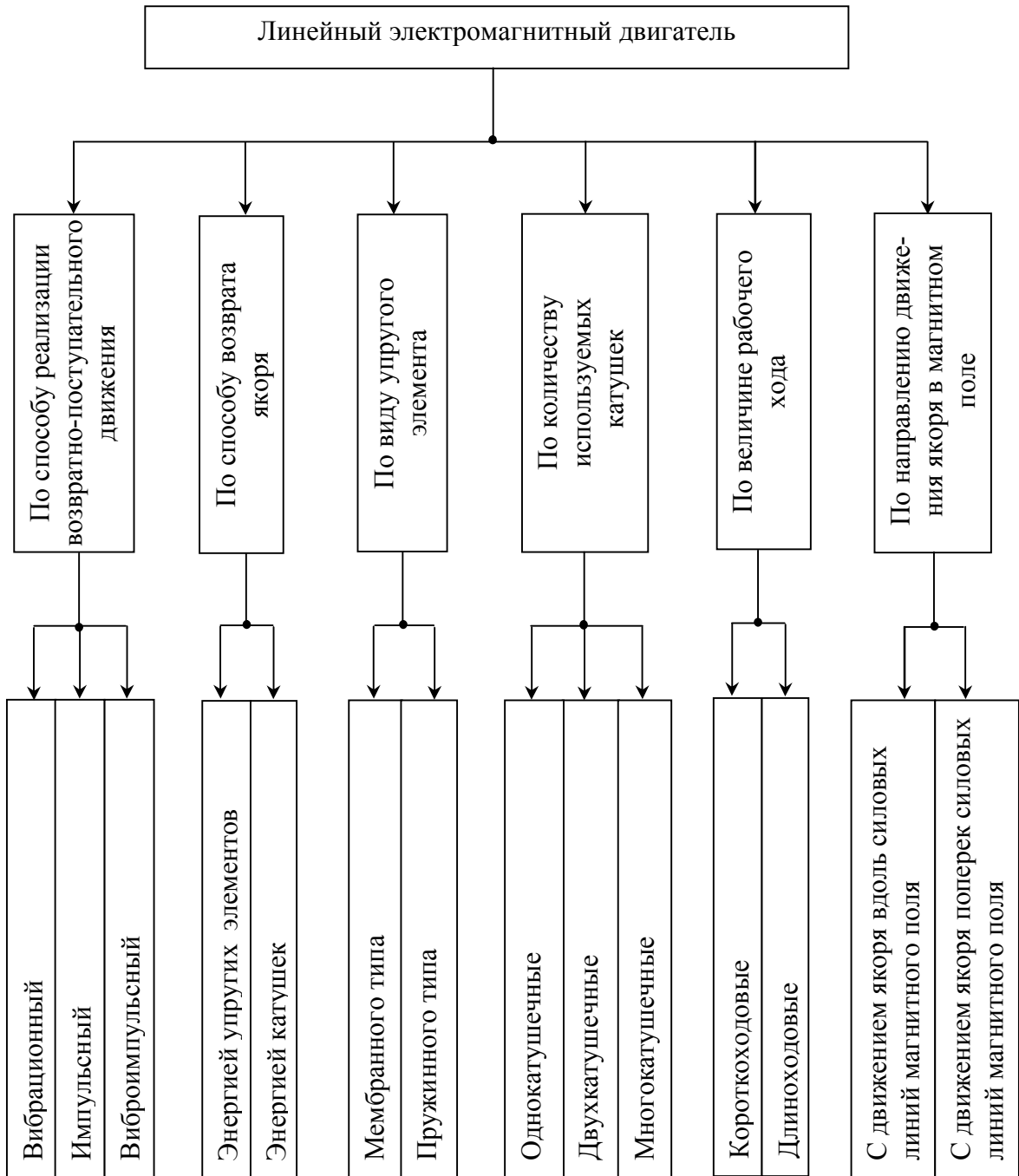


Рисунок. 1.14 – Классификация линейных электромагнитных двигателей

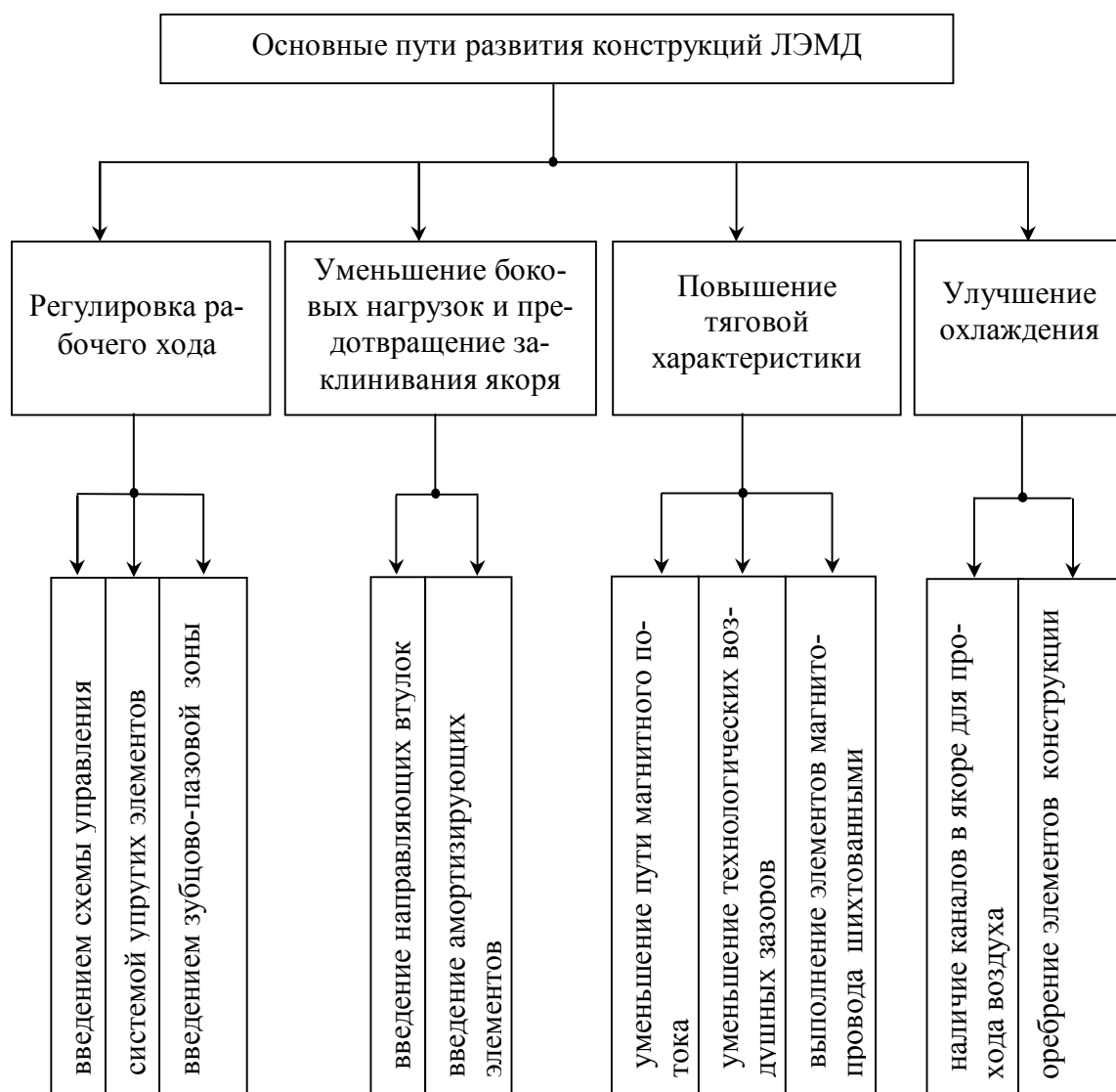


Рисунок. 1.15 – Основные пути развития ЛЭМД

С учетом предлагаемых путей развития электромагнитных двигателей были разработаны варианты конструкций ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, позволяющие при малых значениях рабочего хода получать максимальные значения тягового усилия.

1.5 Конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной

На основании проведенного анализа и выявленных путей развития линейных электромагнитных двигателей для электроприводов виброкомпрессоров на кафедре ТОЭ совместно с кафедрой ТОПП Новосибирского государственного технического университета были разработаны новые конструктивные схемы ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной силовых элементов магнитной системы, позволяющие при малых значениях рабочего хода якоря получать максимальные значения статического тягового усилия. Оригинальность предлагаемых решений защищена патентами РФ [83-85].

Выполнение двигателей цилиндрической формы позволяет технологически просто изготовить элементы магнитопровода и направляющих устройств для прямолинейного перемещения якоря.

Между полюсными элементами статора и якорем по конструктивно-технологическим соображениям выполнены технологические воздушные зазоры Δ , ограниченные в пределах $\Delta = 0,3 \div 0,8$ мм и исключают механическое взаимодействие элементов конструкции. Нижний предел в 0,3 мм устанавливается исходя из максимально допустимой точности обработки материалов, используемых при изготовлении [86]. Верхний предел в 0,8 мм определяется согласно ОСТ 1010 «Допуски большие» для интервала номинальных размеров диаметра якоря от 18 до 80 мм [87].

Предлагаемые варианты конструктивного исполнения ЛЭМД для электропривода виброкомпрессора представлены на рисунке 1.16.

Основное отличие данных вариантов ЛЭМД от рассмотренных в параграфе 1.4 заключается в наличии зубцово-пазовой зоны.

Электромагнитный двигатель, изображенный на рисунке 1.16, а, содержит статор 1, с размещенными внутри катушкой 2 и кольцеобразным втяжным якорем 3, на внешнем и внутреннем диаметре которого выполнены с равным шагом τ зубцы 4 и 5, расположенные перпендикулярно передаваемой силе. По внутренним диаметрам статора 1 выполнены с равным шагом τ ответные зубцы 6 и 7.

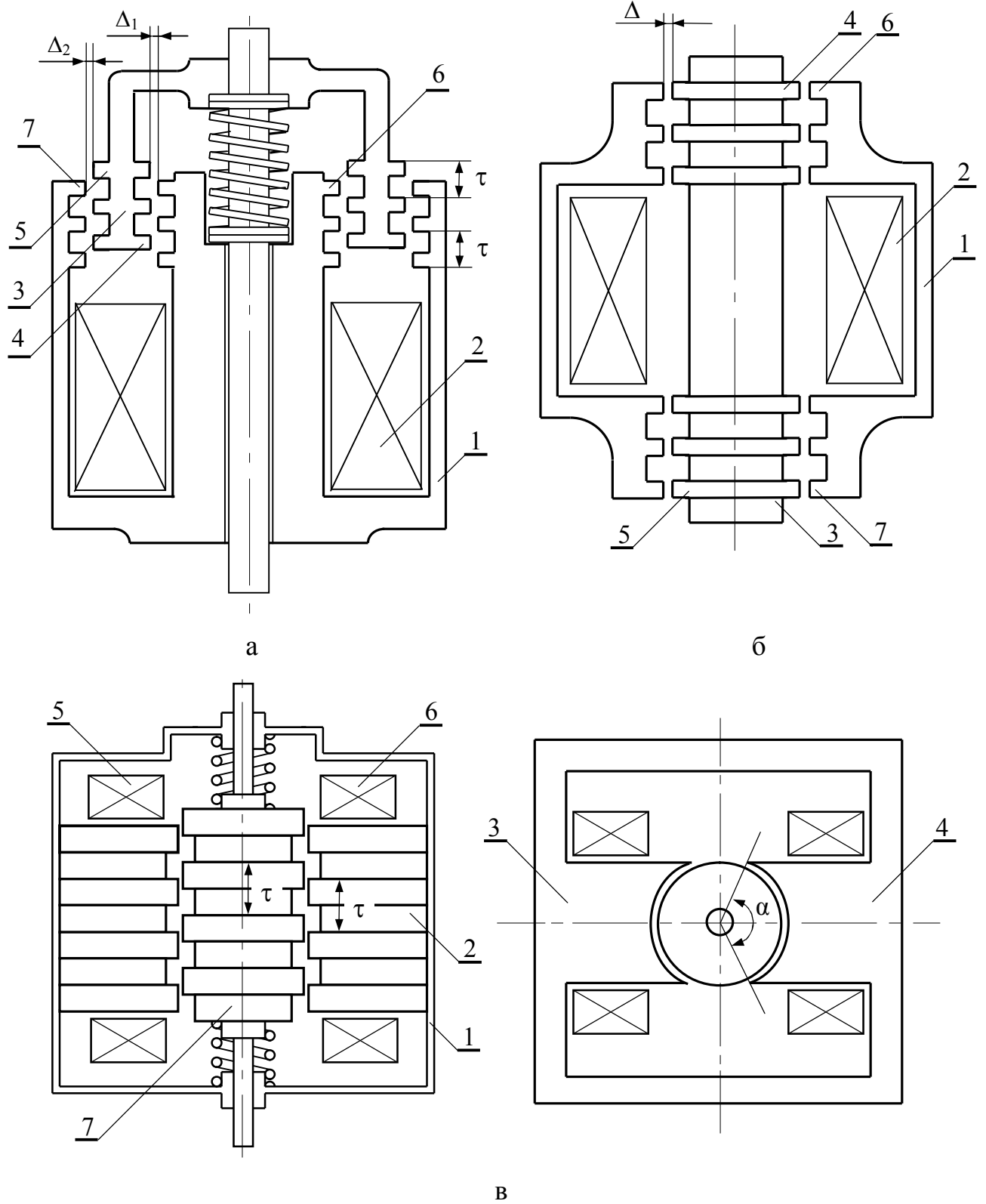


Рисунок 1.16 – Варианты исполнения ЛЭМД

Изменение размера τ позволяет осуществлять регулировку рабочего хода якоря [84, 85].

В исходном состоянии внешний втяжной якорь 3 выдвинут из статора 1 на величину максимального рабочего хода, определяемую начальным положением зубцов 4 и 5 относительно зубцов 6 и 7.

Электромагнитный двигатель работает следующим образом: при подаче импульса напряжения на обмотку 2, по ней протекает электрический ток, индуцирующий магнитное поле, магнитные силовые линии которого замыкаются через сердечник статора 1, зубцы 6, через воздушный зазор Δ_1 , зубцы 4, внешний втяжной якорь 3, зубцы 5, через воздушный зазор Δ_2 , зубцы 7 и внешнюю стенку статора 1. Под действием возникающей магнитодвижущей силы внешний втяжной якорь втягивается в полость статора и совершает рабочий ход. По завершению протекания тока по обмотке внешний втяжной якорь возвращается в исходное положение под действием усилия возвратной пружины.

В варианте ЛЭМД, представленном на рисунке 1.16, б достигается симметрирование магнитной системы, за счет выполнения зубцов 4, 5 на якоре 3 и ответных зубцов 6, 7 на полюсах статора 1 по двухсторонней схеме, симметричной по отношению к катушке 2. В исходном состоянии якорь 3 выдвинут из статора на величину максимального рабочего хода, определяемую начальным положением зубцов 4 и 5 относительно взаимодействующих с ними зубцов 6 и 7.

Принцип работы электромагнитного двигателя заключается в следующем: при подаче импульса напряжения на обмотку по ней протекает переменный электрический ток, индуцирующий магнитное поле, магнитные силовые линии которого замыкаются через элементы магнитопровода, технологический воздушный зазор Δ и зубцово-пазовую зону двигателя. При этом якорь начинает движение вниз до достижения положения его зубцов по отношению к зубцам на полюсах статора, согласно рисунку 1.16, б. В этом положении обеспечивается магнитное равновесие системы: индукция в рабочем зазоре максимальна, а результирующее тяговое усилие равно нулю. По завершению протекания тока по обмотке внешний втяжной якорь возвращается в исходное положение, например, под действием

усилия возвратной пружины (на рисунке 1.16, б не показана) до прихода следующего импульса тока. Затем цикл повторяется.

Электромагнитный двигатель, изображенный на рисунке 1.16, в, содержит корпус 1, размещенные в нем статор 2 с полюсами 3, 4 и расположенными на них обмотками 5, 6, а также взаимодействующего с ними подпружиненного упругими элементами якоря 7. Двигатель может выполняться с одной и двумя парами полюсов статора. В данном варианте исполнения элементы магнитопровода выполнены шихтованными с целью снижения потерь на вихревые токи [83].

В исходном состоянии якорь 7 выдвинут из статора 2 на величину максимального рабочего хода, определяемую начальным положением зубцов, выполненных по длине якоря, относительно взаимодействующих с якорем зубцов, образованных по внутреннему диаметру полюсов 3 и 4.

Электромагнитный двигатель работает следующим образом: при подаче импульса напряжения на обмотки 5 и 6 по ним протекает переменный электрический ток, индуцирующий магнитное поле, магнитные силовые линии которого замыкаются через выполненные по длине якоря 7 зубцы, воздушный технологический зазор Δ , зубцы, выполненные на полюсах 3 и 4, и статор 1. Под действием электромагнитных сил, возникающих в зубцово-пазовой зоне, и сил упругости пружин, якорь 7 совершает возвратно-поступательные движения относительно неподвижного статора 2.

Так как магнитный поток переменный, то при изменении потока и равенстве его нулю, приложенная к якорю 7 электромагнитная сила также становится равной нулю. В момент бестоковой паузы, за счет силы сжатия нижней пружины, якорь 7 возвращается в начальное состояние до прихода следующего импульса тока. Затем цикл повторяется [83].

В предлагаемых вариантах ЛЭДМ в течение периода питающего тока, якорь совершает одно полное колебание, что при частоте источника 50 Гц соответствует 3000 колебаний в минуту. Устройство получает питание по однополупериодной схеме управления и работает в виброимпульсном режиме.

На основании проведенного в параграфе 1.3 анализа и выявленных путей совершенствования электромагнитных компрессоров предлагается конструкция виброкомпрессора (рисунок 1.17), оригинальность которой защищена патентом РФ на полезную модель [88]. В электроприводе данного устройства используется ЛЭМД, представленный на рисунке 1.16, в.

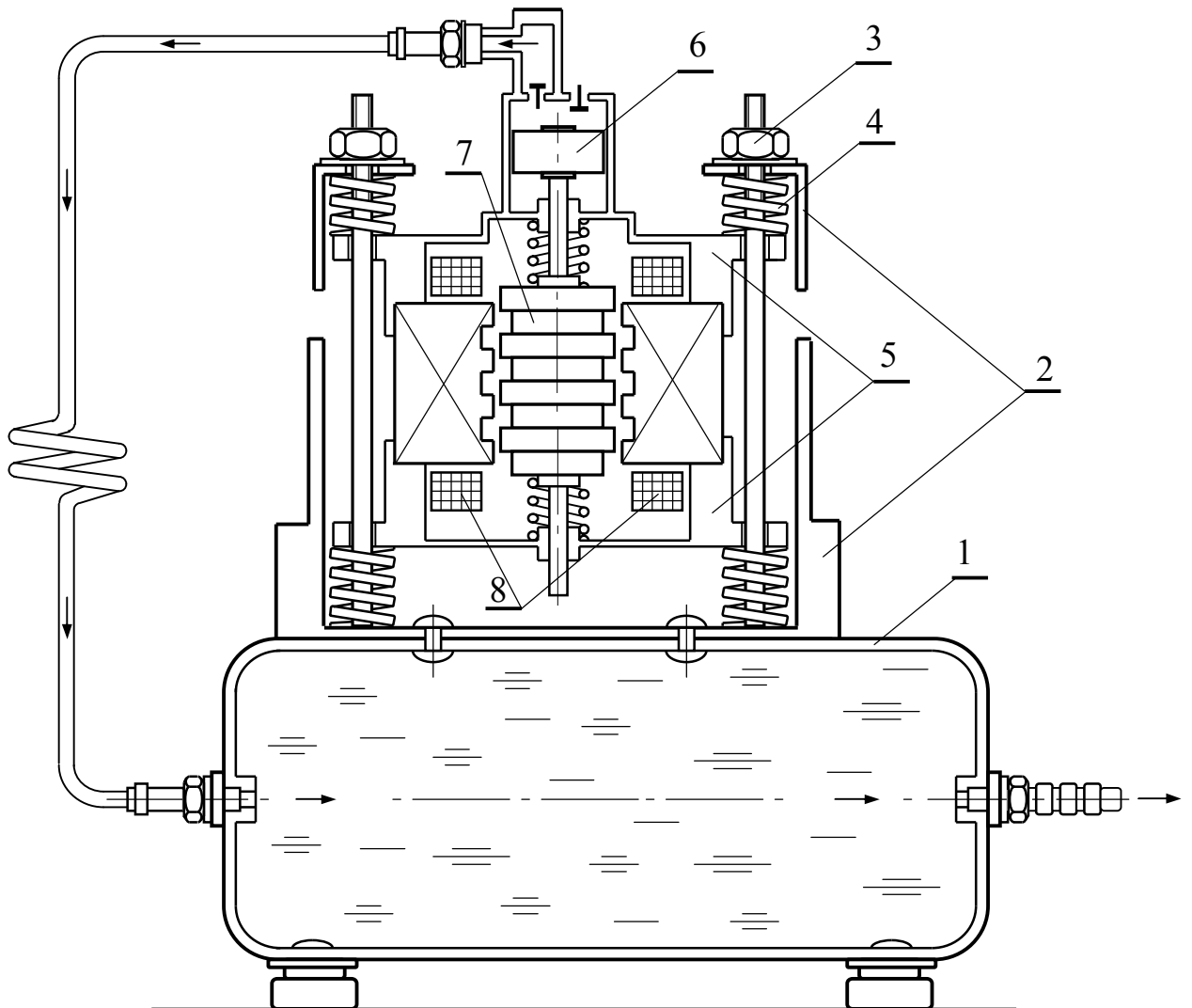


Рисунок 1.17 – Электромагнитный виброкомпрессор

Электромагнитный виброкомпрессор содержит закрепленную на ресивере 1 раму 2 с регулировочными гайками 3 и амортизирующими элементами 4, взаимодействующими с корпусом 5, в котором располагаются рабочий орган 6 и якорь 7, взаимодействующий с катушками 8. Конструктивно рабочий орган компрессора может быть выполнен как в виде поршня, так и в виде мембраны.

Принцип работы виброкомпрессора заключается в следующем: при подаче напряжения на катушки 8, якорь 7 совершает возвратно-поступательные движения и приводит в движение жестко с ним связанный рабочий орган 6, который производит сжатие и нагнетание рабочей среды посредством соединительных трубопроводов в ресивер 1, который обеспечивает равномерность ее подачи потребителю [88].

Отсутствие амортизирующих элементов может привести к разрушению отдельных элементов конструкции вследствие усталостных явлений в металле, повышению температуры корпуса и рабочего органа, и как следствие – снижению надежности и производительности компрессора [89].

Поэтому виброкомпрессор оснащен амортизирующими элементами, расположенными в верхней и нижней части конструкции и выполненными в виде пружин. Каждая из пружин, расположенных в верхней горизонтальной плоскости рамы, упирается в регулировочную гайку [88]. Предлагаемое конструктивное исполнение позволяет уменьшать вибрации при работе виброкомпрессора и предотвращать возникновение критических частот колебаний за счет изменения массовых и жесткостных характеристик конструкции.

Количество пружин и их расположение определяется конструктивными особенностями компрессора, а также жесткостью самих амортизирующих элементов.

Наличие ресивера позволяет осуществлять:

- сглаживание пульсаций давления, обеспечивая равномерность подачи газа потребителю;
- хранение накопленного при нагнетании газа и его охлаждения;
- демпфирование пиковых нагрузок, тем самым, снижая нагрузку на двигатель компрессора.

Использование данного виброкомпрессора, а так же внедрение предлагаемых конструкций ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной в электропривод компрессорного оборудования, позволит добиться повышения удельных силовых и энергетических характеристик устройств.

1.6 Применение конечно-элементного моделирования в задачах анализа

В отличие от традиционных цилиндрических электромагнитных двигателей с притягивающимся якорем с продольным, поперечным или комбинированным в области энергопреобразования магнитным потоком ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной рисунка 1.16 обладают рядом особенностей, которые заключаются в следующем:

- сложность пространственного распределения линий магнитной индукции в воздушных зазорах зубцово-пазовых зон двигателей;
- магнитная несимметрия, вызывающая неравномерное распределение магнитного потока в рабочих областях зубцово-пазовой зоны.

Учет этих особенностей имеет существенное значение для проектирования ЛЭМД с рациональными геометрическими соотношениями, поэтому введение некоторых упрощений при анализе даже на этапе предварительной оценки может оказаться достаточно грубым приближением. В связи с этим для исследования подобных магнитных систем наиболее целесообразно применять математическое имитационное моделирование, позволяющее строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности.

Среди компьютерных программ расчета магнитных полей в настоящее время наибольшее распространение получили программы, в которых используется метод конечных элементов. Апробация данного метода показала высокую степень точности получаемых результатов для электромагнитных двигателей со сложной конфигурацией магнитной системы [90-94].

При расчете методом конечных элементов пространство, занимаемое магнитным полем, разбивается с помощью прямых и кривых линий на отдельные, достаточно малые части. Эти части называются конечными элементами и имеют форму треугольников. В узловых точках конечных элементов – это вершины треугольников – рассчитываются значения искоемых параметров. Конечные элементы не перекрывают друг друга.

Скалярный магнитный потенциал каждого конечного элемента представля-

ется в виде полинома с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами. Для треугольного (i)-элемента потенциал в декартовой системе координат представляют полиномом первого порядка:

$$\varphi_{M(i)} = a(i) + b(i) + c(i), \quad (1.1)$$

где $a(i)$, $b(i)$, $c(i)$ – постоянные коэффициенты.

Основная задача расчета методом конечных элементов заключается в определении коэффициентов $a(i)$, $b(i)$, $c(i)$ для всех конечных элементов, так как это означает возможность расчета скалярного магнитного потенциала в любой точке магнитного поля. После этого в любой узловой точке сетки конечных элементов можно определить с высокой точностью искомые параметры магнитной системы [95-97]. Точность получаемых результатов будет так же определяться правильно-стью построения конечно-элементной модели.

Все представленные в диссертационной работе численные эксперименты были выполнены с использованием имеющегося в свободном доступе программного пакета FEMM.

FEMM (Finite Element Method Magnetics) – это программа конечно-элементного расчета магнитных систем, позволяющая выполнять исследования плоскопараллельного или плоскомеридианного (осесимметричного) и квазистационарного магнитного и стационарного электростатического полей, и определять полевые и цепные параметры данных полей с построением их картин. При этом в ходе моделирования магнитного поля возможно решение как линейных, так и нелинейных задач [95-97].

Данный программный продукт отличается простотой использования графического интерфейса и возможность автоматизированного многократного анализа магнитных систем.

Как и во многих других, широко распространенных конечно-элементных программах, созданных на основе графического интерфейса, в FEMM выделяют три основных функциональных блока:

1. Блок по созданию геометрии расчетной области, идентификации и при-

сваивания физических свойств ее отдельным частям (препроцессор).

2. Блок, осуществляющий расчет параметров модели методом конечных элементов (процессор).

3. Блок вывода результатов расчета (постпроцессор) [96].

Для создания и исследования конечно-элементных моделей магнитных систем в программном пакете FEMM необходимо запустить программу и в открывшемся окне с помощью набора инструментов выбрать тип задачи (осесимметричная или плоскопараллельная), построить эскиз исследуемой магнитной системы, определить свойства материалов, граничные условия и токовые параметры. Затем перейти к анализу конечно-элементной модели путем запуска процессора, по окончании работы которого можно запустить постпроцессор и перейти к определению необходимых параметров и характеристик магнитной системы [97].

Оценка достоверности расчетов, получаемых при использовании программного продукта FEMM, была выполнена при сравнении значений статического тягового усилия ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, полученных в ходе физического и численного экспериментов.

Исследование проведено для близкого по конструктивному исполнению варианта ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, используемого для удержания якоря в ударных машинах [21].

Эксперимент выполнен при следующих геометрических соотношениях размеров двигателя: $h_k/l_k = 0,33$; $a/\tau = 0,5$; $a/b = 1,0$; $c/\tau = 0,6$; $\Delta/\tau = 0,08$, где h_k – высота обмоточного пространства; l_k – длина обмоточного пространства; b – высота зубца; a и c – соответственно ширина зубца и межзубцового расстояния, τ – зубцовое деление; Δ – воздушный технологический зазор (рисунок 1.18).

Численный эксперимент выполнялся для осесимметричной постановки задачи. Граничные условия конечно-элементной модели ЛЭМД принимались с векторным потенциалом $A = 0$.

С целью обеспечения высокой точности получаемых результатов для блоков конечно-элементной модели, определяющих якорь и статор двигателя, длина сторон конечных элементов задавалась равной 0,3 мм (рисунок 1.19).

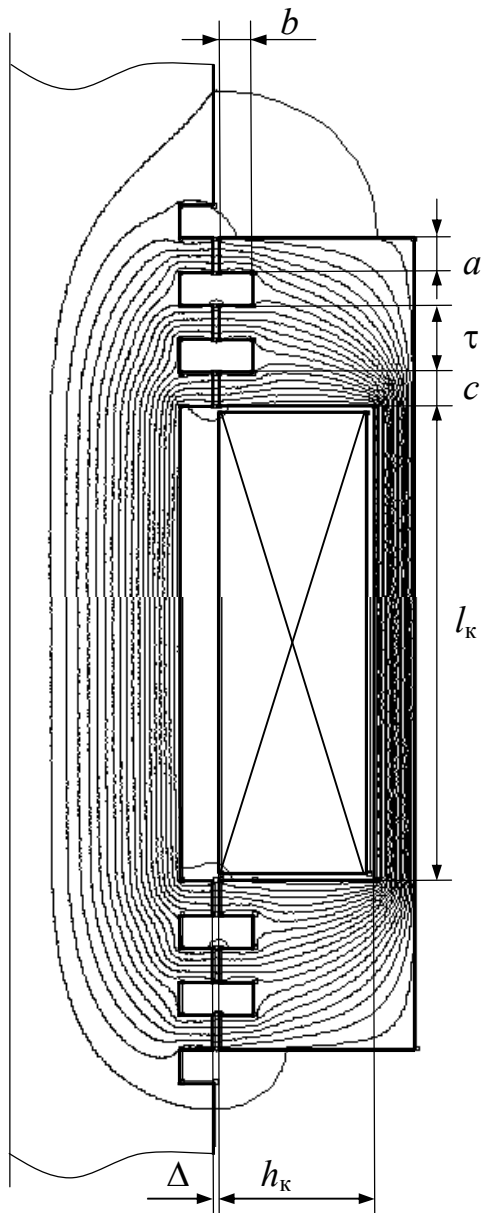


Рисунок 1.18 – Геометрическая структура магнитной системы и линии магнитной индукции

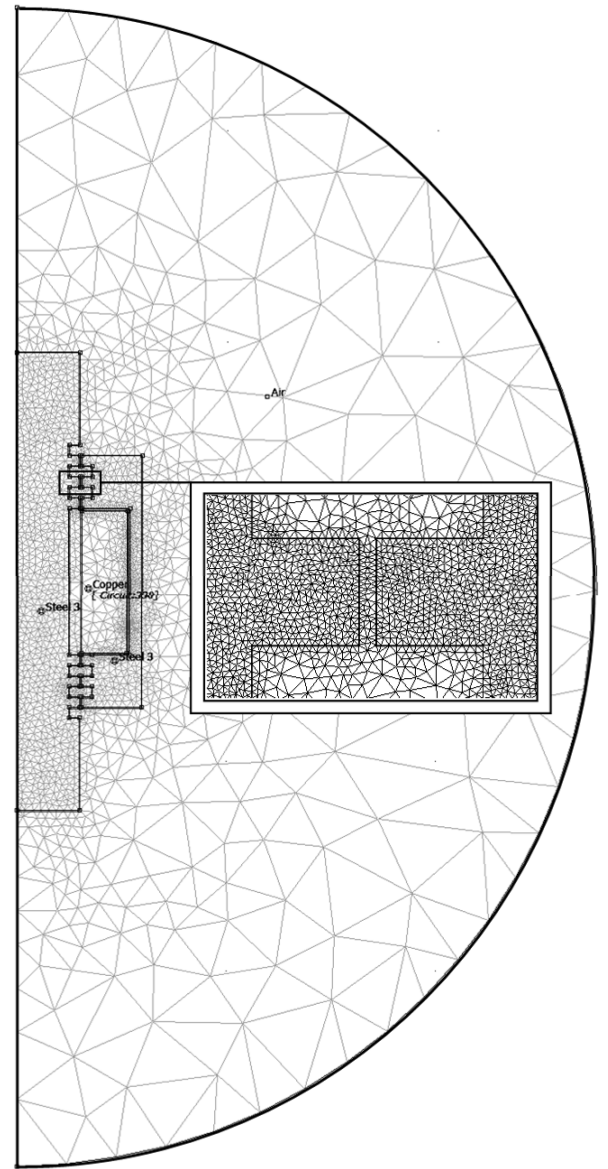


Рисунок 1.19 – Структура осесимметричной модели ЛЭМД и сетка конечных элементов

При построении конечно-элементной модели в качестве материала магнитопровода была выбрана конструкционная сталь марки Ст3. Намагничивающая сила катушки принималась равной $F = 1650 \text{ A}$ ($I = 5 \text{ A}$).

Результаты исследования статических тяговых характеристик представлены на рисунке 1.20, где кривая с индексом 1 характеризует значения статического тя-

гового усилия, полученные в ходе физического эксперимента при постоянном токе, а кривая с индексом 2 – значения статического тягового усилия, полученные в ходе конечно-элементного моделирования.

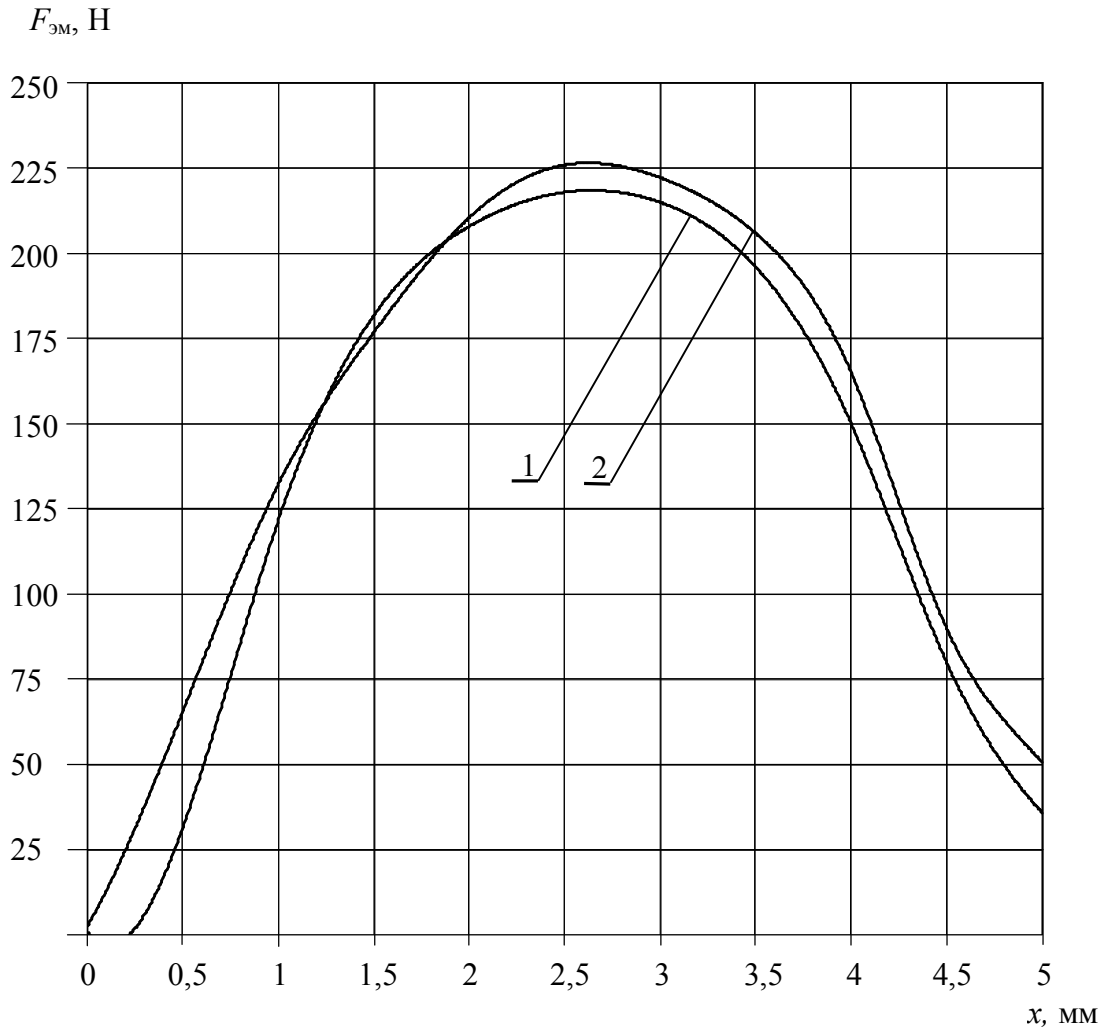


Рисунок 2.20 – Статические тяговые характеристики

Установлено, что относительная погрешность максимальных значений статического тягового усилия, полученных в ходе конечно-элементного моделирования, по сравнению с результатами физического эксперимента, не превышает 4%. Это подтверждает достоверность получаемых в ходе конечно-элементного моделирования результатов. Представленный в параграфе порядок построения конечно-элементной модели ЛЭМД рисунка 1.18 был использован при создании и исследовании конечно-элементных моделей ЛЭМД, представленных в данной работе.

1.7 Выводы

1. Выполнен ретроспективный патентно-информационный поиск и анализ получивших наибольшее распространение вариантов схемных решений электромагнитных компрессоров. Выявлены основные области применения маломощных электромагнитных компрессоров и определены основные пути их дальнейшего совершенствования.

2. Представлены сложившиеся за последние десятилетия тенденции преимущественного использования ЛЭМД в электроприводе компрессорного оборудования. Проведен детальный анализ и выявлены пути развития основных вариантов конструктивных схем ЛЭМД, применяемых в электроприводе маломощных компрессоров.

3. Предложены новые конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной для электропривода виброкомпрессора, позволяющие получать максимальные значения тяговой характеристики при малых значениях рабочего хода якоря и обеспечивающие безударную работу устройства. Оригинальность предлагаемых конструктивных решений защищена патентами РФ на полезные модели и изобретение.

4. Разработана конструктивная схема виброкомпрессора, в электроприводе которого используется ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, обеспечивающая улучшение технических характеристик устройства и расширение его технологических возможностей. Оригинальность предлагаемого конструктивного решения защищена патентом РФ на полезную модель.

5. Дано обоснование конечно-элементной модели ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной для имитационного моделирования, обеспечивающей высокую точность получаемых результатов. Установлено, что относительная погрешность максимальных значений статического тягового усилия, полученных в ходе численного эксперимента, не превышает 4% по сравнению с результатами физического эксперимента, что подтверждает достоверность результатов конечно-элементного моделирования.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ ЗУБЦОВО-ПАЗОВОЙ ЗОНЫ

2.1 Исследование магнитной проводимости при эквивалентной замене цилиндрической структуры развернутой

Несмотря на простоту конструкции электромагнитных двигателей, проектирование их затруднено нелинейностью свойств используемых магнитных материалов и сложным пространственным распределением магнитного поля.

Аналитическое исследование магнитного поля в реальном объеме магнитной системы, отличающемся геометрической и композиционной сложностью, в настоящее время практически не реализуемо. Строгое решение этой задачи возможно только при тщательном анализе распределения магнитного поля. Поэтому при проектировании новых типов ЛЭМД возникает необходимость уточнения существующих либо создания новых методик расчета, основывающихся на информации о характере распределения магнитного поля в активном объеме исследуемой магнитной системы [98, 99].

Учитывая то, что основное энергопреобразование в конструкциях ЛЭМД рисунка 1.16 главы 1 происходит в зубцово-пазовой зоне, то точность расчета магнитной системы будет в основном определяться точностью расчета магнитного поля воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны элементов магнитной системы двигателя.

В качестве параметра, подлежащего расчету, рассматривается магнитная проводимость воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД. От точности определения ее значений, в частности, будет зависеть точность получаемых значений статического тягового усилия электромагнитного двигателя [100, 101].

Для расчета магнитной проводимости воздушных зазоров электромагнитных двигателей применяется ряд методов, наибольшее распространение из которых получили:

- Метод, основанный на экспериментальном исследовании распределения магнитного поля между зубцами. Он отличается трудоемкостью и мало приспособлен для использования в аналитических расчетах [102, 103].

- Метод вероятных путей потока (метод Ротерса), суть которого заключается в том, что магнитное поле между зубцами определяется набором простых геометрических фигур [104]. Данный метод лежит в основе ряда существующих методик по расчету магнитной проводимости [105-117].

- Модифицированный метод Ротерса, который основан на методе вероятных путей потока и отличается тем, что форма геометрических фигур, определяющих характер магнитного поля вблизи воздушных зазоров, наиболее приближена к формам, которые описывают линии магнитного потока в реальных магнитных системах. Данный метод был разработан для электромагнитов клапанного типа, а его использование при расчете магнитной проводимости, согласно [118-120], позволяет получать значения с максимальной погрешностью не превышающей 6 %.

- Метод расчетных полюсов, который основан на замене магнитного поля вблизи воздушного зазора однородным, не имеющим поля выпучивания, путем замены реальных размеров зубцов расчетными. При этом значения воздушного зазора и индукции в нем не изменяются [103].

- Расчет магнитной проводимости с помощью метода конформных отображений. Данный метод применим для расчета плоскопараллельных полей, удовлетворяющих уравнению Лапласа. В его основе лежит преобразование, с помощью функций комплексного переменного, поля сложной конфигурации в поле простой конфигурации. После чего вводится комплексный потенциал, через который определяется напряженность поля. Однако приемлемое по сложности решение получается только в том случае, если границы эквипотенциальны. Данный метод лежит в основе ряда методик расчета магнитной проводимости [121-123].

Применение того или иного метода расчета определяется формой магнитной системы, известными пределами координат поля выпучивания и желаемой точностью расчета.

Наибольшее распространение в проектировании электромагнитных двигателей получили методики, основанные на методе вероятных путей потока и позволяющие учитывать магнитную проводимость поля выпучивания.

В настоящее время для цилиндрического варианта исполнения ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной отсутствуют методики расчета магнитной проводимости, основанные на методе вероятных путей потока. Поэтому для определения магнитной проводимости были выбраны аналогичные методики, разработанные для расчета магнитных систем с выраженной зубцово-пазовой зоной в декартовой системе координат [124].

Для корректного сопоставления результатов, полученных аналитически и в ходе численного эксперимента, выполнялась развертка цилиндрических вариантов ЛЭМД рисунка 1.16. Зубцово-пазовые зоны двигателей до и после развертки представлены на рисунке 2.1.

Для оценки влияния развертки двигателей на получаемые значения магнитной проводимости выполнялось сравнение результатов, полученных для осесимметричной постановки задачи с результатами, полученными для плоскопараллельной постановки задачи. Максимальное расхождение в значениях объемов элементов магнитных систем при построении осесимметричных и плоскопараллельных конечно-элементных моделей одного и того же варианта ЛЭМД не превышало 1 % [125].

В ходе численного эксперимента значения магнитной проводимости определялись через значения энергии магнитного поля в воздушных зазорах зубцово-пазовой зоны двигателя в интервале смещения зубцов якоря относительно зубцов статора $0 \leq x \leq (a + c)/2$. Смещению $x = 0$ мм соответствовало положение зубцов, представленное на рисунке 2.1.

Для уменьшения эффекта асимметрии магнитного поля и получения корректных результатов, при построении конечно-элементных моделей ЛЭМД использовались две намагничивающие обмотки, расположенные по обе стороны от якоря двигателя. При этом магнитный поток системы можно представить в виде потоков, создаваемых каждой катушкой в отдельности, тогда магнитная система

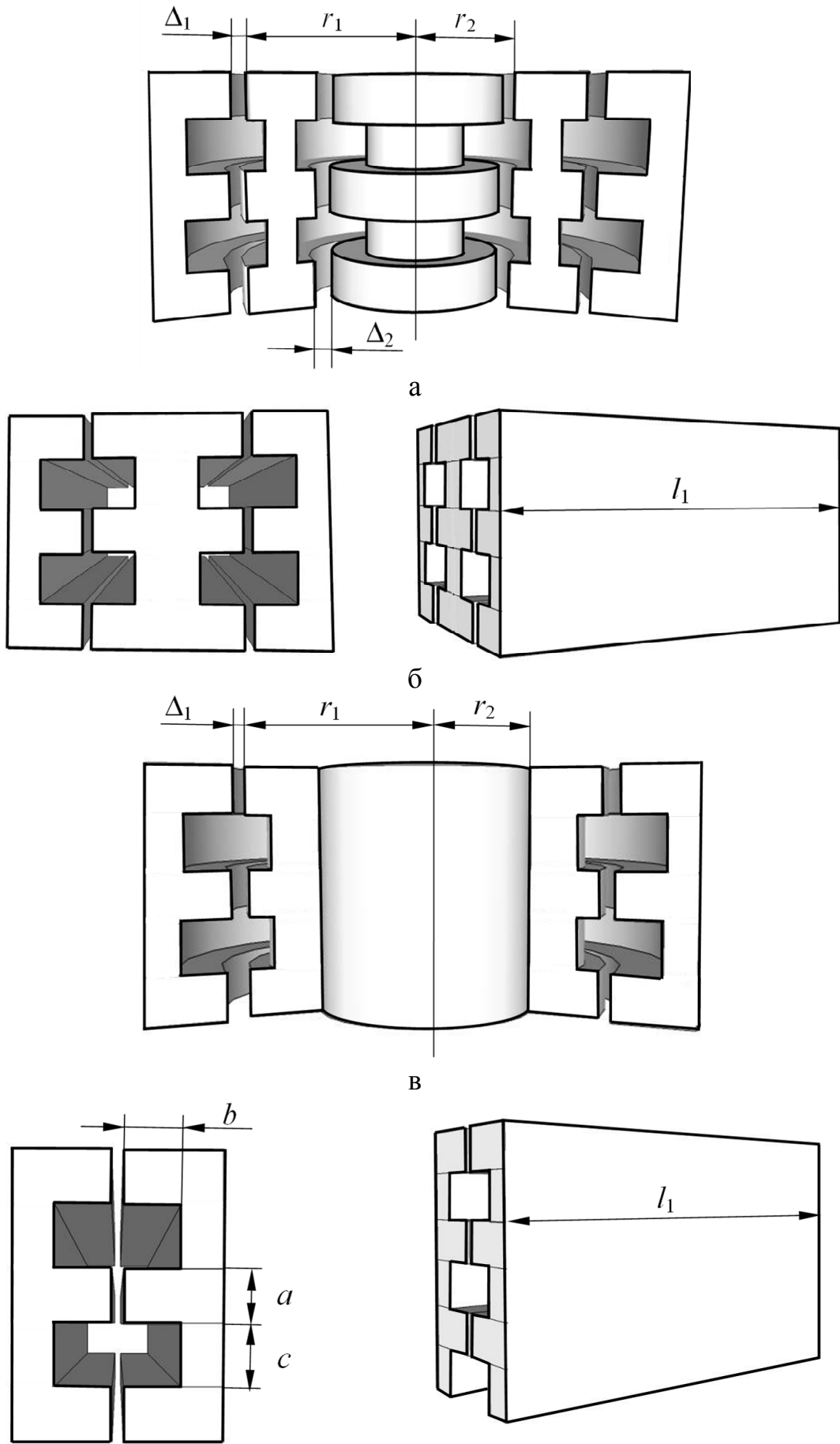


Рисунок 2.1 – Варианты зубцово-пазовой зоны ЛЭМД

условно разбивается на две подсистемы. Исходя из этого, магнитную проводимость Λ для одной подсистемы можно выразить через потокосцепление Ψ :

$$\Lambda = \frac{\Psi}{w^2 I}, \quad (2.1)$$

где I – ток, w – число витков катушки.

Учитывая то, что потокосцепление связано с энергией магнитного поля W_M через соотношение:

$$W_M = \frac{\Psi I}{2}, \quad (2.2)$$

то выражение для магнитной проводимости примет вид:

$$\Lambda = \frac{2W_M}{w^2 I^2} \quad (2.3)$$

При условии равенства токов, чисел витков в каждой из катушек и размеров сечений зубцов, формула магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны двигателя примет вид:

$$\Lambda_{\Sigma} = \Lambda \cdot 2 = \frac{4W_M}{(Iw)^2} \quad (2.4)$$

Численный эксперимент проводился при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$, $c/a = 1,5$, $b/a = 1$, $l_1/a = 11$, $n = 3 \div 5$ и $a = 4$ мм, где a – ширина зубца, c – межзубцовое расстояние, b – высота зубца, Δ – технологический воздушный зазор, n – число зубцов, l_1 – длина якоря в развернутом варианте исполнения двигателя (рисунок 2.1, б и рисунок 2.1, г), определяемая из выражения $l_1 = \pi(r_1 + r_2)$ [125], где r_1 и r_2 – соответственно внутренний и внешний радиусы якоря (рисунок 2.1, а и рисунок 2.1, в).

Для вариантов зубцово-пазовой зоны ЛЭМД рисунка 2.1, в-г, значение $\Delta_2 \rightarrow 0$, а для вариантов рисунка 2.1, а-б – $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$.

При этом значение тока и намагничивающей силы катушки для вариантов двигателей, изображенных на рисунке 2.1, а-б составили $F = 325$ А и $I = 0,65$ А, а для представленных на рисунке 2.1, в-г, $F = 175$ А и $I = 0,35$ А. При смещении зубцов $x = 0$ мм значение магнитной индукции в стали составило $B_{ст} = 0,23$ Тл, а в

воздушных технологических зазорах Δ_1 и Δ в пределах $B_\Delta = 0,15 \div 0,2$ Тл. Магнитные свойства магнитопровода были заданы в виде зависимости индукции от напряженности магнитного поля $B(H)$ и соответствовали конструкционной стали марки Ст3.

Установлено, что выраженная в процентах разница в значениях магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовых зон, изображенных на рисунке 2.1, а и рисунке 2.1,б, не превышает 6 %, а для представленных на рисунке 2.1, в и рисунке 2.1, г – 8%.

В качестве наглядного примера на рисунке 2.2 представлены результаты исследования для варианта ЛЭМД, зубцово-пазовая зона которого изображена на рисунке 2.1, а-б. В данном случае экспериментальные значения магнитной проводимости, полученные при осесимметричной постановке задачи, характеризует кривая Λ_n^I , а при плоскопараллельной постановке задачи – кривая Λ_n .

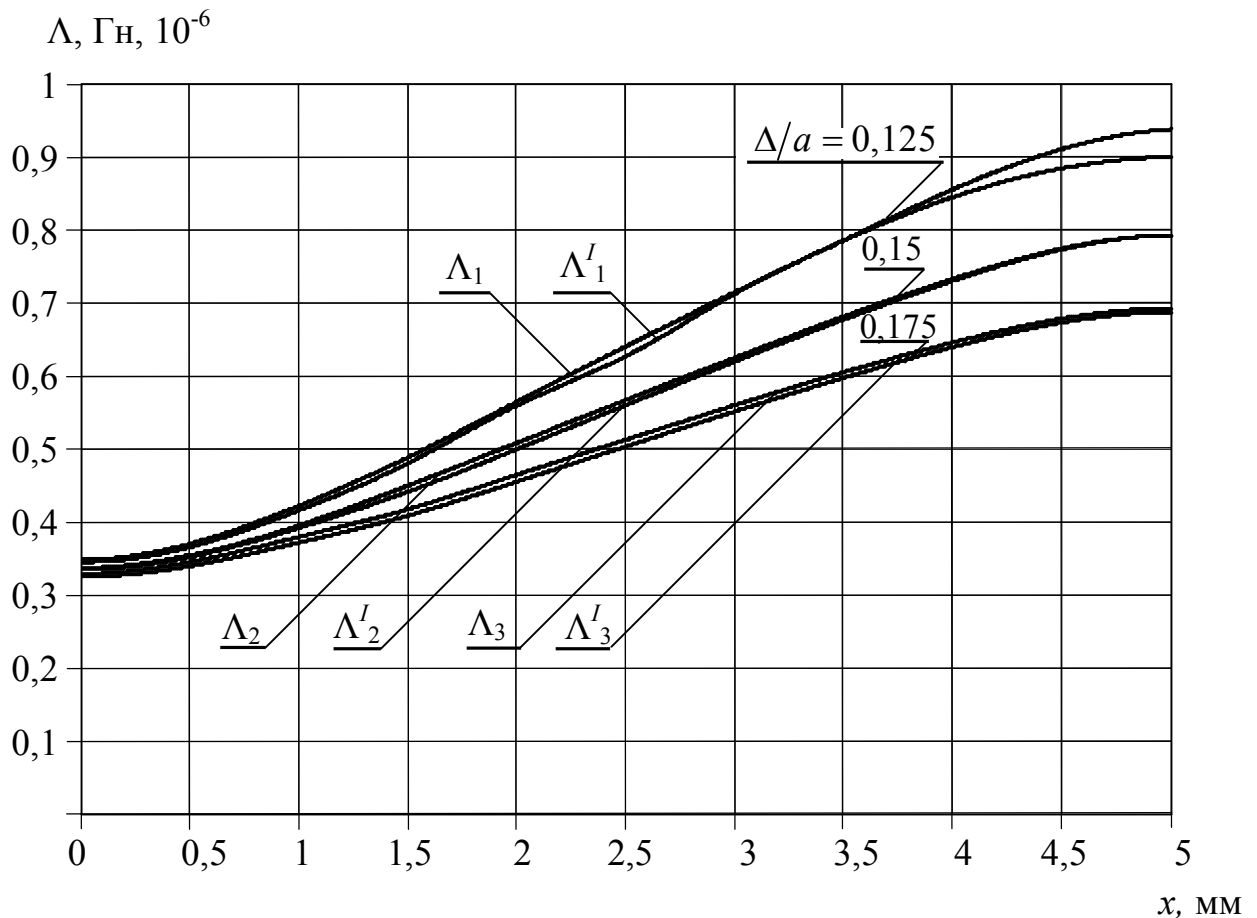


Рисунок 2.2 – Значения магнитной проводимости

В рассматриваемых вариантах ЛЭМД рабочий магнитный поток проходит через воздушные зазоры зубцово-пазовой зоны, которые оказывают существенное влияние на создаваемое тяговое усилие двигателя. Поэтому был проведен аналогичный численный эксперимент по определению статического тягового усилия для различных постановок задачи.

С целью определения влияния насыщения магнитной системы на значения статического тягового усилия при изменении постановки задачи конечно-элементное моделирование выполнялось для двух значений индукции в стали: $B_{ст} = 0,8$ Тл и $B_{ст} = 1,6$ Тл.

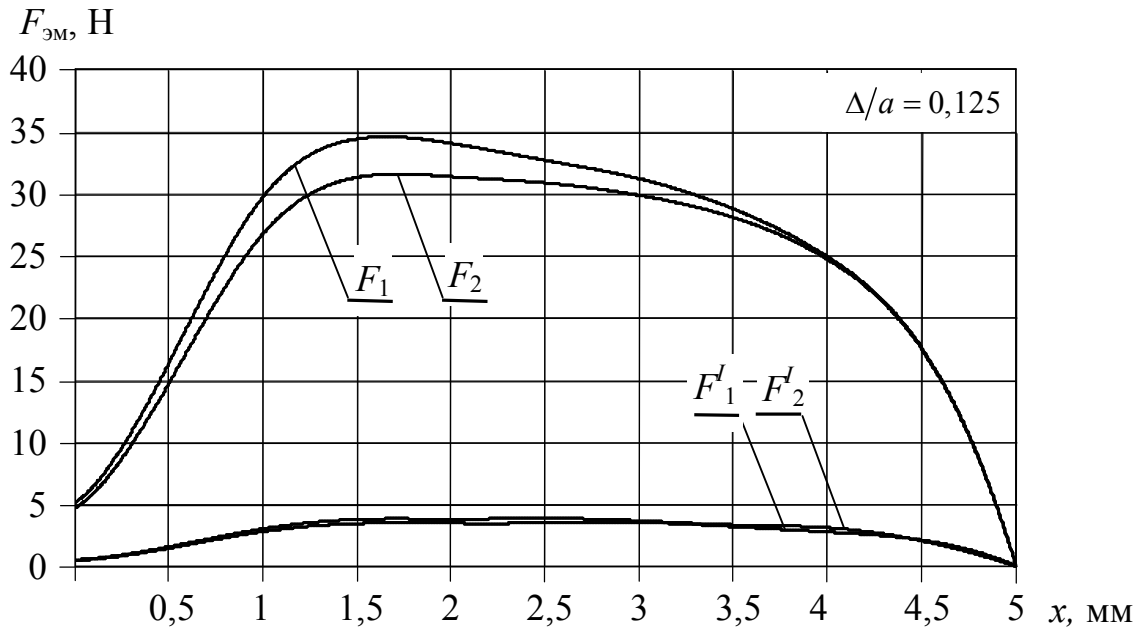
Результаты численного эксперимента для вариантов рисунка 2.1, а-б, представлены на рисунке 2.3, а, а для вариантов рисунка 2.1, в-г – на рисунке 2.3, б.

В данном случае кривые, характеризующие значения статического тягового усилия для осесимметричной постановки решения задачи при $B_{ст} = 1,6$ Тл и $B_{ст} = 0,8$ Тл обозначены соответственно через F_1 и F'_1 , а для плоскопараллельной постановки решения задачи – через F_2 и F'_2 .

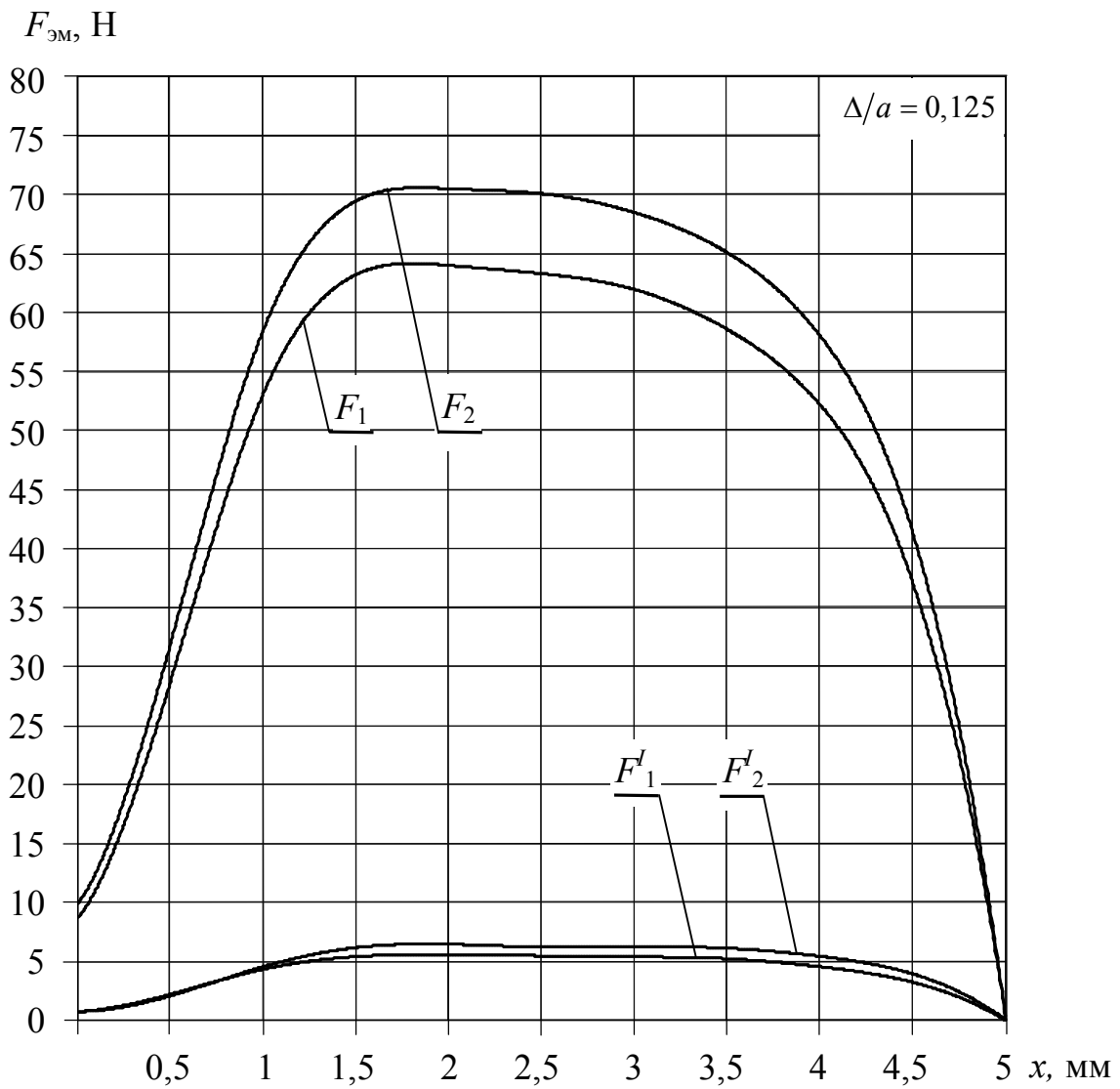
Установлено, что при изменении постановки задачи с осесимметричной на плоскопараллельную разница в максимальных значениях статического тягового усилия, выраженная в процентах, для вариантов рисунка 2.1, а-б при $B_{ст} = 1,6$ Тл не превышает 10%, при $B_{ст} = 0,8$ Тл – 11%, а для вариантов рисунка 2.1, в-г при $B_{ст} = 1,6$ Тл и $B_{ст} = 0,8$ Тл – не превышает 10 % и 14% соответственно [125].

При этом максимальные значения статического тягового усилия достигаются при одних и тех же положениях зубцов якоря относительно зубцов статора независимо от постановки задачи в численном эксперименте.

Выявлено, что увеличение индукции в стали в 2 раза не оказывает существенного влияния на выраженную в процентах разницу в значениях статического тягового усилия, полученных при развертке линейных электромагнитных двигателей с зубцово-пазовой зоной.



а



б

Рисунок 2.3 – Тяговые характеристики

Следовательно, результаты численных экспериментов, полученные для развернутых вариантов ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, могут быть использованы при расчете аналогичных цилиндрических вариантов электромагнитных двигателей.

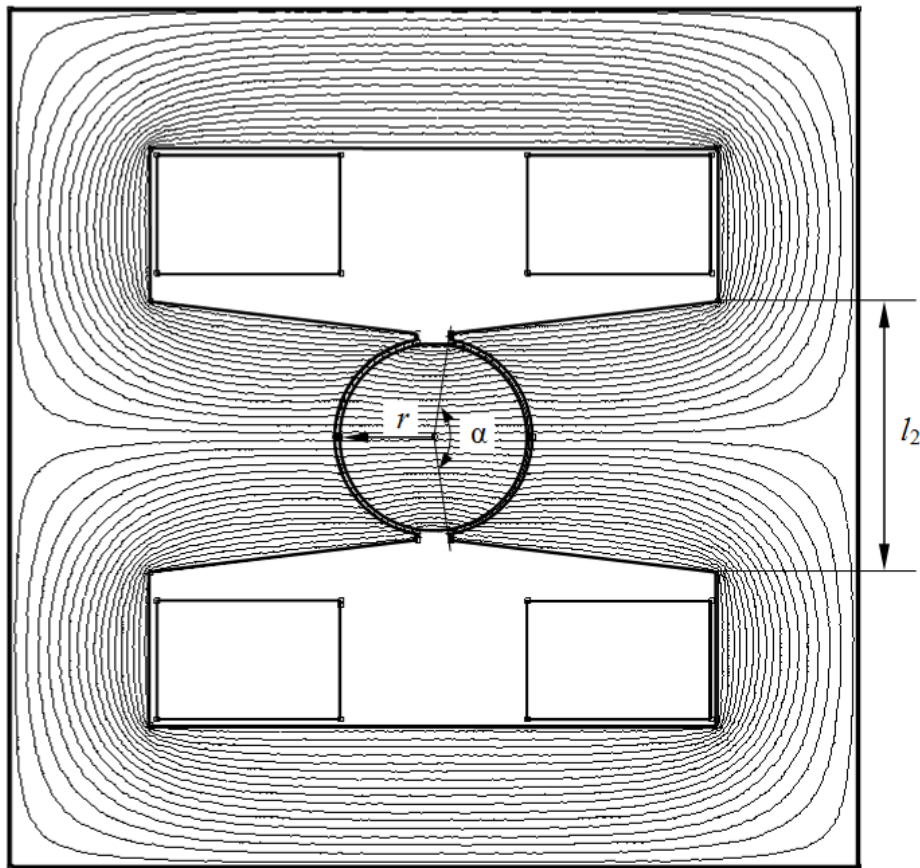
2.2 Применение корректирующего коэффициента в задачах определения магнитной проводимости

Как отмечалось в параграфе 2.1 расчет магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД рисунка 1.16 предполагается выполнять в декартовой системе координат по методикам, разработанным для магнитных систем с выраженной зубцово-пазовой зоной. Однако конструктивное исполнение элементов магнитной системы ЛЭМД рисунка 1.16, в предпологает трехмерное решение задачи определения магнитной проводимости. Полюса статора охватывают якорь частично, а область их взаимодействия определяется углом раскрытия полюсов α и числом пар полюсов z статора. Пренебрежение данными величинами может вызывать существенное увеличение погрешности значений магнитной проводимости. На основании этого вводится корректирующий коэффициент k_1 , учитывающий углом раскрытия полюсов α и числом пар полюсов z статора:

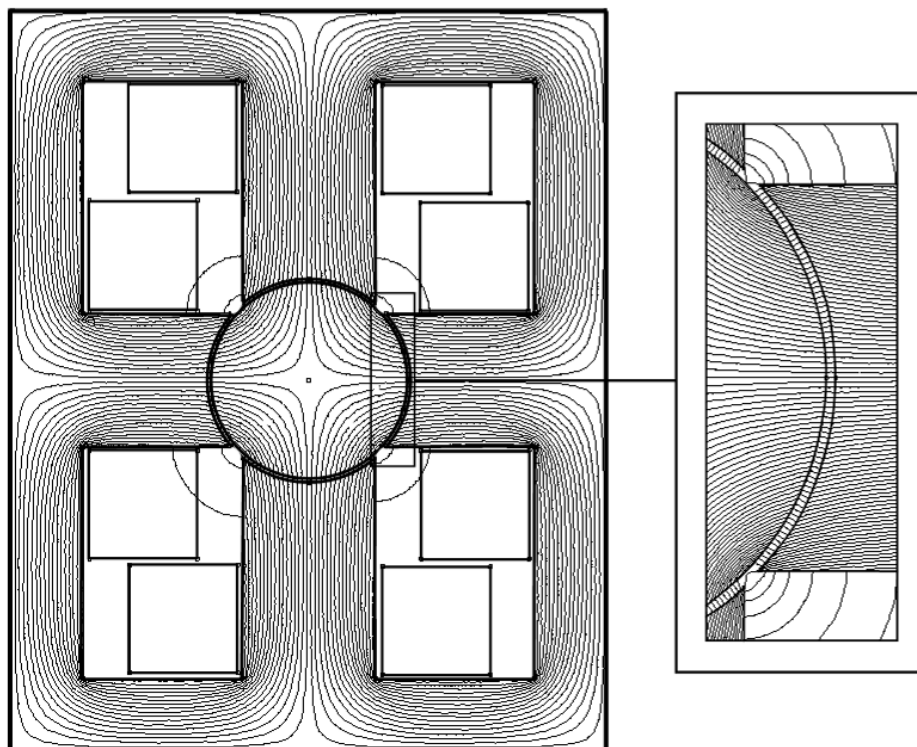
$$k_1 = (\alpha \cdot z) / 180. \quad (2.5)$$

Для оценки корректности вводимого коэффициента k_1 было выполнено сопоставление значений магнитной проводимости, полученных для осесимметричной постановки задачи с умножением на корректирующий коэффициент k_1 и для плоскопараллельной постановки задачи. Разница в объемах магнитных систем при изменении постановки задачи в численном эксперименте не превышала 2 %.

Линии магнитной индукции и геометрическая структура ЛЭМД с одной и двумя парами полюсов представлена на рисунке 2.4.



а



б

Рисунок 2.4 – Линии магнитной индукции и геометрическая структура ЛЭМД с одной и двумя парами полюсов

Значения магнитной проводимости определялись через значения энергии магнитного поля в воздушных зазорах зубцово-пазовой зоны двигателя согласно формуле (2.4).

Исследование выполнялось для числа пар полюсов статора $z_1 = 1$, $z_2 = 2$ и угла их раскрытия в интервале $\alpha_1 = 180 \div 115$ град, $\alpha_2 = 90 \div 58$ град соответственно. При этом учитывалось, что ширина полюса l_2 не должна быть меньше диаметра якоря для $z_1 = 1$ и радиуса якоря – для $z_2 = 2$ (рисунок 2.4).

В таблице 2.1 представлены минимально допустимые значения α в зависимости от числа пар полюсов z статора.

Таблица 2.1 – Определение минимального допустимого угла α

Число пар полюсов статора	Формула расчета минимальной длины полюса статора	Максимально допустимый угол α
1	$l_{2 \min} = 2r = \frac{\pi r \alpha}{90}$	115 град
2	$l_{2 \min} = r = \frac{\pi r \alpha}{180}$	57,5 град

В таблицу 2.2 были сведены значения корректирующего коэффициента k_1 в зависимости от значений α и z .

Таблица 2.2 – Значения корректирующего коэффициента k_1

Показатели	Значения показателей													
	1	0,972	0,944	0,917	0,889	0,861	0,833	0,806	0,778	0,750	0,722	0,694	0,667	0,639
k_1 , о.е.	180	175	170	165	160	155	150	145	140	135	130	125	120	115
α при $z_1 = 1$, град	90	87,5	85	82,5	80	77,5	75	72,5	70	67,5	65	62,5	60	57,5
α при $z_2 = 2$, град														

Ввиду двумерного построения конечно-элементных моделей, якорь двигателя имел форму сплошного цилиндра. Так как исследование проводится для конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, то при осесимметричной постановке

задачи было выполнено изменение формы якоря с представленной на рисунке 2.5, а, на вариант рисунка 2.5, б, при этом максимальная разница в получаемых значениях магнитной проводимости, выраженная в процентах, не превысила 0,3 %.

Конечно-элементное моделирование выполнялось при следующих геометрических соотношениях и размерах силовых элементов магнитной системы: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$, $c/a = 1,5$, $b/a = 1$, $l_3 = a \cdot n$, $n = 3$ и $a = 4$ мм. Радиус якоря определялся исходя из равенства площадей сечений якоря $S_1 = \pi r^2$ и зубцово-пазовой зоны $S_2 = 2\pi r a n = 2\pi r l_3$ (рисунок 2.5).

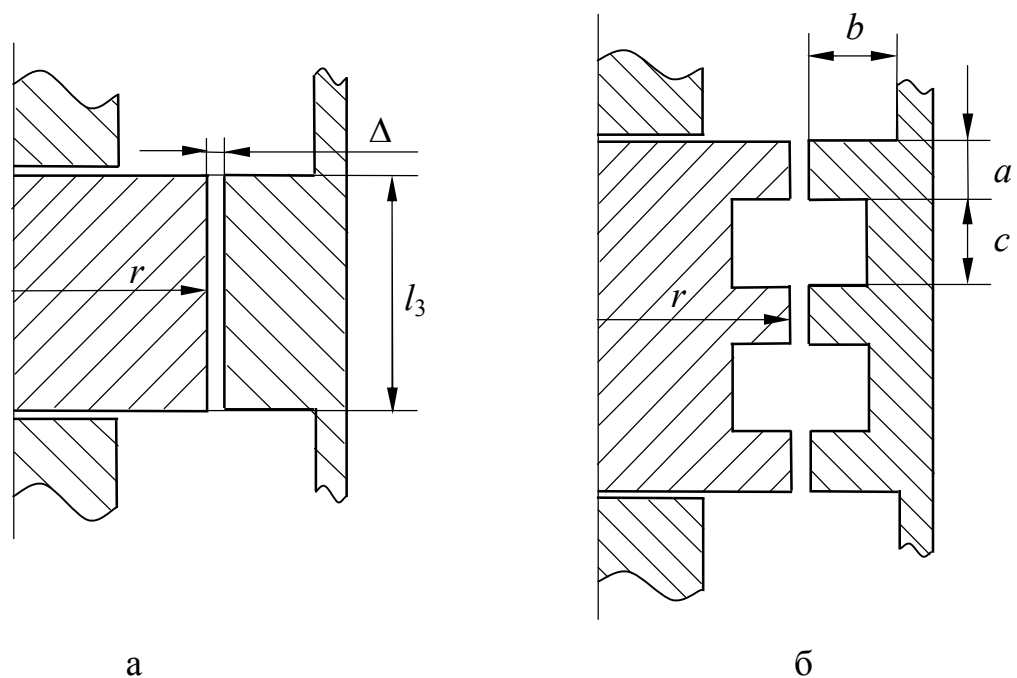


Рисунок 2.5 – Рабочие зоны ЛЭМД

В качестве наглядного примера на рисунке 2.6 в виде кривых представлены результаты конечно-элементного моделирования для случая $\Delta/a = 0,125$. Значения магнитной проводимости, полученные для случая $z_1 = 1$ и $z_2 = 2$, характеризуют соответственно кривые Λ_1 и Λ_2 . Значения магнитной проводимости, полученные при осесимметричной постановке задачи с умножением результатов на корректирующий коэффициент k_1 , для ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной рисунка 2.5, а характеризует кривая Λ_3 , а для ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной рисунка 2.5, б – кривая Λ_4 .

Установлено, что при изменении постановки задачи с осесимметричной на

плоскопараллельную разница в значениях магнитной проводимости, выраженная в процентах, при $z_1 = 1$ и $\alpha_1 = 180$ град не превышает 3 %, а для случая $z_2 = 2$ и $\alpha_2 = 90$ град – 4 %.

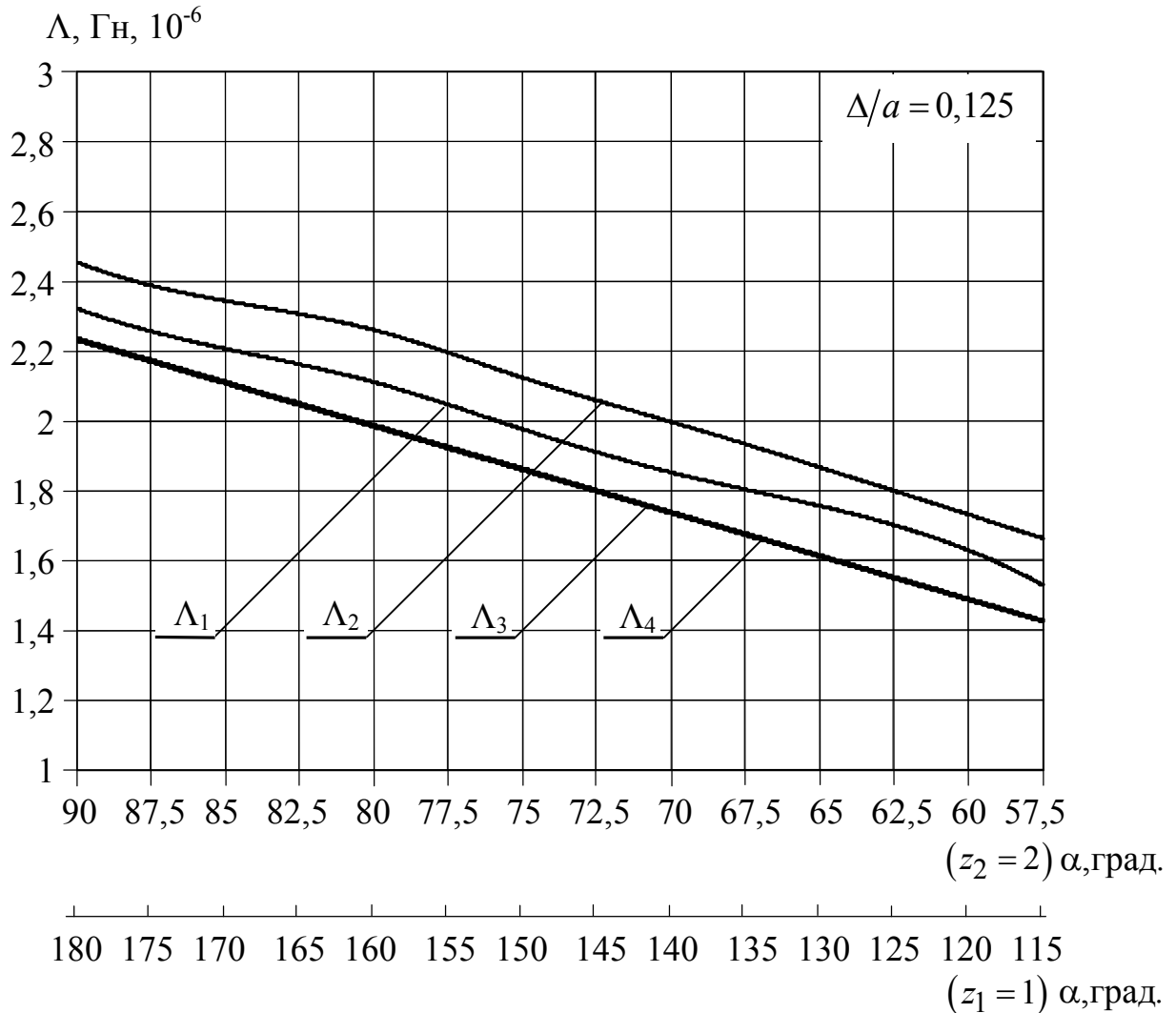


Рисунок 2.6 – Значения магнитной проводимости

При этом максимальная разница в значениях магнитной проводимости, полученных при изменении постановки задачи с осесимметричной на плоскопараллельную, выраженная в процентах, составляет 13 % при $\alpha_1 = 120$ град ($\alpha_2 = 60$ град).

На основании этого в формулу корректирующего коэффициента была введена корректировка, позволяющая учитывать разницу в значениях магнитной проводимости, полученных при осесимметричной и плоскопараллельной постановках задачи в численном эксперименте:

$$k_1 = (1,06 \cdot \alpha \cdot z) / 180. \quad (2.6)$$

При этом максимальная процентная разница в полученных значениях магнитной проводимости уменьшается в 2 раза. Предлагаемый корректирующий коэффициент k_1 может быть использован при численном моделировании вариантов ЛЭМД, геометрическая структура которых представлена на рисунке 2.4.

В параграфе 2.1 было установлено, что развертка двигателя при конечно-элементном моделировании не оказывает существенного влияния на получаемые значения магнитной проводимости. Поэтому для вариантов ЛЭМД рисунка 2.4 определение магнитной проводимости предлагается выполнять в развернутом виде с последующим умножением на соответствующее значение корректирующего коэффициента k_1 . Полученные при этом значения могут быть использованы для проверки точности результатов аналитических расчетов магнитной проводимости.

2.3 Сравнение подходов расчета магнитной проводимости, основанных на методе вероятных путей потока

Для расчета и анализа магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД, были выбраны подходы, основанные на методе вероятных путей потока, наиболее простые в расчете и обработке получаемых данных.

Расчет магнитной проводимости выполнялся с целью определения пределов использования представленных в данном параграфе методик для проектирования ЛЭМД, рассмотренных в параграфе 1.5. (рисунок 1.16).

Все рассматриваемые методики были разработаны для расчета магнитных систем с выраженной зубцово-пазовой зоной в декартовой системе координат. Для корректного сопоставления результатов, полученных аналитически и в ходе численного эксперимента, выполнялась развертка цилиндрических вариантов ЛЭМД. При эквивалентной замене цилиндрической структуры развернутой учитывались результаты, полученные в параграфе 2.1 и параграфе 2.2.

Расчет магнитной проводимости воздушных зазоров методом Ротерса (метод вероятных путей потока) на практике получил достаточно широкое применение благодаря наглядности и простоте использования. В известных работах [103, 104, 115] приведены расчетные формулы для определения магнитной проводимости ряда простых фигур, математическое выражение которых представляет собой частное от деления среднего значения поперечного сечения $S_{\text{ср}}$ на пути потока по рассматриваемому элементу на длину средней линии магнитной индукции $l_{\text{ср}}$. Поле выпучивания в данном случае описывается фигурами в виде четвертей и половин кругов и колец. Согласно данным, приведенным в [104], ширину половин и четвертей колец рекомендуется принимать равной $0,5\Delta \div 2\Delta$, где Δ – технологический воздушный зазор. Однако в реальных магнитных системах при достаточно близком расположении зубцов друг к другу на геометрические фигуры, определяющие поле выпучивания, существенное влияние оказывает межзубцовое расстояние c (рисунок 2.7), которое в [112-114] предлагается учитывать с помощью поправочного коэффициента φ .

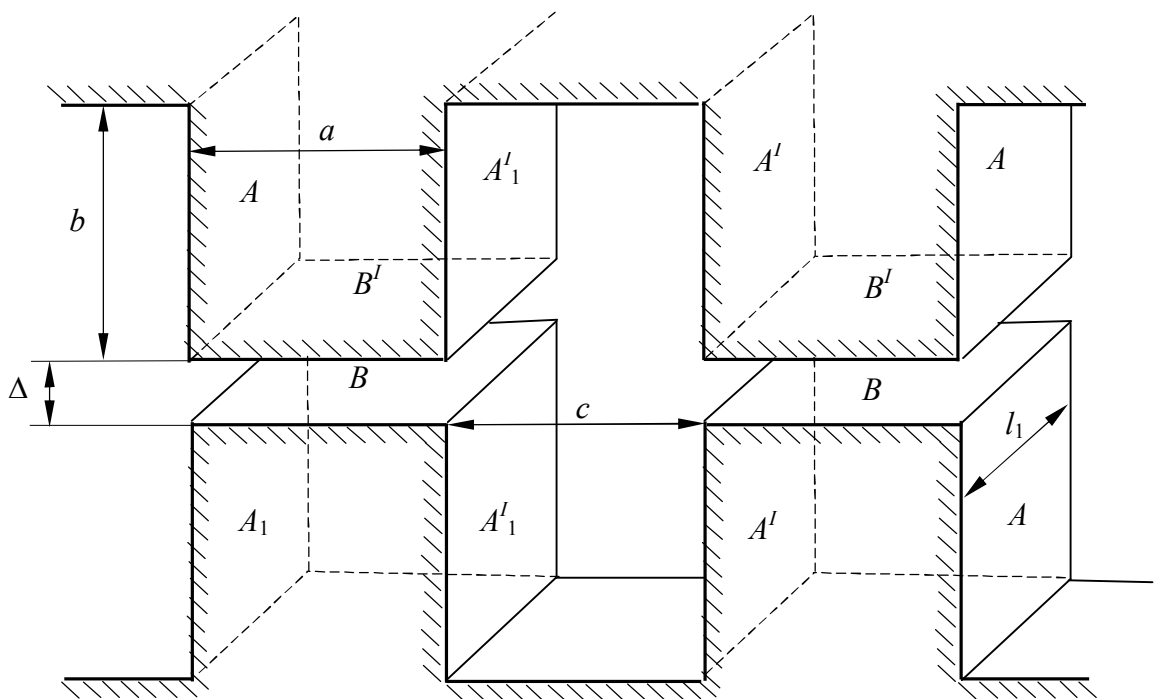


Рисунок 2.7 – Эскиз зубцово-пазовой зоны

Суть методики [114] заключается в следующем: при различных значениях межзубцового расстояния c магнитная проводимость поля выпучивания между гранями A^I и A^I_1 (рисунок 2.7), будет определяться с учетом поправочного коэффициента φ следующим образом:

при $c \geq 2b$

$$\Lambda_{\text{ц}} \cdot \varphi = \Lambda_{\text{ц}} \cdot 1 = 0,32\mu_0 l_1 \cdot \ln \frac{4b}{0,5\Delta}; \quad (2.7)$$

при $\Delta < c < 2b$

$$\Lambda_{\text{ц}} \cdot \varphi = \Lambda_{\text{ц}} \cdot \left(\frac{c - \Delta}{2b - \Delta} \right)^{1 + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2b - \Delta}{\Delta}}; \quad (2.8)$$

где l_1 – длина зубца, b – высота зубца, Δ – воздушный технологический зазор, c – межзубцовое расстояние, μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн.

Для случая $c \leq \Delta$ поправочный коэффициент $\varphi = 0$.

Магнитный поток между внешними гранями A и A_1 проходит в свободном пространстве и, следовательно, магнитная проводимость $\Lambda_{\text{ц}}$ в данном случае вычисляется при $\varphi = 1$, то есть без учета влияния межзубцового расстояния c .

Тогда формула магнитной проводимости для одной пары зубцов с учетом вышеизложенного и согласно [114] будет вычисляться как:

$$\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_{\text{п}} + \Lambda_{\text{ц}} \cdot (\varphi + 1) = \frac{\mu_0 a l_1}{\Delta} + 0,32\mu_0 l_1 \cdot \ln \frac{4b}{0,5\Delta} \cdot (\varphi + 1), \quad (2.9)$$

где $\Lambda_{\text{п}}$ – магнитная проводимость между гранями B и B^I , которая определяется геометрической фигурой в виде призмы и вычисляется согласно методу вероятных путей потока [104].

В работе [98] представлена методика расчета магнитной проводимости с учетом поправочного коэффициента α , полученного экспериментально при заданных геометрических соотношения зубцово-пазовой зоны двигателя.

В качестве примера на рисунке 2.8 представлена конфигурация простых геометрических фигур, получаемых при разбивке магнитного поля по предлагаемой методике.

Согласно [98] для соотношения $c/a \leq 1$ и значений смещения зубцов $x = 0$, $x = (a + c)/2$ поправочный коэффициент α зависит только от размера межзубцового расстояния c и обозначается через α_d . Для соотношения $1 < c/a \leq 2$ и значения смещения $x = (a + c)/2$ поправочный коэффициент α зависит только от ширины зубца a и обозначается через α_q .

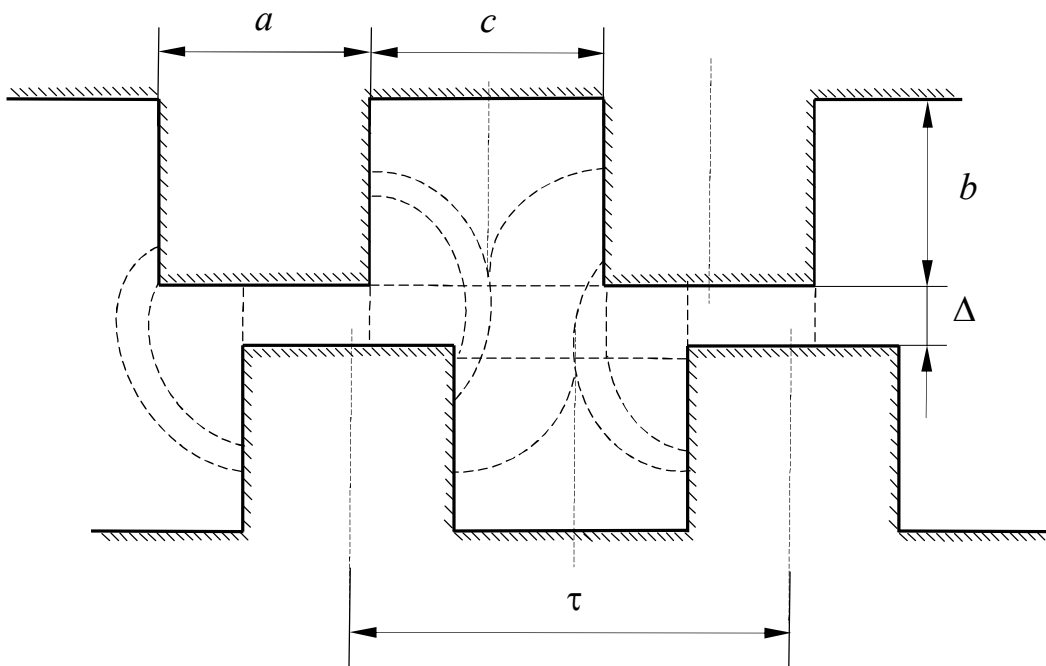


Рисунок 2.8 – Картина разбивки магнитного поля

В работе [98] представлен ряд кривых, определяющих значения коэффициентов α_q и α_d при заданных геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны двигателя.

Ниже приведены формулы расчета магнитной проводимости по рассматриваемой методике [98] для случая $c/a > 1$, в связи с тем, что для вариантов ЛЭМД рисунка 1.16 параграфа 1.5 данное геометрическое соотношение равно $c/a = 1,5$.

Учитывая то, что α_q и α_d являются переменными, коэффициент α можно представить как их среднеарифметическое:

$$\alpha = \frac{\alpha_q + \alpha_d}{2}. \quad (2.10)$$

При указанных допущениях формулы расчета магнитной проводимости примут следующий вид:

при $x = 0$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left[\frac{a}{\Delta} + \frac{2,3}{\alpha} \lg \left(1 + \frac{\alpha c}{\Delta} \right) \right]; \quad (2.11)$$

при $0 \leq x \leq \frac{c}{2}$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left\{ \frac{a-x}{\Delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[\lg \left(1 + \frac{\alpha x}{\Delta} \right) + \frac{1}{2} \lg \frac{\Delta + \alpha(c-x)}{\Delta + \alpha x} \right] + \frac{x}{\Delta + \alpha(c-x)} \right\}; \quad (2.12)$$

при $\frac{c}{2} \leq x \leq a$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left\{ \frac{a-x}{\Delta} + \frac{4,6}{\alpha} \left[\lg \left(1 + \frac{\alpha c}{2\Delta} \right) + \lg \frac{\Delta + \frac{\alpha c}{2}}{\Delta + \alpha(c-x)} \right] + \frac{c-x}{\Delta + \alpha(c-x)} \right\}; \quad (2.13)$$

при $a \leq x \leq \frac{c+a}{2}$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left\{ \frac{4,6}{\alpha} \left[\lg \frac{\Delta + \frac{\alpha c}{2}}{\Delta + \alpha(x-a)} + \lg \frac{\Delta + \frac{\alpha c}{2}}{\Delta + \alpha(c-x)} \right] + \frac{c-x}{\Delta + \alpha(c-x)} + \frac{x-a}{\Delta + \alpha(x-a)} \right\}; \quad (2.14)$$

при $x = \frac{c+a}{2}$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left[\frac{c-a}{\Delta + \frac{\alpha(c-a)}{2}} + \frac{9,2}{\alpha} \lg \frac{1 + \frac{\alpha c}{2\Delta}}{1 + \frac{\alpha(c-a)}{\Delta}} \right]. \quad (2.15)$$

Так же в [98] предлагается допущение, согласно которому коэффициент α линейно зависит от координаты смещения x зубцов якоря относительно зубцов статора, то есть $\alpha = \alpha_d - kx$, где $k = (\alpha_d - \alpha_q)/a$ при $c/a > 1$. При данном допущении формулы расчета магнитной проводимости примут следующий вид:

при $x = 0$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left[\frac{a}{\Delta} + \frac{2,3}{\alpha_d} \lg \left(1 + \frac{\alpha_d c}{\Delta} \right) \right]; \quad (2.16)$$

при $0 \leq x \leq \frac{c}{2}$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left\{ \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left[\lg \left(1 + \frac{(\alpha_d - kx)x}{\Delta} \right) + \frac{1}{2} \lg \frac{\Delta + (\alpha_d - kx)(c - x)}{\Delta + (\alpha_d - kx)x} \right] + \frac{a - x}{\Delta} + \frac{x}{\Delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \right\}; \quad (2.17)$$

при $\frac{c}{2} \leq x \leq a$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left\{ \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left[\lg \left(1 + \frac{(\alpha_d - kx)c}{2\Delta} \right) + \lg \frac{\Delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\Delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \right] + \frac{a - x}{\Delta} + \frac{c - x}{\Delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \right\}; \quad (2.18)$$

при $a \leq x \leq (c + a)/2$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left\{ \frac{4,6}{\alpha_d - kx} \left[\lg \frac{\Delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\Delta + (\alpha_d - kx)(x - a)} + \lg \frac{\Delta + (\alpha_d - kx)c/2}{\Delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} \right] + \frac{c - x}{\Delta + (\alpha_d - kx)(c - x)} + \frac{x - a}{\Delta + (\alpha_d - kx)(x - a)} \right\}; \quad (2.19)$$

при $x = \frac{c+a}{2}$

$$\Lambda = nl_1\mu_0 \left[\frac{c-a}{\Delta + \alpha_q(c-a)/2} + \frac{9,2}{\alpha_q} \lg \frac{1 + \frac{\alpha_q c}{2\Delta}}{1 + \frac{\alpha_q(c-a)}{\Delta}} \right]. \quad (2.20)$$

Согласно исследованиям, представленным в [98], относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости, полученных по предлагаемой методике, не превышает 15 %.

В [117] рассмотрена **методика расчета магнитной проводимости с учетом мнимого угла**. Суть методики состоит в том, что фактические боковые стенки зубцов предлагается заменять фиктивными, с наклоном к горизонтальной линии под углом β (рисунок 2.9), с целью уменьшения погрешности расчетов, возникающей при замене реального магнитного поля набором геометрических фигур. При этом магнитная проводимость в воздушном зазоре определяется набором геометрических фигур согласно рисунку 2.9.

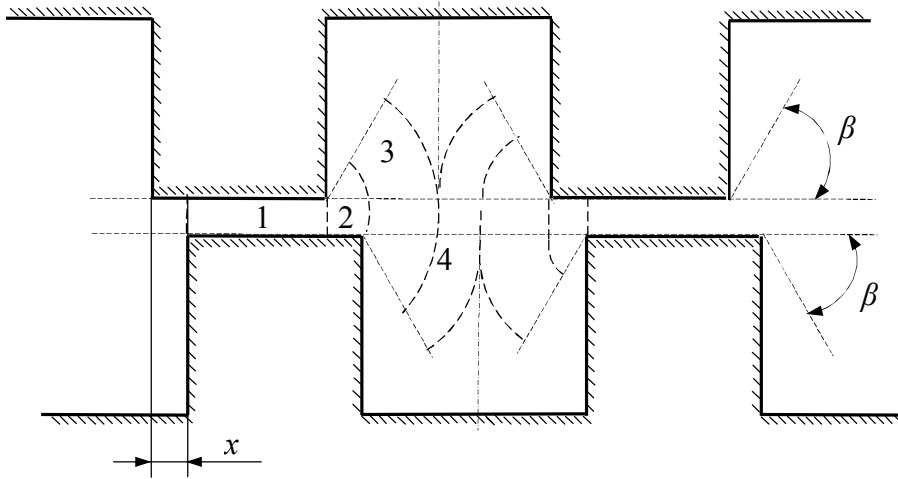
Согласно [117] при $\beta=1$ рад формулы расчета магнитной проводимости могут быть преобразованы и даны в виде функции угла рассогласования θ зубцов якоря относительно зубцов статора, который определяется как:

$$\theta = \frac{\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + x^2}}, \quad (2.21)$$

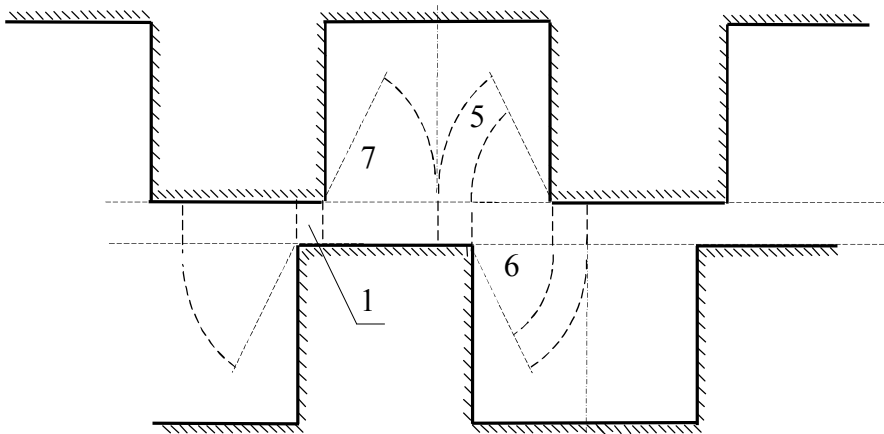
где Δ – технологический воздушный зазор, x – значение смещения зубцов якоря относительно зубцов статора.

Для угла рассогласования в пределах $0 \leq \theta \leq 1$ магнитная проводимость определяется следующим образом (рисунок 2.9, а):

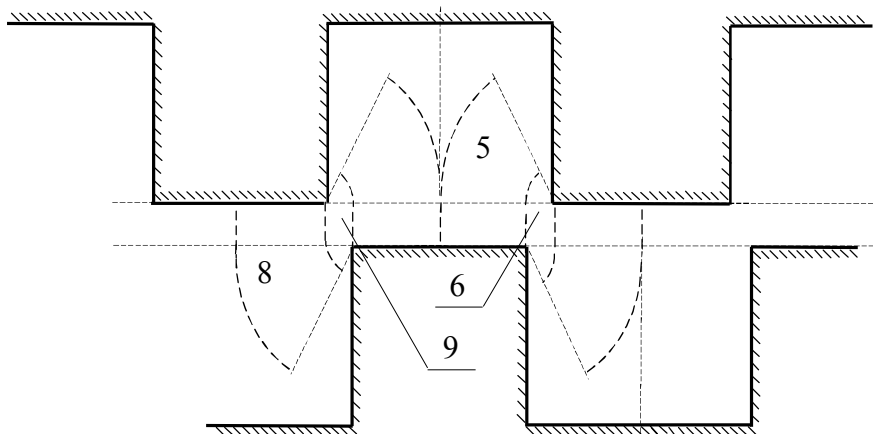
$$\Lambda_I = \Lambda_1 + 2\Lambda_2 + 2\Lambda_3 + \Lambda_4 = nl_1\mu_0 \left[\frac{a - \theta c/2}{\Delta} + 2 \ln \left(1 + \frac{\theta c/2}{\Delta} \right) + \ln \left(\frac{c - \theta c/2 + \Delta}{\theta c/2 + \Delta} \right) + \frac{\theta c/2}{c - \theta c/2 + \Delta} \right]; \quad (2.22)$$



а



б



в

Рисунок 2.9 – Картина разбивки магнитного поля

Для случая, изображенного на рисунке 2.9, б, и угла рассогласования $1 \leq \theta \leq a/0,5c$ магнитная проводимость определяется как:

$$\Lambda_{II} = \Lambda_1 + 2\Lambda_7 + 2\Lambda_5 + \Lambda_6 = nl_1\mu_0 \left[\frac{a - \theta c/2}{\Delta} + 2 \ln \left(1 + \frac{c}{2\Delta} \right) + 2 \ln \left(\frac{c/2 + \Delta}{c - \theta c/2 + \Delta} \right) + \frac{c - \theta c/2}{c - \theta c/2 + \Delta} \right]; \quad (2.23)$$

Для угла рассогласования в пределах $a/0,5c \leq \theta \leq (a + c)/c$ магнитная проводимость определяется следующим образом (рисунок 2.9, в):

$$\Lambda_{III} = 2\Lambda_5 + \Lambda_6 + 2\Lambda_8 + \Lambda_9 = nl_1\mu_0 \left[2 \ln \left(\frac{0,5c + \Delta}{c - \theta c/2 + \Delta} \right) + \ln \left(\frac{c - \theta c/2}{c - \theta c/2 + \Delta} \right) + 2 \ln \left(\frac{0,5c + \Delta}{\theta c/2 - a + \Delta} \right) + \frac{\theta c/2 - a}{\theta c/2 - a + \Delta} \right]. \quad (2.24)$$

Согласно [117] относительная погрешность при расчетах магнитной проводимости по предлагаемой методике не превышает 15 %.

С целью определения пределов использования представленных методик при проектировании ЛЭМД, представленных в параграфе 1.5 (рисунок 1.16), был выполнен расчет магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовых зон двигателей с последующим сопоставлением результатов со значениями численного эксперимента для плоскопараллельной постановке задачи.

Аналитические расчеты выполнялись для числа зубцов якоря $n = 5$ при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ при $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$, $a = 4$ мм, $b/a = 1$, $c/a = 1,5$, $l_1/a = 11$.

Исходя из равенства между собой размеров зубцов и, как следствие, равенства магнитных проводимостей отдельных участков силовых элементов магнитной системы ($\Lambda_1 = \Lambda_1^I = \dots = \Lambda_n = \Lambda_n^I = \Lambda$), суммарная магнитная проводимость для зубцово-пазовой зоны ЛЭМД с одним технологическим воздушным зазором Δ (рисунок 2.10, а) будет рассчитываться, как:

$$\Lambda_{\Sigma} = n\Lambda, \quad (2.25)$$

а для зубцово-пазовой зоны ЛЭМД с двумя технологическим воздушным зазорами $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$ (рисунок 2.10, б) и с учетом схемы замещения (рисунок 2.11), формула суммарной магнитной проводимости примет вид [115, 124, 126]:

$$\Lambda_{\Sigma} = \frac{n \cdot \Lambda}{2}. \quad (2.26)$$

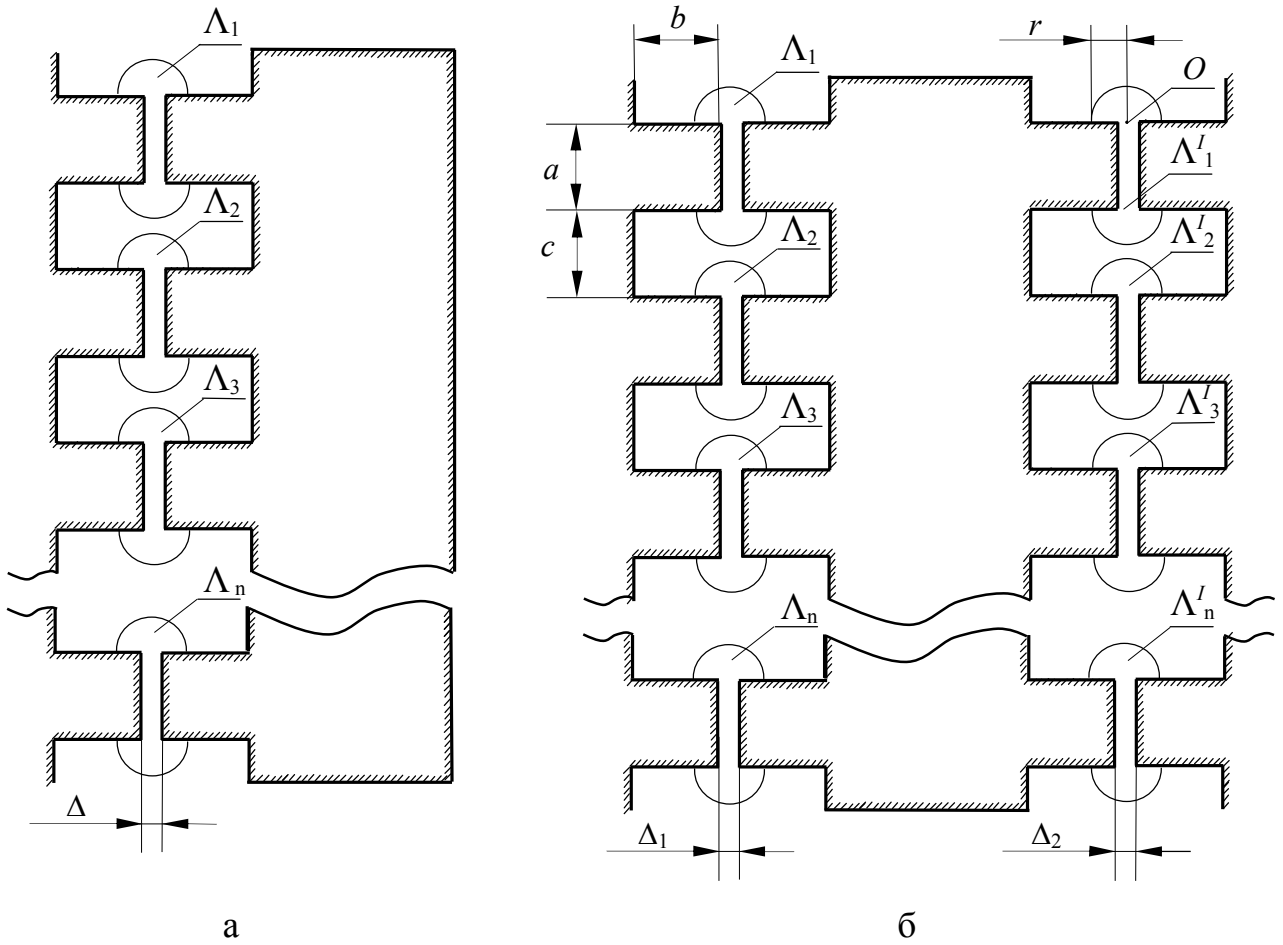


Рисунок 2.10 – К расчету магнитной проводимости

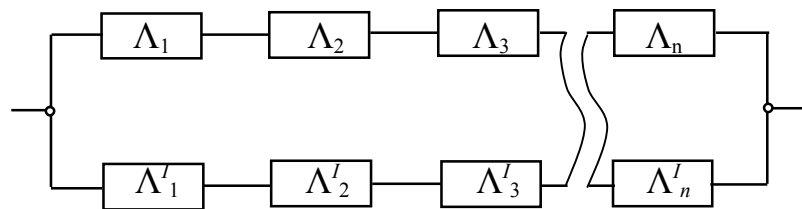


Рисунок 2.11 – Схема замещения при расчете магнитной проводимости

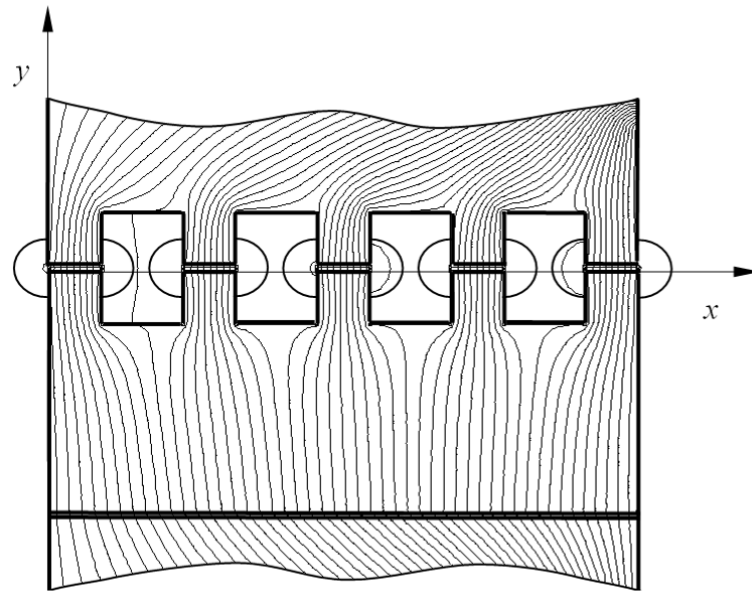
При расчете магнитной проводимости значению смещения зубцов якоря относительно зубцов статора $x = 5$ мм соответствовало положение якоря, при котором он выдвинут на величину рабочего хода $x = (a + c)/2$, а положению, изображенному на рисунке 2.10 – значение $x = 0$ мм.

Характер распределения линий магнитной индукции в области зубцово-пазовых зон ЛЭМД с одним и двумя воздушными технологическими зазорами представлен на рисунке 2.12.

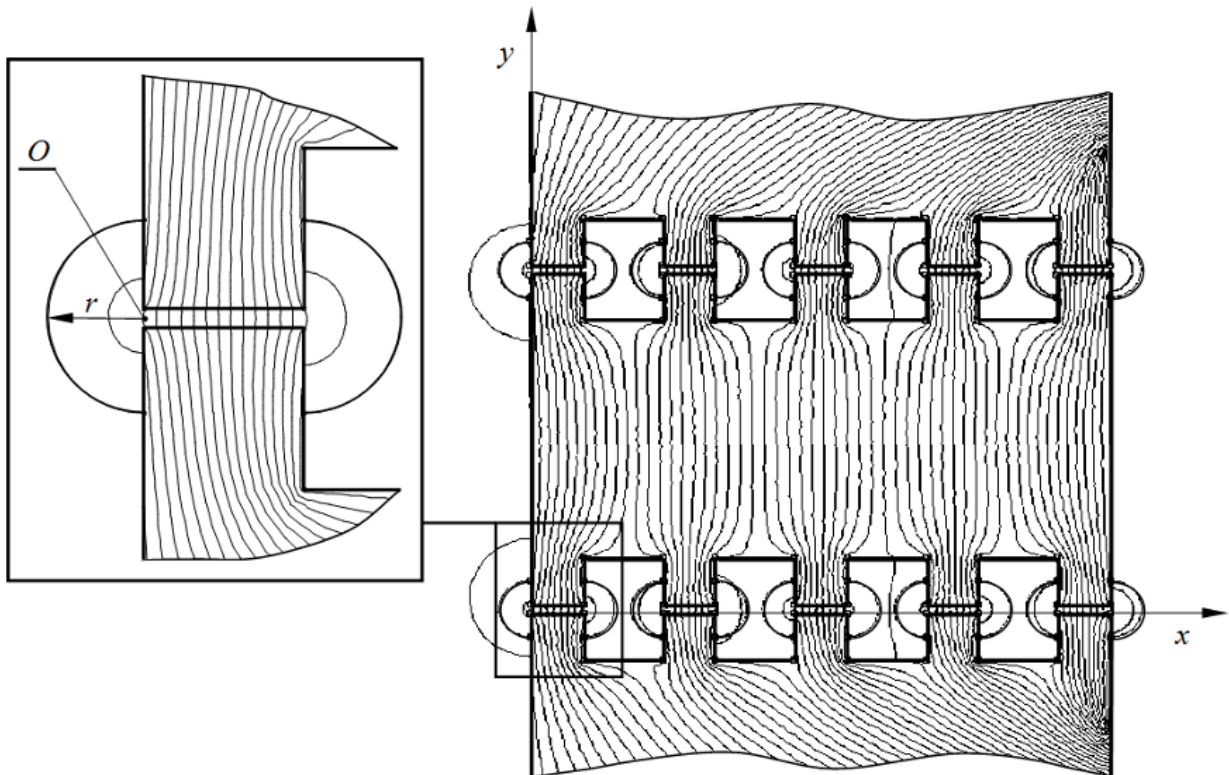
При конечно-элементном моделировании воздушное пространство зубцово-пазовой зоны ограничивалось полуокружностями с радиусом r , так как данная форма отражает геометрию простых фигур, описывающих поле выпучивания по методу вероятных путей потока. Полуокружности с радиусом r проводились из точки O с координатой по оси ординат $y = \Delta/2$ (рисунок 2.12, б).

Значение радиуса r определялось из геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны магнитной системы: $r = 0,4c$ для $0,4c \leq b$ и $r = b$ для $0,4c \geq b$. При предлагаемых значениях r на всем интервале рабочего хода якоря $x = (a + c)/2$ не возникает перекрытия ограничиваемых полуокружностями областей между собой. Введение данного ограничения позволяет снизить погрешность расчетных значений магнитной проводимости при использовании одного и того же значения радиуса r в аналитических расчетах и численном эксперименте.

Для обеспечения минимального расхождения между значениями магнитной проводимости, получаемыми аналитически и в ходе численного эксперимента, конечно-элементное моделирование проводилось для интервала значений индукции в стали $B_{ст} = 0,2 \div 0,8$ Тл. Данный диапазон значений $B_{ст}$ находится на участке кривой намагничивания конструкционной стали марки Ст3, обеспечивающей линейную зависимость $B_{ст}$ от напряженности магнитного поля H (рисунок 2.13).



а



б

Рисунок 2.12 – Распределение линий магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД

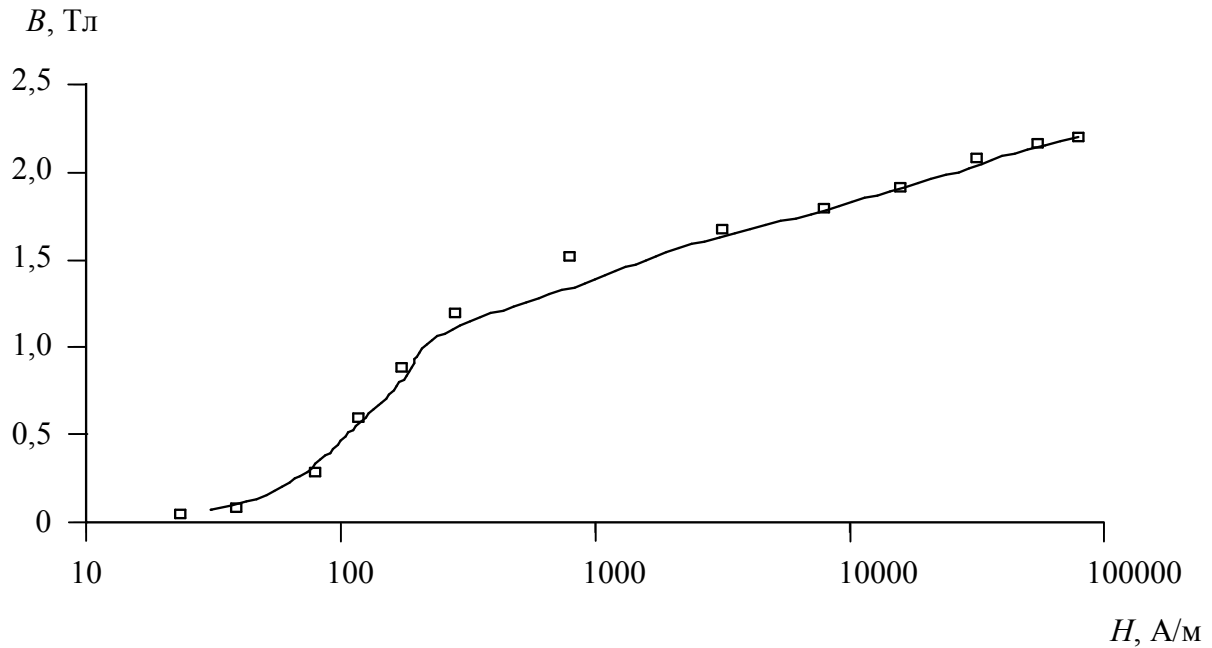


Рисунок 2.13 – Кривая намагничивания стали

В качестве наглядного примера на рисунках 2.14-2.15 представлены результаты расчета магнитной проводимости по описанным выше методикам для варианта ЛЭМД, зубцово-пазовая зона которого изображена на рисунке 2.12, а.

Относительную погрешность расчетных значений магнитной проводимости определяли следующим образом:

$$\Lambda_{\%} = \frac{|\Lambda_{\text{экс}} - \Lambda_{\text{р}}|}{X_{\text{экс}}} \cdot 100\%, \quad (2.27)$$

где $\Lambda_{\text{экс}}$ – экспериментальное значение магнитной проводимости, полученное в ходе численного эксперимента, $\Lambda_{\text{р}}$ – расчетное значение магнитной проводимости.

Расчетные значения магнитной проводимости, полученные по методу вероятных путей потока [104], представлены на рисунке 2.14 в виде кривой обозначенной через $\Lambda_{\text{р1}}$ для соотношения $\Delta/a = 0,075$ и $\Lambda_{\text{р1}}^I$ – для $\Delta/a = 0,2$, а значения, полученные по методике, предложенной в [114] (формула (2.8)) – через $\Lambda_{\text{р2}}$ и $\Lambda_{\text{р2}}^I$ соответственно для соотношений размеров $\Delta/a = 0,075$ и $\Delta/a = 0,2$.

Результаты численного эксперимента представлены в виде кривых, обозначенных через $\Lambda_{\text{экс}}$ и $\Lambda_{\text{экс}}^I$ для $\Delta/a = 0,075$ и $\Delta/a = 0,2$ соответственно.

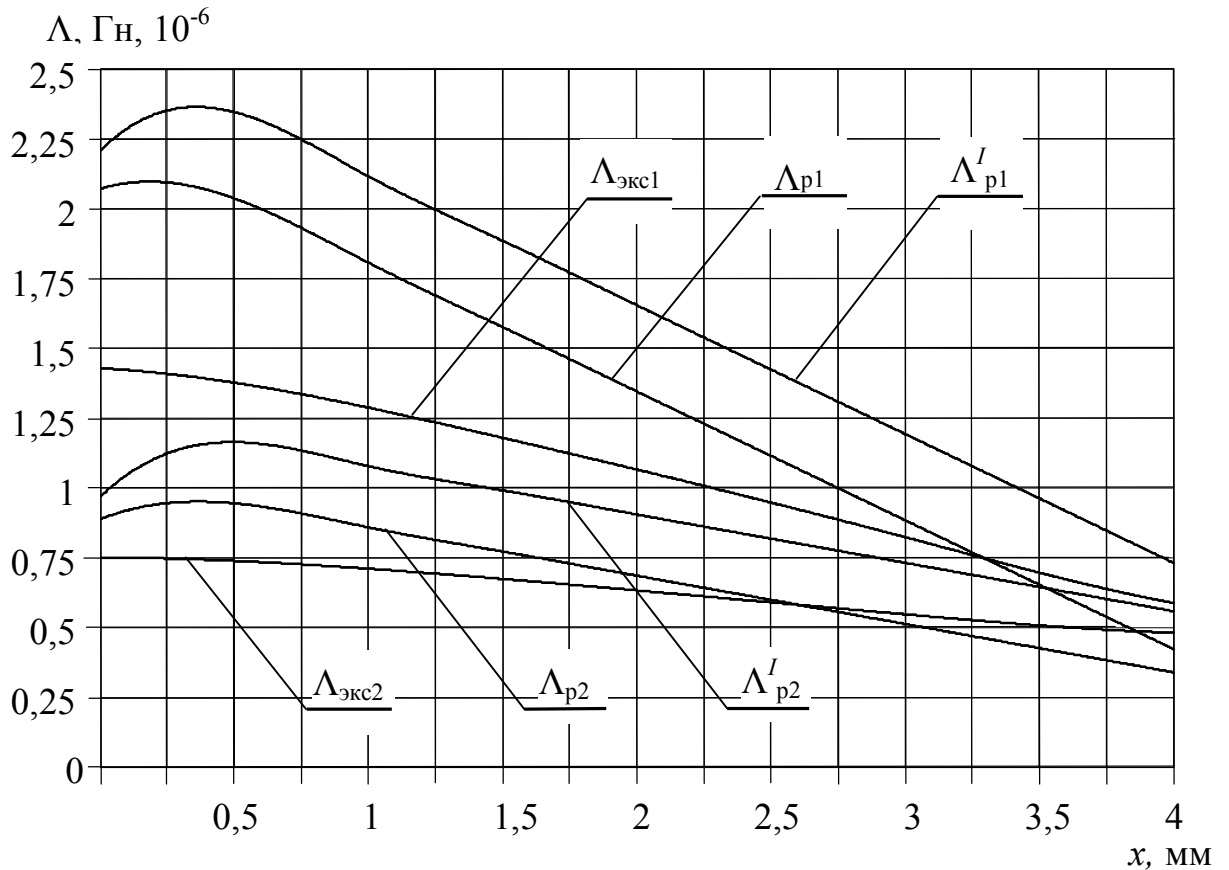
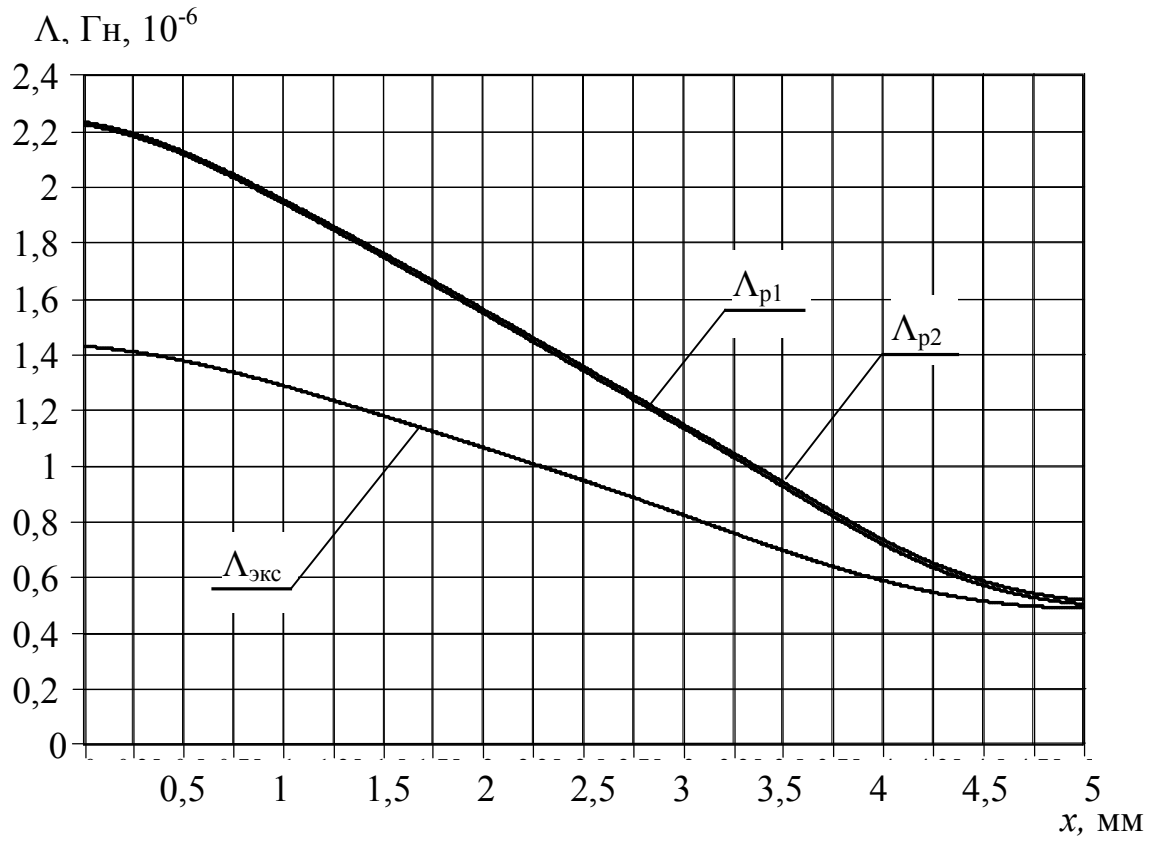


Рисунок 2.14 – График зависимости магнитной проводимости от значения смещения x зубцов

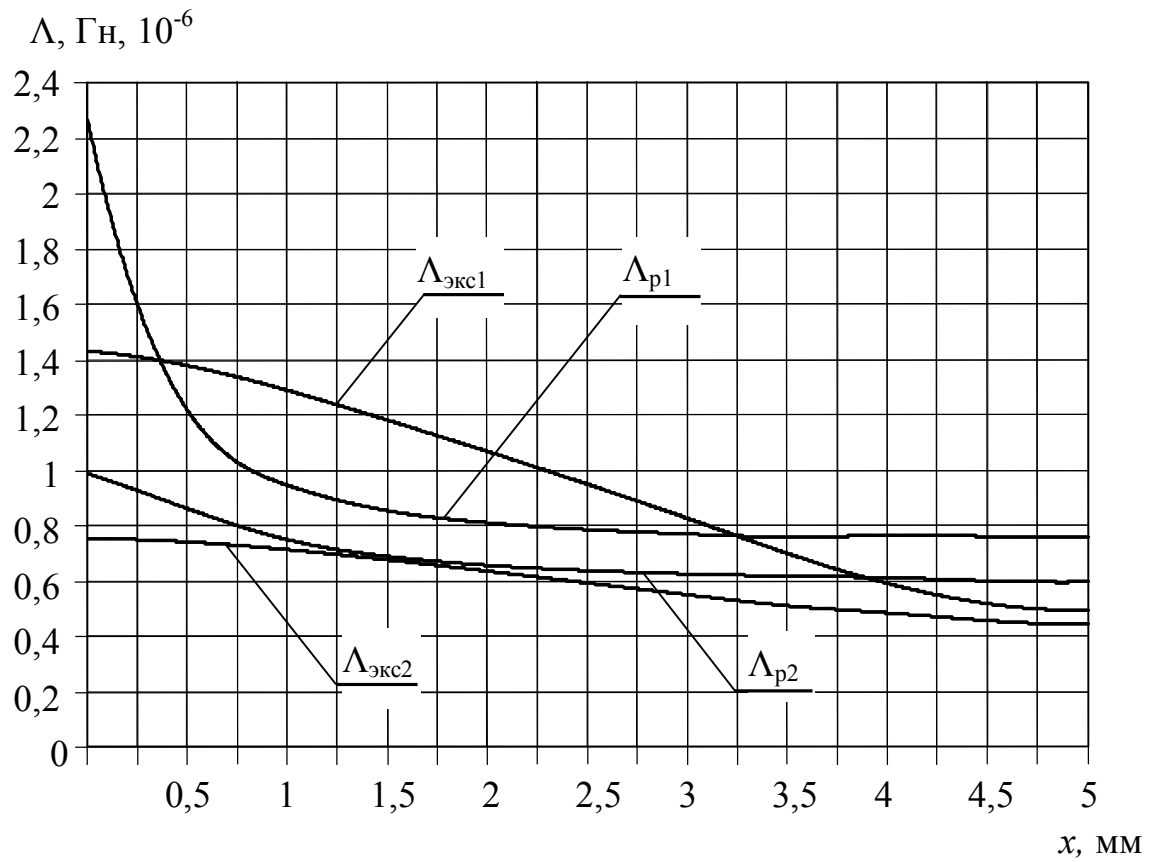
Установлено, что максимальная относительная погрешность значений магнитной проводимости, полученных методом вероятных путей потока, не превышает 25 % для соотношения $\Delta/a = 0,2$, и 47% – для соотношения $\Delta/a = 0,075$.

Максимальная относительная погрешность значений магнитной проводимости, полученных по методике [117], составило 57 % для соотношения $\Delta/a = 0,2$ и 70 % – для соотношения $\Delta/a = 0,075$.

Результаты расчета для $\Delta/a = 0,075$ по методике, предложенной в [98], с учетом коэффициентов α (формулы (2.11)-(2.15)) и k (формулы (2.16)-(2.20)) представлены на рисунке 2.15, а в виде кривых, обозначенных соответственно через $\Lambda_{\text{р1}}$ и $\Lambda_{\text{р2}}$, а через $\Lambda_{\text{экс}}$ – значения, полученные в ходе численного эксперимента. При этом максимальная относительная погрешность расчетных значений при использовании поправочного коэффициента α достигает 55 %, а с учетом поправочного коэффициента k – 53 %.



а



б

Рисунок 2.15 – График зависимости магнитной проводимости от значения смещения x зубцов

Расчет магнитной проводимости для соотношения $\Delta/a = 0,2$ не производился из-за отсутствия в [98] расчетных значений α и k для данного соотношения.

Высокая относительная погрешность результатов аналитических расчетов в данном случае может быть связана с тем, что экспериментальные значения магнитной проводимости были получены для магнитных систем, геометрические размеры которых в 40-80 раз превышали расчетные. Данное масштабирование осуществлялось из-за отсутствия технических возможностей при проведении эксперимента.

Значения магнитной проводимости, полученные по методике, описанной в [114] (формулы (2.22)-(2.24)), и в результате численного эксперимента при $\Delta/a = 0,075$, представлены на рисунке 2.15, б в виде кривых, обозначенных соответственно через Λ_{p1} и $\Lambda_{\text{экс1}}$, а при $\Delta/a = 0,2$ – соответственно через Λ_{p2} и $\Lambda_{\text{экс2}}$. Максимальная относительная погрешность расчетных значений при этом составила 58 % для соотношения $\Delta/a = 0,075$ и 35% – для соотношения $\Delta/a = 0,2$.

В ходе выполнения аналогичных исследований для варианта ЛЭМД, зубцово-пазовая зона которого представлена на рисунке 2.10, б, было выявлено, что максимальная относительная погрешность значений магнитной проводимости для диапазона соотношений $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ по рассмотренным методикам составляет: 20-50 % для значений, полученным по формулам из [104]; по методике, предложенной в [114] - 55-66 %; для значений, полученным по формулам (2.22)-(2.23) -30-50%, а по формулам (2.11)-(2.20) - 48%.

В результате проведенного исследования было установлено, что:

- Все рассмотренные методики показывают оригинальные подходы к расчету магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД и представляют собой сочетание теоретических и экспериментальных данных. Это в очередной раз доказывает, что, в сравнении с результатами экспериментов, выразить магнитную проводимость в строго аналитической форме при малой погрешности довольно проблематично, так как определяющие ее кривые не поддаются точному аналитическому описанию.

- Увеличение значения соотношения Δ/a в 2,7 раза (при $a = \text{const}$) в численном эксперименте, приводит к уменьшению магнитной проводимости в 1,8 раза и снижению относительной погрешности расчетных значений в 1,2-1,9 раза. На основании этого можно сделать предположение, что с ростом значения Δ происходит уменьшение погрешности расчетных значений магнитной проводимости.

- Все рассмотренные методики дают высокую относительную погрешность расчетных значений и не подходят для расчета магнитной проводимости рассматриваемых вариантов ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной. Это вызывает необходимость разработки методики расчета, обеспечивающей получение результатов на всем интервале рабочего хода якоря с относительной погрешностью не превышающей 15 % [124].

- Было выдвинуто предположение, что высокая относительная погрешность связана с тем, что во всех рассматриваемых методиках поправочные коэффициенты вводились для составляющих магнитной проводимости, определяемых геометрическими фигурами в виде полукругов и полуколец. Это позволило предположить, что для уменьшения относительной погрешности расчетных значений необходимо применять поправочные коэффициенты к составляющей магнитной проводимости, занимающей наибольшую долю в ее суммарном значении.

2.4 Выводы

1. Выполнена развертка цилиндрических вариантов исполнения ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной. Установлено, что при эквивалентной замене цилиндрической структуры развернутой максимальная разница в значениях магнитной проводимости, выраженная в процентах, не превышает 8%, и 14% – в значениях статического тягового усилия.

2. Предложен корректирующий коэффициент k_1 , позволяющий получать значения магнитной проводимости с максимальной относительной погрешностью, не превышающей 14% для отношения технологического воздушного зазора Δ к ширине зубца a в диапазоне $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$.

3. Выполнен сравнительный анализ методик расчета магнитной проводимости, разработанных на основе метода вероятных путей потока. Установлено, что используемые методики имеют высокую относительную погрешность в определении магнитной проводимости рассматриваемых вариантов ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной в диапазоне соотношений $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$.

4. Для уменьшения погрешности расчетных значений предлагается применять поправочные коэффициенты к составляющей магнитной проводимости, имеющей наибольшую долю в ее суммарном значении.

3 ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЗАЗОРОВ ЗУБЦОВО-ПАЗОВОЙ ЗОНЫ

3.1 Исследование и учет фактического влияния геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны при определении магнитной проводимости

3.1.1 Исследование и учет влияния размеров воздушного технологического зазора при определении магнитной проводимости

Исследования, выполненные во второй главе диссертации, позволили предположить, что определение и последующая корректировка в аналитических расчетах составляющих магнитной проводимости, оказывающих наибольшее влияние на ее суммарное значение Λ_{Σ} , позволит снизить погрешность расчетных значений Λ_{Σ} .

Для определения долей составляющих магнитной проводимости в ее суммарном значении Λ_{Σ} был выполнен численный эксперимент при плоскопараллельной постановке задачи.

Исследование проводилось для одной пары зубцов с целью исключения влияния на получаемые значения магнитной проводимости потоков выпучивания от соседних зубцов. Воздушное пространство зубцово-пазовой зоны при этом ограничивалось набором простых геометрических фигур, определяемых согласно методу вероятных путей потока (рисунок 3.1). Форма данных фигур характеризует картину магнитного поля в зубцово-пазовой зоне магнитной системы (рисунок 3.2).

Каждой фигуре было присвоено соответствующее числовое обозначение. Внешний радиус фигур в виде полукругов и полуколец определялся как $r_i = m(i-1)$, где i – числовой индекс фигуры согласно рисунку 3.1. Максимальное

значение r_i удовлетворяло условию $r_p \leq b$. Согласно [104] значение m принималось равным $\Delta/2$.

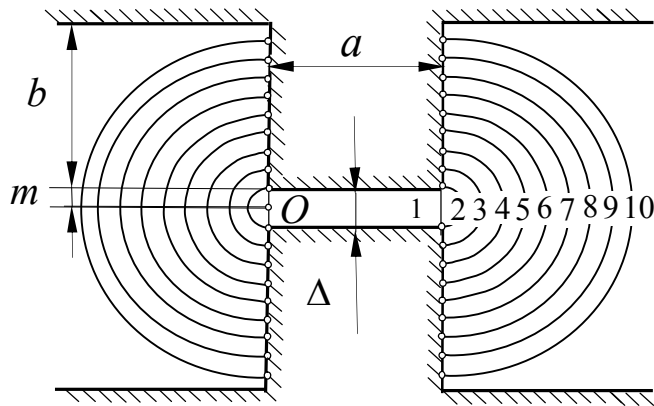


Рисунок 3.1 – Картина разбивки магнитного поля

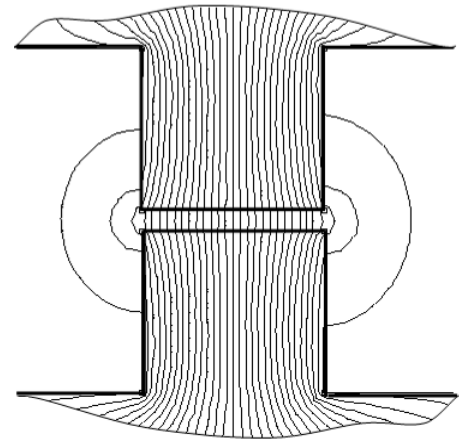


Рисунок 3.2 – Распределение линий магнитной индукции

Численное моделирование выполнялось при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны магнитной системы: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$, $a/b = 1$, $l_1/a = 11$. Длина зубца l_1 на рисунке 3.1 не показана.

Исследование проводилось для значений индукции в стали в диапазоне $B_{ст} = 0,2 \div 0,5$ Тл с целью определения значения $B_{ст}$, при котором достигается минимальное расхождение расчетных значений магнитной проводимости и результатов численного эксперимента.

На рисунке 3.3 в виде кривых представлены результаты исследования по суммарным значениям магнитной проводимости Λ_{Σ} . Кривые, характеризующие значения магнитной проводимости, полученные расчетным путем и в ходе численного эксперимента обозначены соответственно через Λ_p и $\Lambda_{экс}$. Кривые с числовым индексом 1 и 2 характеризуют значения магнитной проводимости для значений $B_{ст} = 0,2$ Тл и $B_{ст} = 0,3$ Тл, с индексом 3 и 4 – соответственно для $B_{ст} = 0,4$ Тл и $B_{ст} = 0,5$ Тл.

Установлено, что при увеличении значения индукции в стали происходит снижение относительной погрешности расчетных значений, полученных согласно

методу вероятных путей потока. Так для соотношения $\Delta/a = 0,125$ и значения $B_{ст} = 0,2$ Тл относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости составляет – 59 %, а при значении $B_{ст} = 0,5$ Тл – 50%.

Для установления возможной причины высокой погрешности аналитических значений магнитной проводимости были определены доли составляющих магнитной проводимости, полученных аналитически и в ходе численного эксперимента. Результаты исследования представлены на рисунке 3.4 и рисунке 3.5.

Установлено, что значения составляющих магнитной проводимости, полученные согласно методу вероятных путей потока практически в два раза больше, значений полученных в результате численного эксперимента. При этом доли составляющих магнитной проводимости в ее суммарном значении Λ_{Σ} практически совпадают.

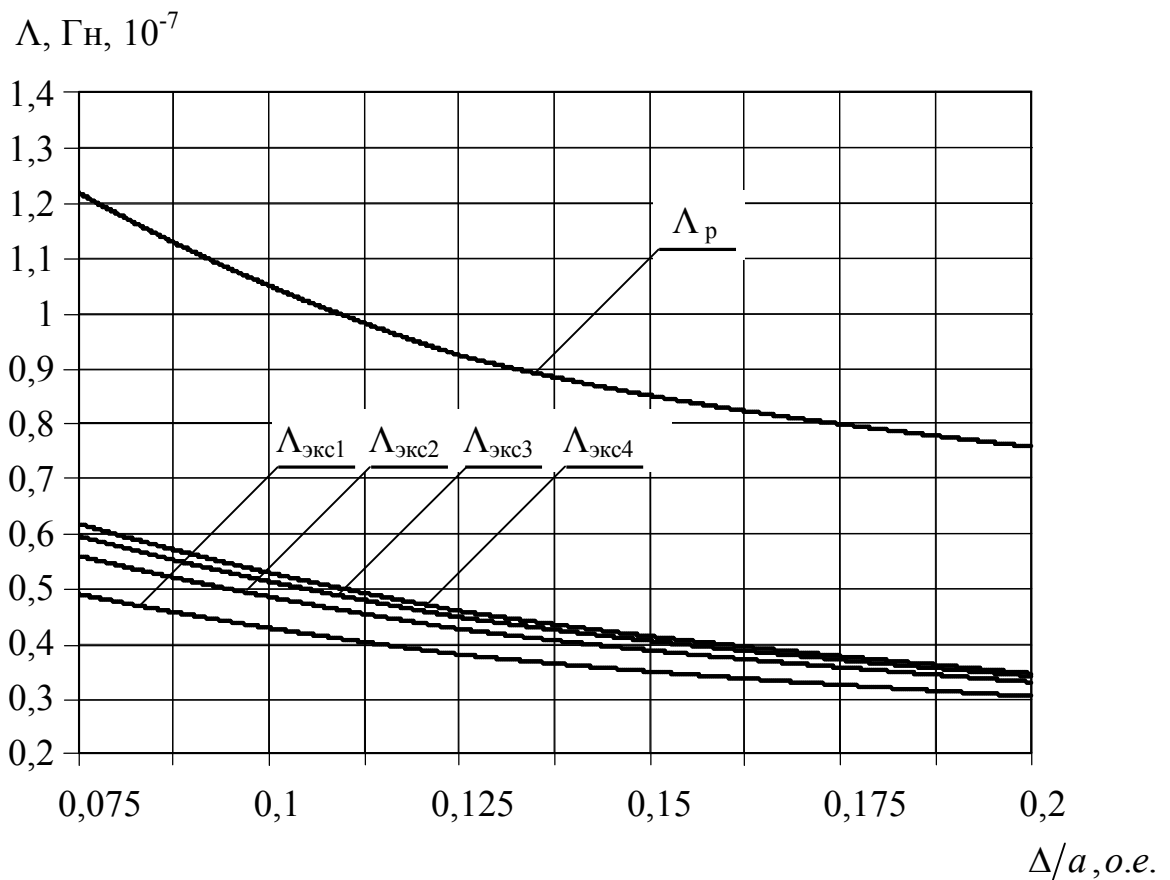
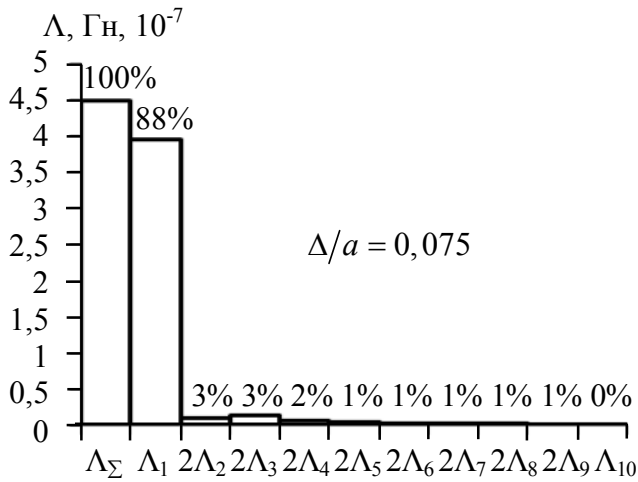
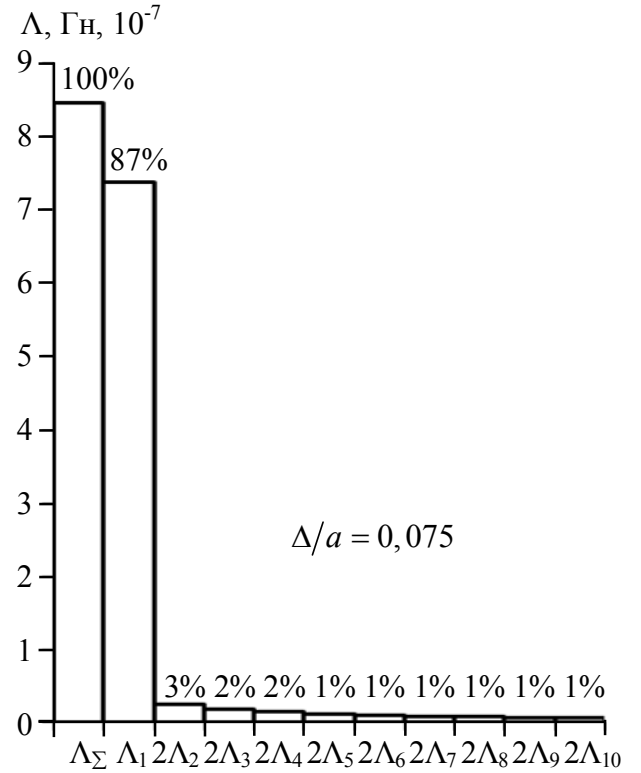


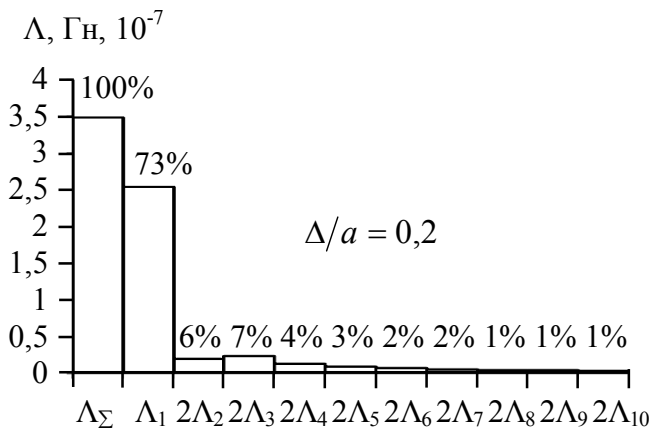
Рисунок 3.3– Значения магнитной проводимости при различных соотношениях Δ/a



а

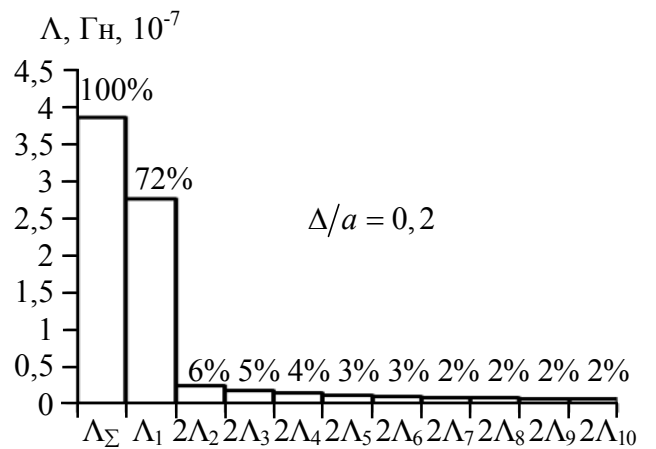


а



б

Рисунок 3.4 – Относительные значения составляющих магнитной проводимости



б

Рисунок 3.5 – Относительные значения составляющих магнитной проводимости согласно методу Ротерса

Выявлено, что в диапазоне значений $B_{ст} = 0,2 \div 0,5$ Тл доли составляющих магнитной проводимости, полученных в численном эксперименте, остаются неизменными.

Установлено, что наибольшая доля в суммарном значении магнитной проводимости Λ_{Σ} приходится на составляющую Λ_1 (73-88%), определяемую геометрической фигурой в виде призмы [127].

Наибольшая доля среди составляющих магнитной проводимости, определяющих поле выпучивания ($\Lambda_2 + \Lambda_3 + \dots + \Lambda_p$), при конечно-элементном моделировании приходится на Λ_3 ($\Lambda_3/\Lambda_{\Sigma} = 4 \div 6$ %), а при аналитических расчетах – на Λ_2 ($\Lambda_2/\Lambda_{\Sigma} = 6 \div 10$ %).

В заключение следует отметить, что для уменьшения погрешности расчетных значений магнитной проводимости поправочные коэффициенты следует применять к составляющей магнитной проводимости Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы. Это простой и удобный способ снижения погрешности расчетных значений, так как доли составляющих магнитной проводимости, полученные аналитически и в ходе численного эксперимента, совпадают и не изменяются при варьировании значений индукции в стали.

3.1.2 Исследование и учет влияния размеров межзубцового расстояния при определении магнитной проводимости

В реальных магнитных системах на значения магнитной проводимости при достаточно близком расположении зубцов друг к другу значительное влияние оказывает межзубцовое расстояние c .

С целью определения влияния значения c на доли составляющих магнитной проводимости и дальнейшего его учета при аналитических расчетах, было выполнено конечно-элементное моделирование. Исследование проводилось при плоскопараллельной постановке задачи для магнитной системы с числом n зубцов в зубцово-пазовой зоне $n = 2$. Данное значение n позволяет наиболее полно учиты-

вать изменения значений магнитной проводимости поля выпучивания при варьировании значений соотношения c/a (рисунок 3.6). В данном случае $a = \text{const}$.

Численное моделирование выполнялось при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$, $c/a = 1 \div 2$, $a/b = 1$, $l_1/a = 11$. Диапазон значений $c/a = 1 \div 2$ был выбран как наиболее часто встречающийся в литературе по проектированию двигателей с зубчатой структурой элементов магнитной системы.

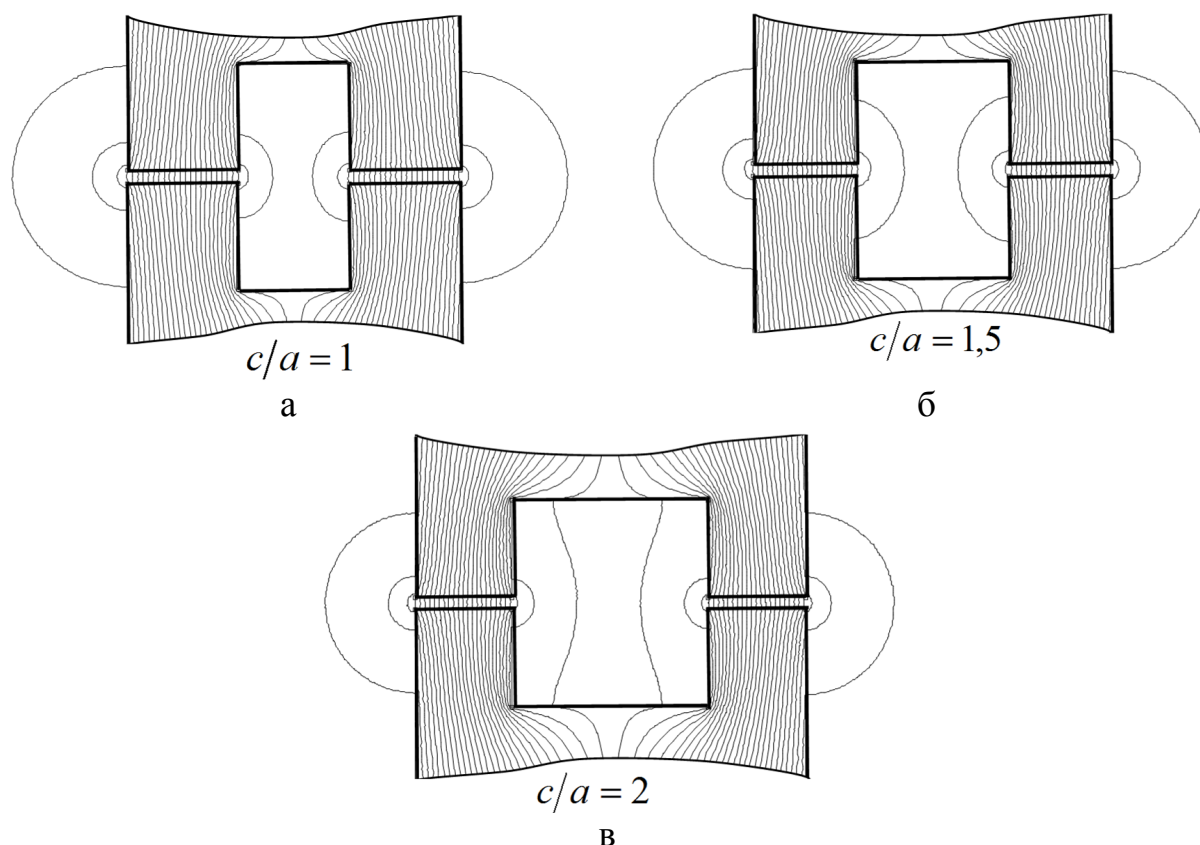


Рисунок 3.6 – Распределение линий магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне

В ходе конечно-элементного моделирования воздушное пространство зубцово-пазовой зоны ограничивалось полуокружностями с радиусом r . Значение радиуса r определялось из геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны магнитной системы аналогичным образом, что и в параграфе 2.1. При этом магнитная проводимость, определяемая геометрической фигурой в виде призмы, обозначалась через Λ_1 , в виде полуокружностей с внешней и внутренней стороны зубцов – Λ_2 и

Λ_2^I соответственно, в виде полуколец с внешней и внутренней стороны зубцов – $\Lambda_3 - \Lambda_{10}$ и $\Lambda_3^I - \Lambda_{10}^I$ соответственно (рисунок 3.7).

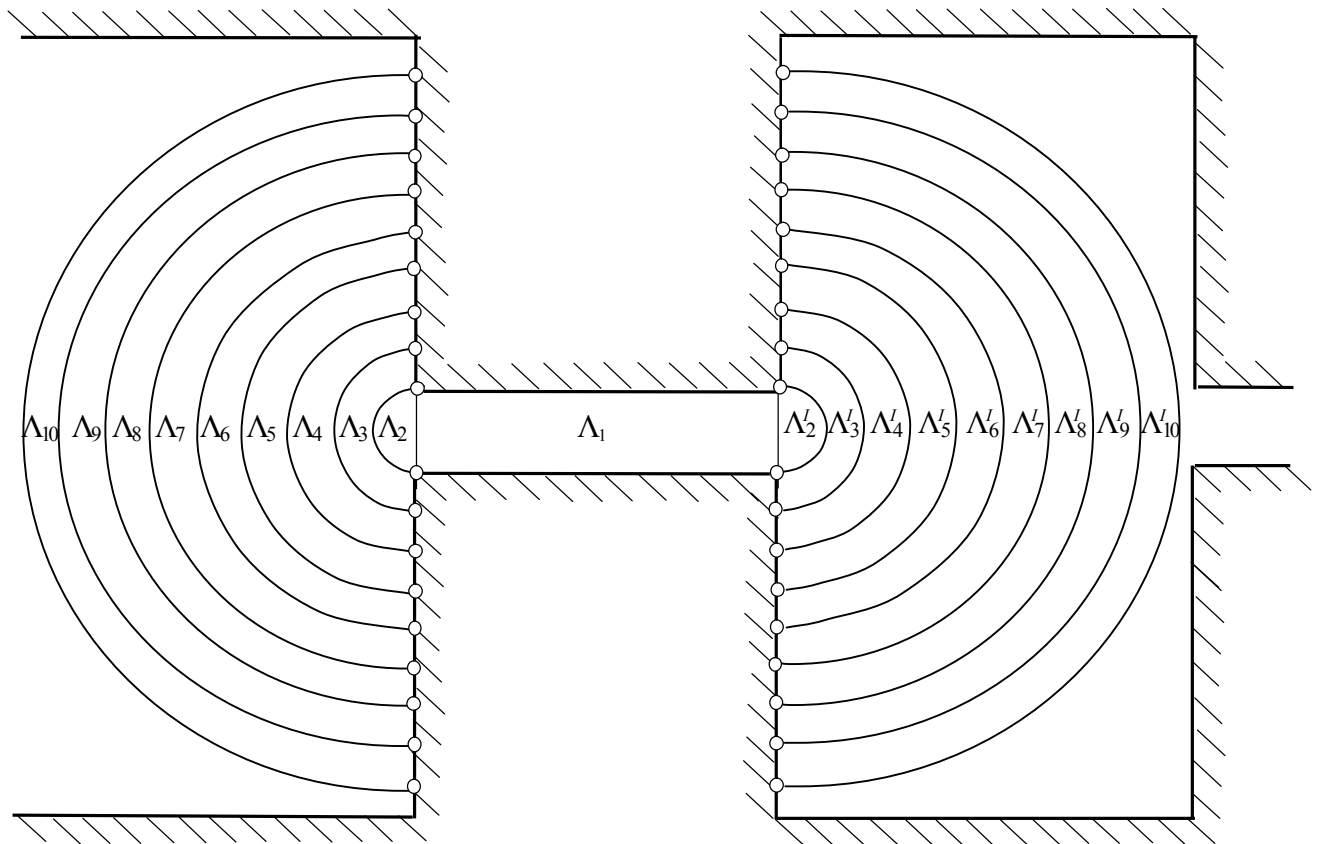
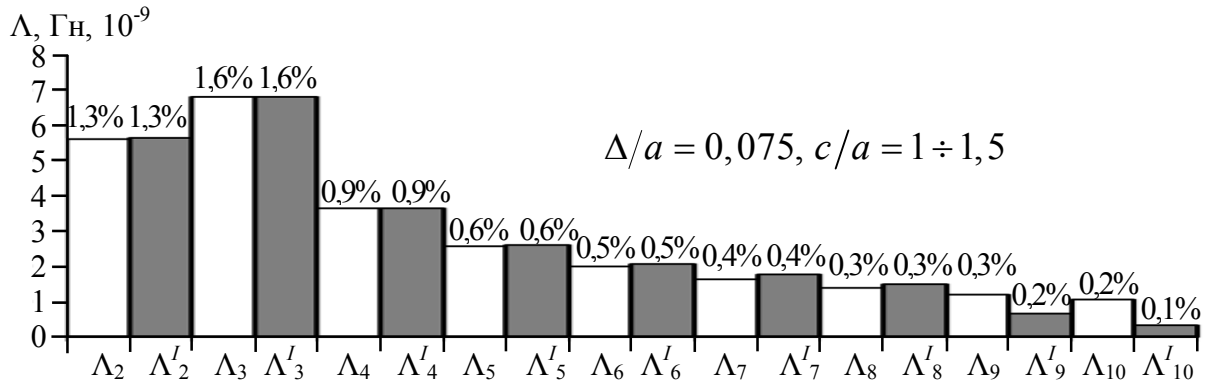


Рисунок 3.7 – Картина разбивки магнитного поля

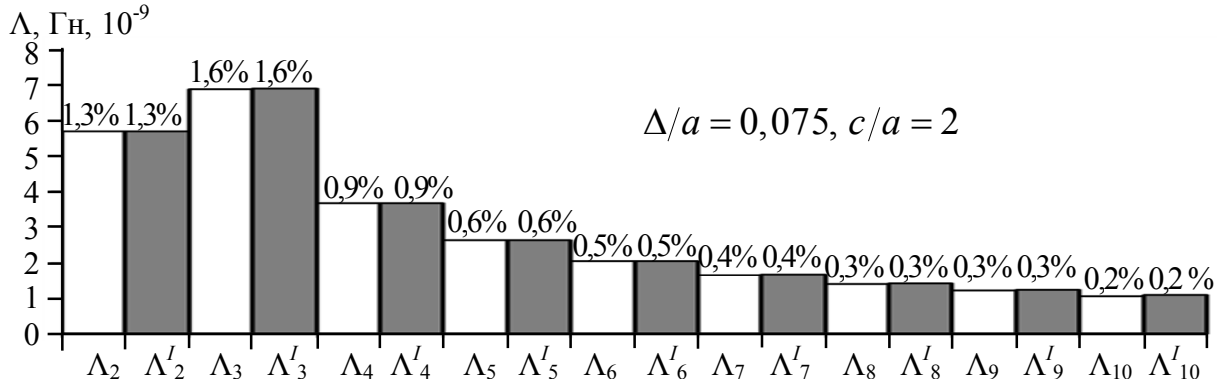
Результаты исследования по определению долей составляющих магнитной проводимости в ее суммарном значении представлены на рисунке 3.8 и рисунке 3.9. На рисунках не показаны доли составляющей Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы.

Установлено, что для диапазона значений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ отношение Λ_1/Λ_Σ на всем интервале значений $1 \leq c/a \leq 2$ изменяется в пределах 1-3 %.

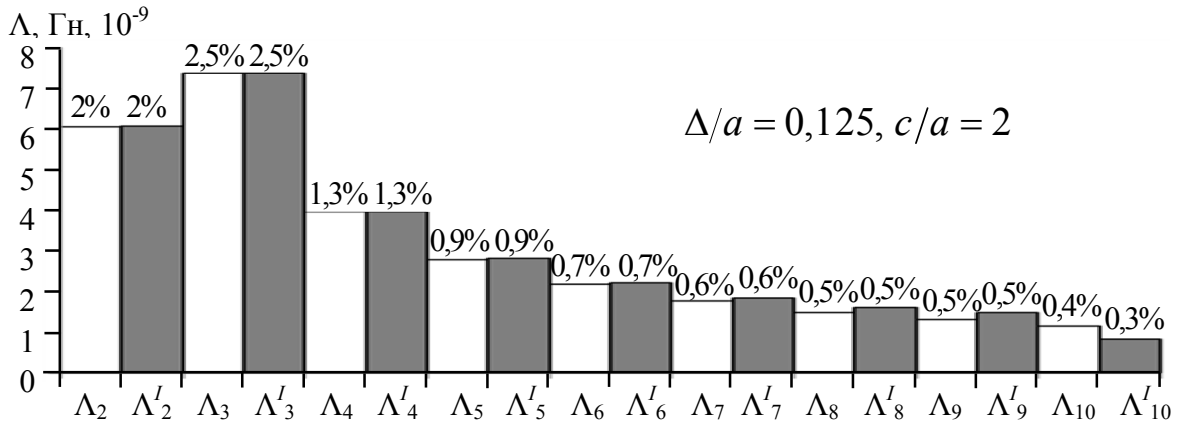
Выявлено, что для диапазона значений $1 \leq c/a \leq 2$ разница в значениях магнитной проводимости поля выпучивания с внешней и внутренней стороны зубцов, выраженная в процентах, изменяется прямо пропорционально значению Δ/a . Так для соотношения $\Delta/a = 0,075$ она составляет 1%, а для $\Delta/a = 0,2$ достигает 16% [127]. Это объясняется частичным наложением и вычитанием магнитных



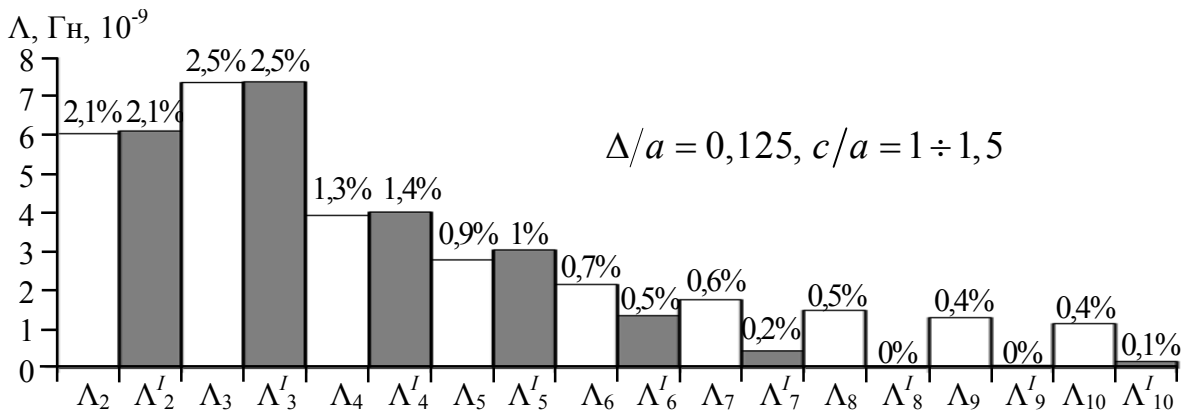
а



б

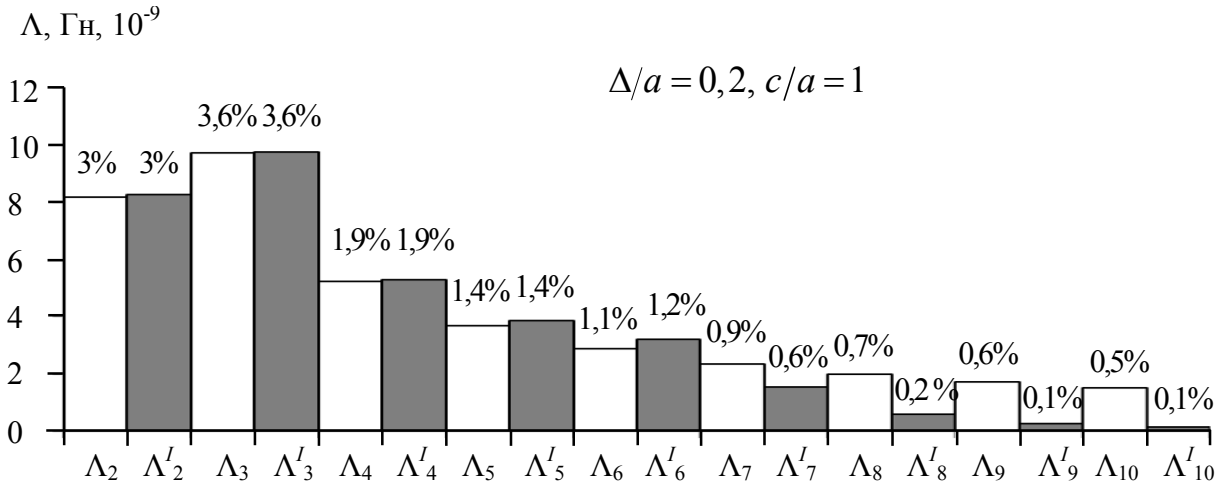


в

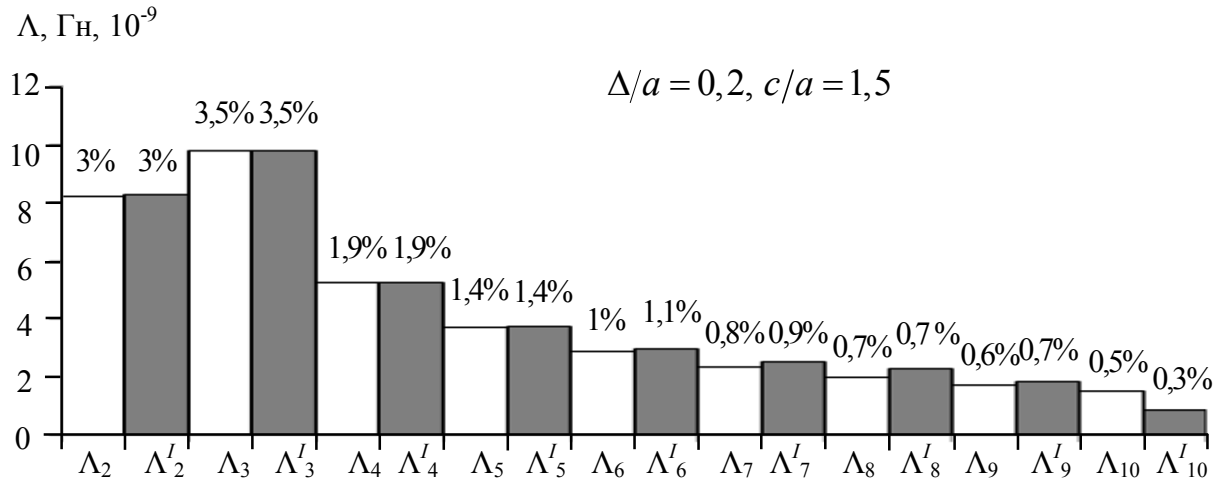


г

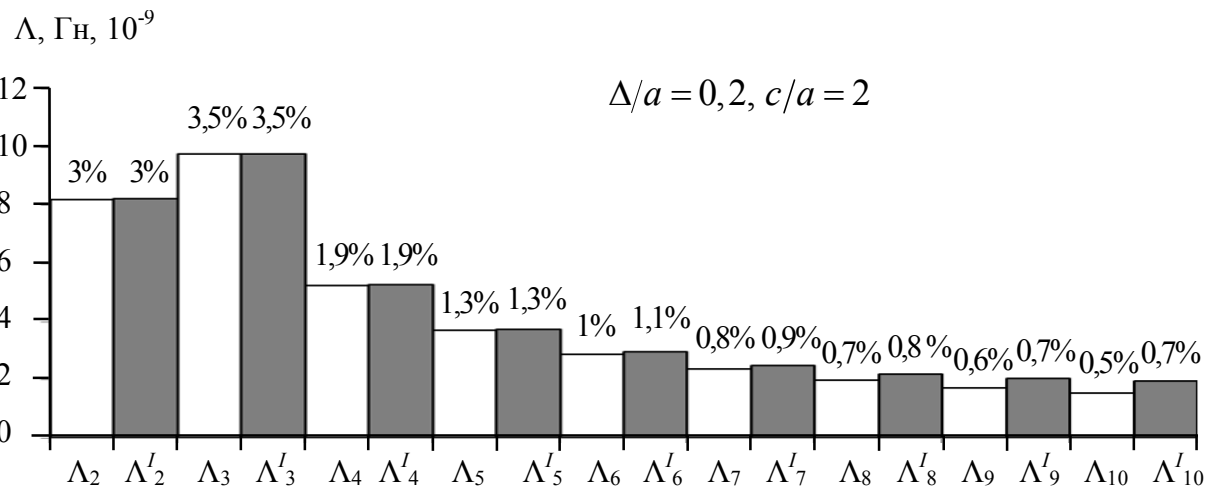
Рисунок 3.8 – Доли составляющих магнитной проводимости в ее суммарном значении Λ_{Σ}



а



б



в

Рисунок 3.9 – Доли составляющих магнитной проводимости в ее суммарном значении Λ_{Σ}

проводимостей, определяемых фигурами в виде полуколец, а так же изменением картины магнитного поля в воздушном пространстве зубцово-пазовой зоны при различных значениях c/a (рисунок 3.6). В данном случае магнитная проводимость поля выпучивания с внешней стороны зубца определялась как $\Lambda_{\text{пв}} = \Lambda_2 + \Lambda_3 + \dots + \Lambda_{10}$, с внутренней стороны зубца – $\Lambda_{\text{пв}}^I = \Lambda_2^I + \Lambda_3^I + \dots + \Lambda_{10}^I$.

В заключение следует отметить, что в диапазоне значений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ для уменьшения погрешности аналитических расчетов магнитной проводимости Λ_{Σ} , поправочный коэффициент следует вводить только для составляющей магнитной проводимости Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы. Так как доли составляющих магнитной проводимости, характеризующие поле выпучивания, в диапазоне значений $1 \leq c/a \leq 2$ изменяются в пределах 1-3 % и поэтому не оказывают существенного влияния на значение Λ_{Σ} [127].

3.2 Исследование и анализ влияния геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны на значения производной магнитной проводимости

Учитывая то, что для снижения погрешности расчетных значений магнитной проводимости поправочный коэффициент предлагается вводить для составляющей магнитной проводимости Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы, то необходимо определить сохраняет ли данное утверждение свою актуальность при расчете производной магнитной проводимости. Это связано с тем, что производная магнитной проводимости необходима при определении тягового усилия электромагнитного двигателя, в частности от точности в ее определении будет зависеть погрешность расчетных значений статического тягового усилия [100-101].

Исследование производной магнитной проводимости и ее составляющих проводилось на всем интервале рабочего хода якоря ЛЭМД с числом зубцов $n = 3$ и геометрическими соотношениями зубцово-пазовой зоны, указанными в пара-

графе 3.1. Конечно-элементное моделирование выполнялось при плоскопараллельной постановке задачи для интервала значений тока $I = 1 \div 4$ А и индукции в стали $B_{ст} = 0,6 \div 2$ Тл. При этом число витков катушки сохранялось неизменным и равным $w = 250$.

Значения производной магнитной проводимости определялись посредством нахождения тягового усилия через тензор натяжения Максвелла и последующего пересчета по формуле:

$$\frac{d\Lambda}{dx} = \frac{2F_3}{(Iw)^2}, \quad (3.1)$$

где F_3 - значение статического тягового усилия, I – ток, w – число витков катушки.

Исследование проводилось в несколько этапов:

1. Вначале определялось значение производной составляющей магнитной проводимости Λ_1 . В данном случае тяговое усилие находилось через тензор натяжения Максвелла на участке, обозначенном цифрой 1 на рисунке 3.10.

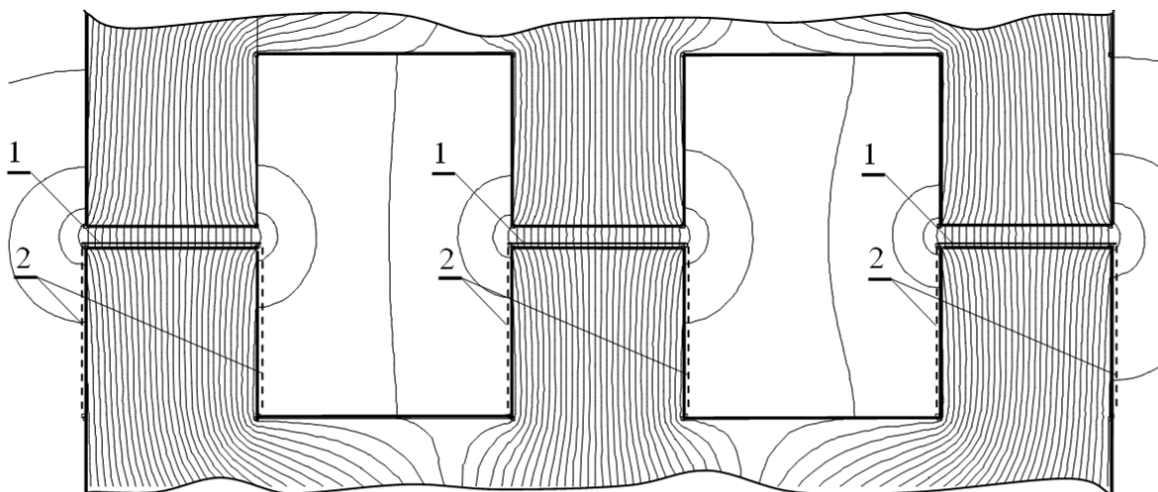


Рисунок 3.10 – Геометрическая структура зубцово-пазовой зоны и линии магнитной индукции

2. Затем определялось значение производной магнитной проводимости поля выпучивания. Тяговое усилие находилось через тензор натяжения Максвелла на участках, обозначенных цифрой 2 на рисунке 3.10.

3. На третьем этапе осуществлялось суммирование значений, полученных в п. 1 и п. 2.

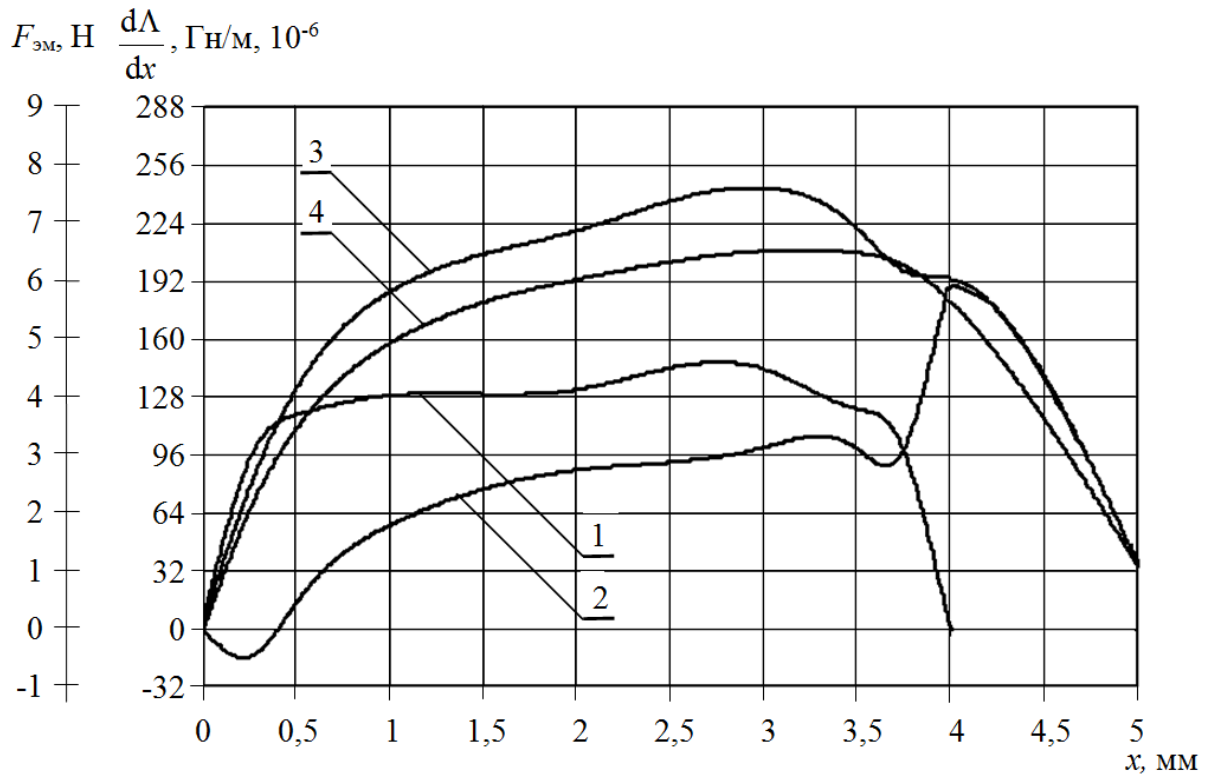
4. Для качественного сопоставления с результатами, полученными в п. 3 и подтверждения корректности проводимого эксперимента, определялось статическое тяговое усилие по средневзвешенному тензору натяжения.

В качестве наглядного примера на рисунке 3.11 представлены результаты исследования для значения индукции в стали $B_{ст} = 0,7$ Тл (рисунок 3.11, а) и для значения $B_{ст} = 1,3$ Тл (рисунок 3.11, б).

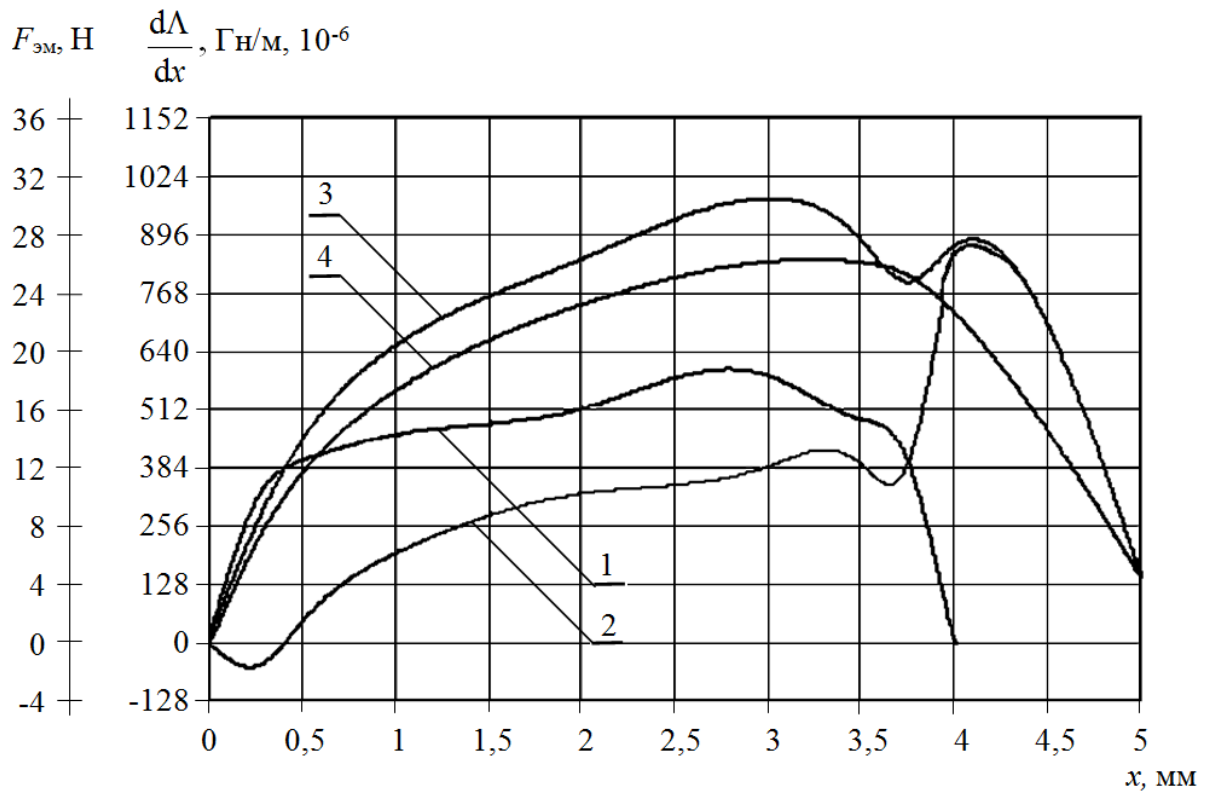
Числовые индексы кривых соответствуют пунктам проведенного исследования, так значения, полученные в п. 1, представлены на рисунке 3.11 в виде кривых с числовым индексом 1, а значения, полученные в п. 3, представлены на рисунке 3.11 в виде кривых с числовым индексом 2 и т.д.

В ходе численного эксперимента было установлено, что:

- при $x = 4$ мм наблюдается резкий скачок в значениях производной магнитной проводимости поля выпучивания (кривая 2 на рисунке 3.11);
- в интервале смещения $0 \leq x \leq 0,5$ мм значения производной магнитной проводимости поля выпучивания имеют отрицательный знак. Это объясняется тем, что на данном участке смещения возникает сила, противодействующая направлению движения результирующей силы. На рисунке 3.12 в качестве наглядного примера представлено графическое пояснение к данному явлению;
- значения производной составляющей магнитной проводимости Λ_1 (при значении $B_{ст} = 0,7$ Тл) в интервале смещения зубцов $0,25 \leq x \leq 3,75$ мм изменяются в пределах 12 % от среднего значения Λ_1 на данном участке;
- на участке смещения x зубцов $0,25 \leq x \leq 3,75$ мм производная составляющей магнитной проводимости Λ_1 в 1,5 раза превышает значения производной магнитной проводимости поля выпучивания.



а



б

Рисунок 3.11– Графики зависимости производной магнитной проводимости от смещения x зубцов

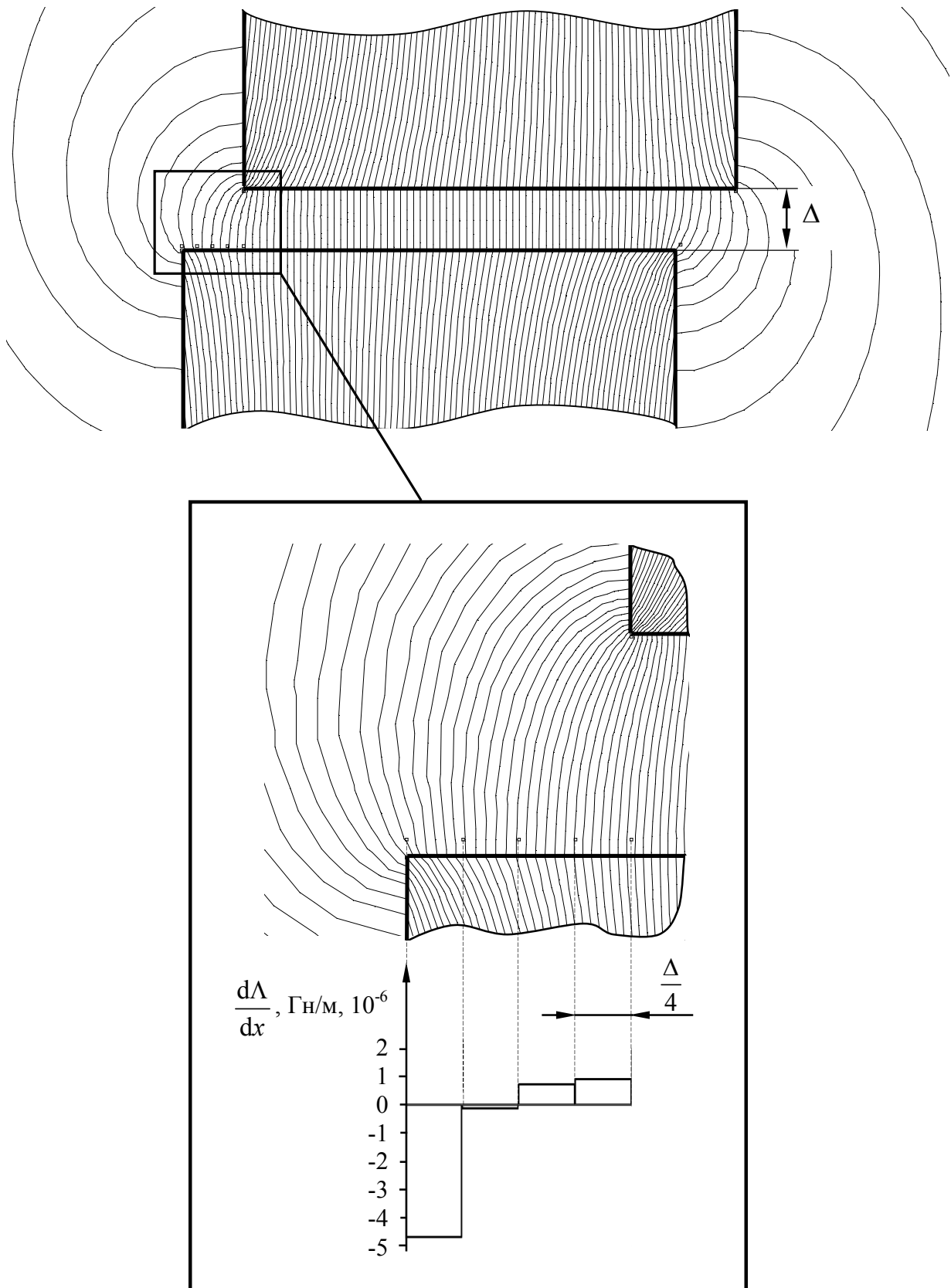


Рисунок 3.12 – Распределение линий магнитной индукции при $x = 0,5$ мм

На основании вышеизложенного, для уменьшения погрешности расчетных значений производной магнитной проводимости, поправочные коэффициенты рекомендуется применять к производной составляющей магнитной проводимости Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы.

3.3 Способ определения поправочного коэффициента для повышения точности расчета магнитной проводимости

В результате проведенных ранее исследований было установлено, что для диапазонов значений $c/a = 1 \div 2$ и $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ при расчете магнитной проводимости и ее производной поправочный коэффициент наиболее целесообразно вводить для составляющей магнитной проводимости Λ_1 .

В данном параграфе для диапазонов значений $c/a = 1 \div 2$ и $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ предлагается поправочный коэффициент k_2 , который позволяет учитывать разницу в значениях составляющей магнитной проводимости Λ_1 , полученных аналитически и в ходе численного эксперимента [128].

На рисунке 3.13 в качестве наглядного примера представлено графическое пояснение к определению поправочного коэффициента k_2 . Длина l_1 зубца на рисунке не показана.

Расчет поправочного коэффициента k_2 выполняется в несколько этапов:

1. На первоначальном этапе определяется угол наклона прямой Λ_{p1} , характеризующей расчетные значения составляющей магнитной проводимости согласно методу вероятных путей потока, для магнитных систем с одним технологическим воздушным зазором Δ и n числом зубцов в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{OB}{OC} = \frac{\Lambda_{p1}}{a} = \frac{nl_1\mu_0 a}{\Delta a} = \frac{nl_1\mu_0}{\Delta}; \quad (3.2)$$

для магнитных систем с двумя технологическими воздушными зазорами Δ :

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{OB}{OC} = \frac{\Lambda_{p1}}{a} = \frac{nl_1\mu_0 a}{2\Delta a} = \frac{nl_1\mu_0}{2\Delta}. \quad (3.3)$$

2. К кривой $\Lambda_{\text{экс}1}$, характеризующей экспериментальные значения магнит-

ной проводимости, строится секущая, проходящая через точки, определяющие значения составляющей магнитной проводимости $\Lambda_{\text{экс1}}$ при смещении $x=0$ и $x=a$. На рисунке 3.13 это соответственно точки A и C [126]. Затем определяется угол наклона секущей AC через $\text{tg}\varphi$:

$$\text{tg}\varphi = \frac{OA}{OC} = \frac{\Lambda_{\text{экс1}}}{a}. \quad (3.4)$$

В данном случае для нахождения значения $\Lambda_{\text{экс1}}$ достаточно определить значение составляющей Λ_1 при смещении зубцов $x=0$. Это существенно упрощает расчет.

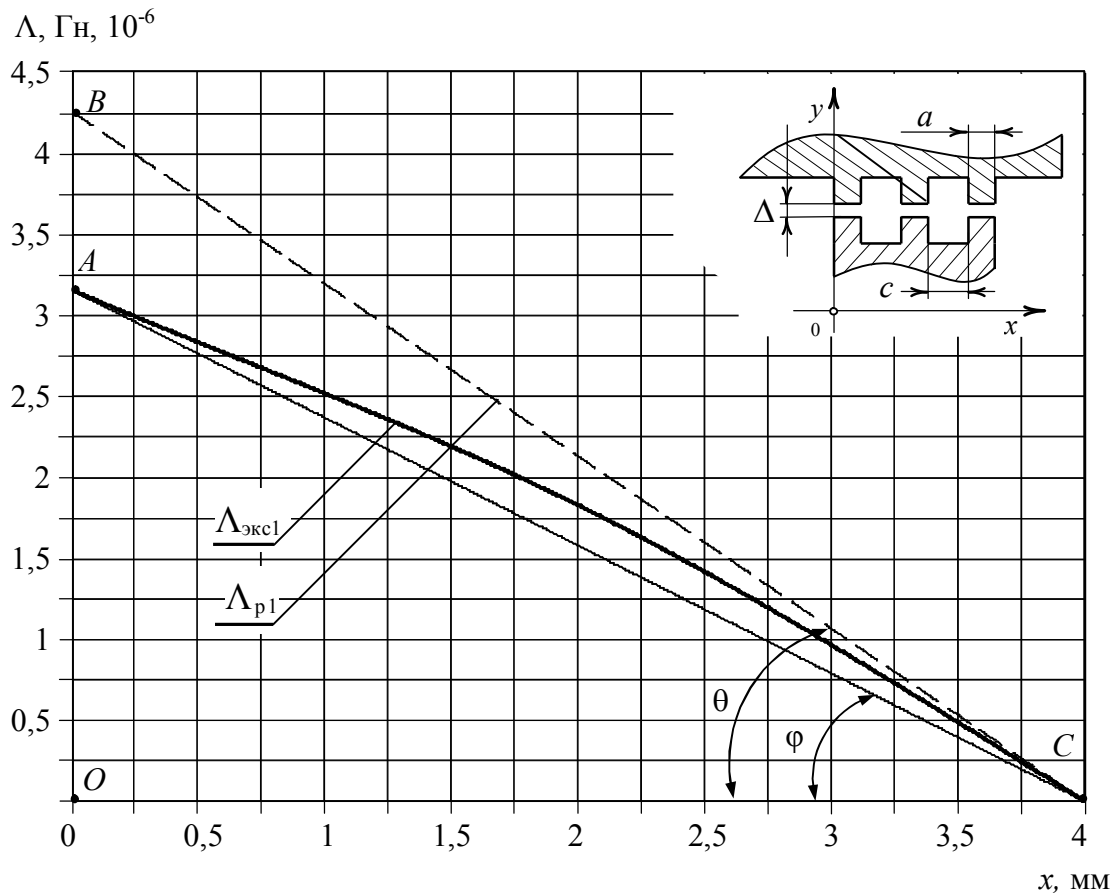


Рисунок 3.13 – Графическое пояснение к расчету поправочного коэффициента k_2

3. Далее, через отношение тангенсов $\text{tg}\varphi$ и $\text{tg}\theta$, определяется поправочный коэффициент k_2 для магнитных систем с одним технологическим воздушным зазором Δ и n числом зубцов в зубцово-пазовой зоне:

$$k_2 = \frac{\text{tg}\varphi}{\text{tg}\theta} = \frac{\Delta\Lambda_{\text{экс1}}}{nl\mu_0a}; \quad (3.5)$$

и с двумя технологическими воздушными зазорами Δ :

$$k_2 = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\theta} = \frac{2\Delta\Lambda_{\text{экс}1}}{nl_1\mu_0a}. \quad (3.6)$$

Для качественной оценки предлагаемого поправочного коэффициента был выполнен расчет суммарной магнитной проводимости Λ_{Σ} согласно методу вероятных путей потока [101] без учета и с учетом поправочного коэффициента k_2 применительно к составляющей магнитной проводимости Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы. В данном случае формула расчета магнитной проводимости Λ_1 с учетом поправочного коэффициента k_2 для одной пары зубцов имеет следующий вид:

$$\Lambda_1 = \mu_0 l_1 \frac{k_2 |a - x|}{\Delta}. \quad (3.7)$$

Численный эксперимент проводился для ЛЭМД с числом зубцов $n = 3$ в зубцово-пазовой зоне в диапазоне соотношений $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$. При этом индукция в стали принималась $B_{\text{ст}} = 0,3$ Тл.

В качестве наглядного примера на рисунке 3.14 представлены результаты исследования для соотношения $\Delta/a = 0,2$. В данном случае кривые, характеризующие расчетные значения магнитной проводимости с учетом и без учета поправочного коэффициента k_2 обозначены соответственно через Λ_p^I и Λ_p , экспериментальные значения магнитной проводимости характеризует кривая, обозначенная через $\Lambda_{\text{экс}}$.

Установлено, что максимальная относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости в интервале значений $x = 0 \div 4$ мм без учета поправочного коэффициента k_2 составляет 48%, а с учетом поправочного коэффициента k_2 – 16 %.

В ходе численных экспериментов были получены значения поправочного коэффициента k_2 для ЛЭМД с числом зубцов $n = 3 \div 5$ и значениями индукции в стали $B_{\text{ст}} = 0,2$ Тл (рисунок 3.15), а так же для ЛЭМД с числом зубцов $n = 3$ в диапазоне значений $B_{\text{ст}} = 0,3 \div 1$ Тл (рисунок 3.16).

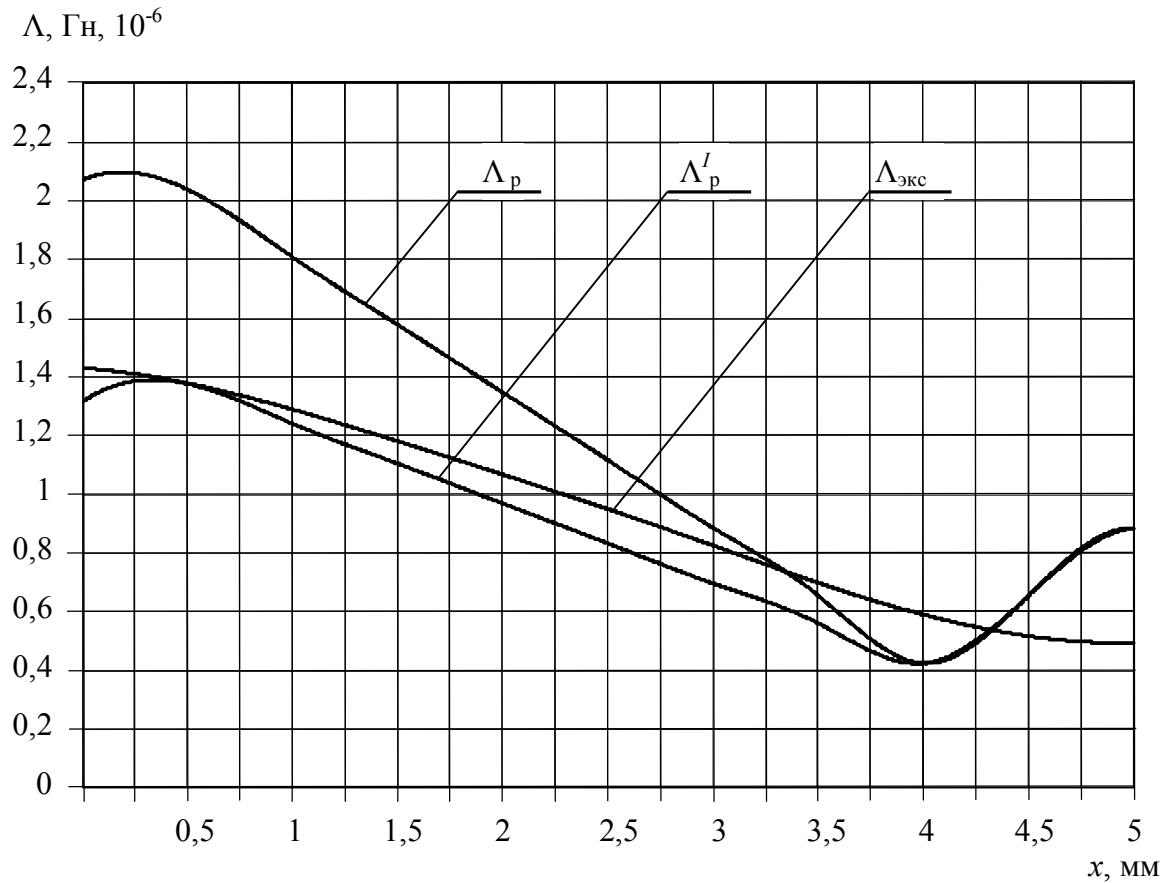


Рисунок 3.14 – График зависимости магнитной проводимости от значения смещения x зубцов

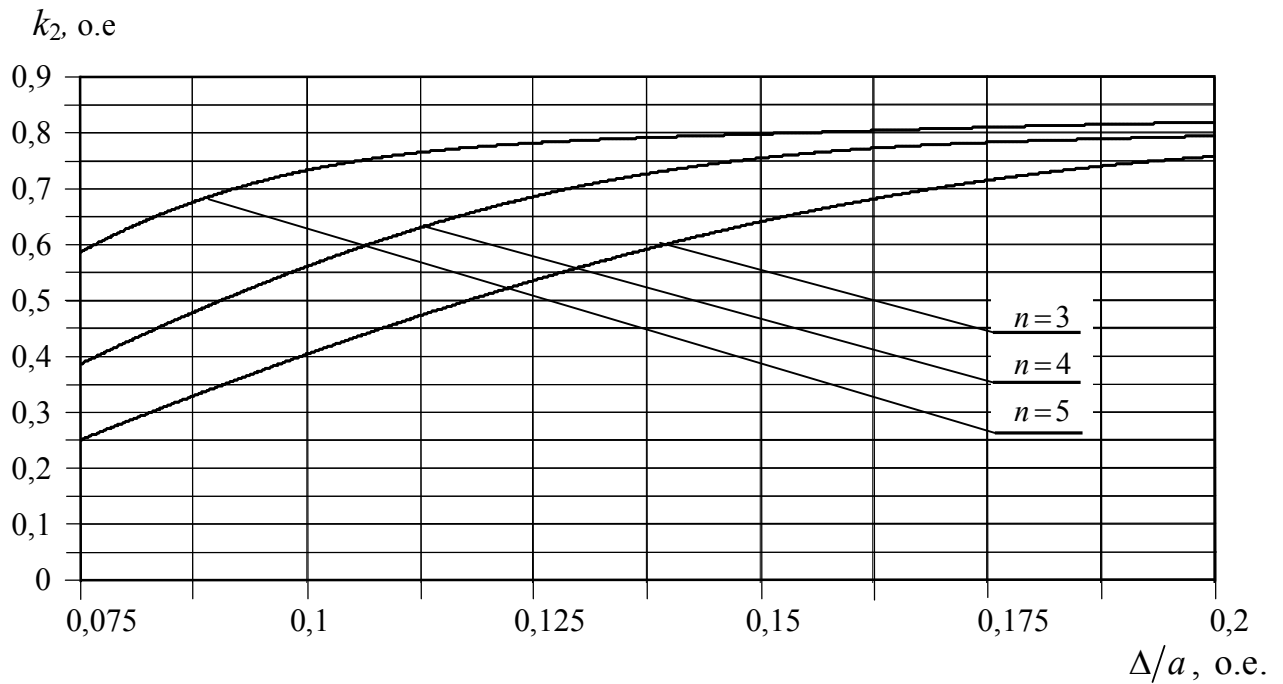


Рисунок 3.15 – График зависимости значений k_2 от соотношения Δ/a

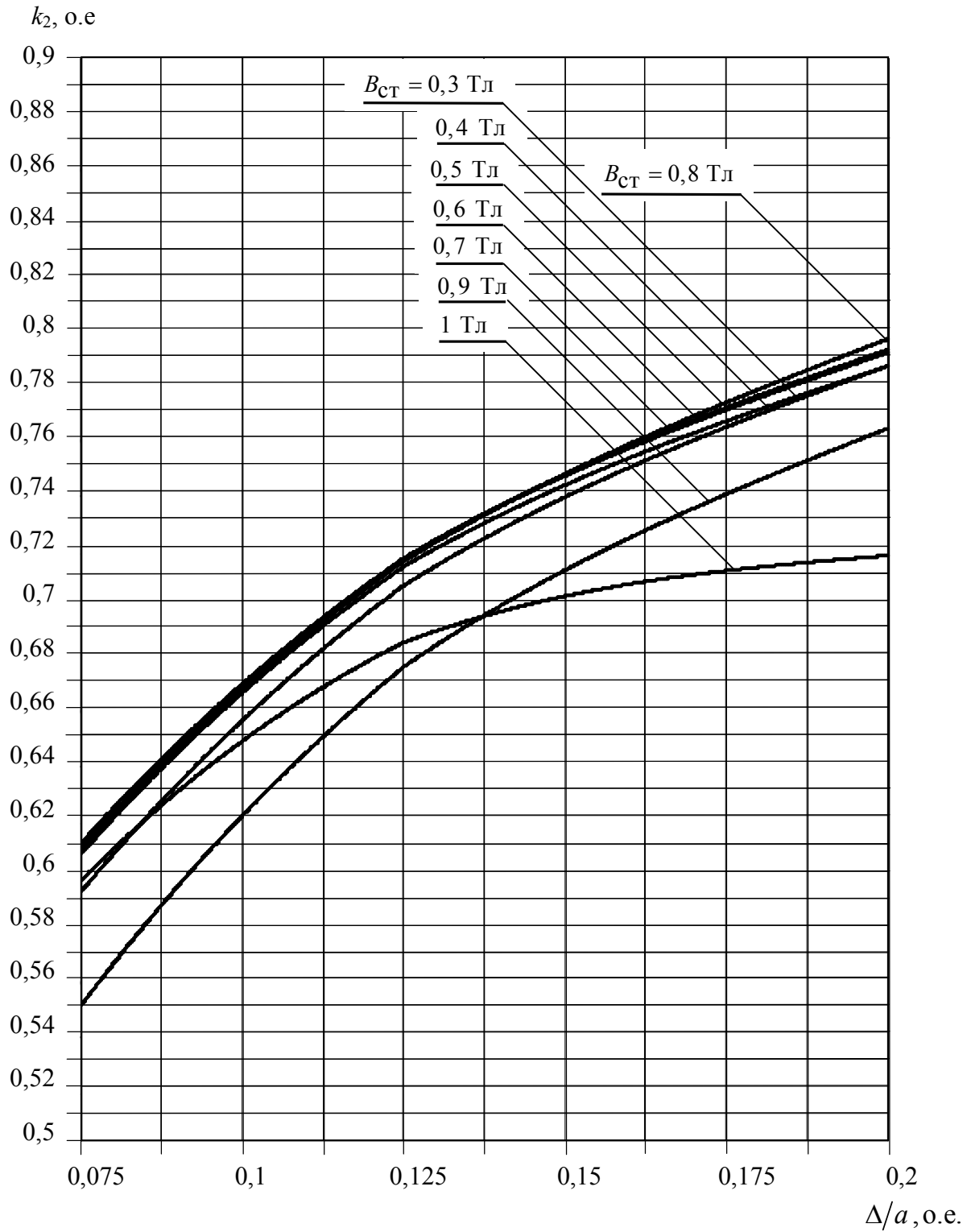


Рисунок 3.16 – График зависимости значений k_2 от соотношения Δ/a

Установлено, что значения поправочного коэффициента k_2 изменяются прямо пропорционально размеру технологического воздушного зазора Δ и числу зубцов n .

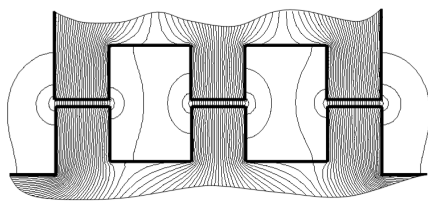
В заключение следует отметить, что в диапазоне значений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ предлагаемый поправочный коэффициент k_2 позволяет снизить относительную погрешность расчетных значений магнитной проводимости, полученных согласно методу вероятных путей потока, в 1,5-2,4 раза. Помимо этого, предлагаемый поправочный коэффициент позволяет выполнять расчеты магнитной проводимости с учетом индукции в стали в диапазоне значений $B_{ст} = 0,3 \div 1$ Тл.

3.4 Разработка комбинированной методики расчета магнитной проводимости

На основании выполненных исследований предлагается комбинированная методика расчета магнитной проводимости, представляющая собой сочетание метода вероятных путей потока и результатов конечно-элементного моделирования, позволяющая осуществлять уточненный расчет магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД на всем интервале рабочего хода якоря. Методика обеспечивает необходимую точность расчета при отношениях размера воздушного технологического зазора Δ к ширине зубца a в интервале значений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ при $a = 4$ мм [128-129].

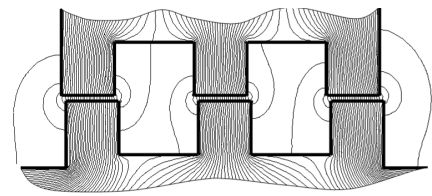
При разработке методики учитывался характер распределения линий магнитной индукции в воздушном пространстве зубцово-пазовой зоны двигателя в зависимости от значения смещения x зубцов якоря относительно зубцов статора (рисунок 3.17).

Предлагаемое на рисунке 3.18 расположение геометрических фигур, определяющих магнитную проводимость поля выпучивания, позволяет учитывать реальную картину магнитного поля в воздушном пространстве зубцово-пазовой зоны ЛЭМД.



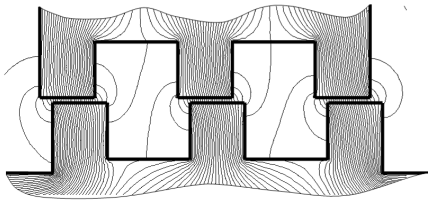
$x = 0$ мм

а



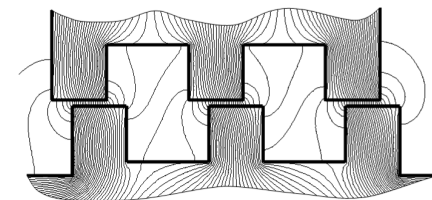
$x = 0,5$ мм

б



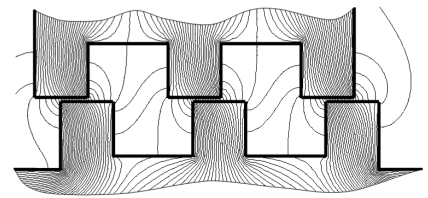
$x = 1$ мм

в



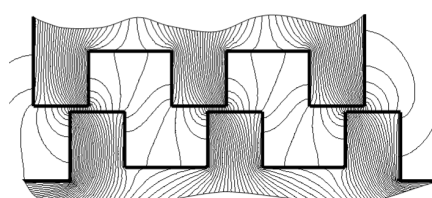
$x = 1,5$ мм

г



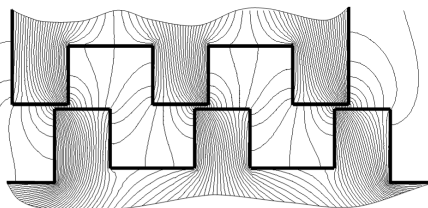
$x = 2$ мм

д



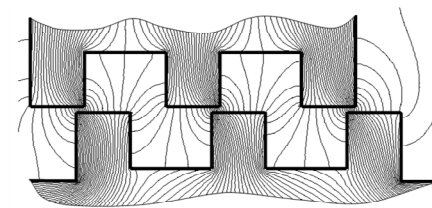
$x = 2,5$ мм

е



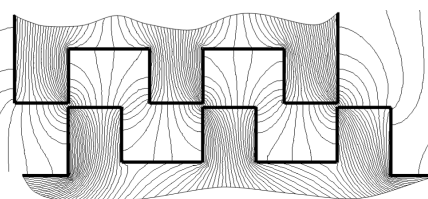
$x = 3$ мм

ж



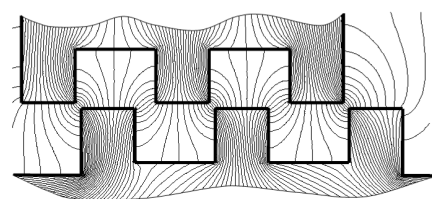
$x = 3,5$ мм

и



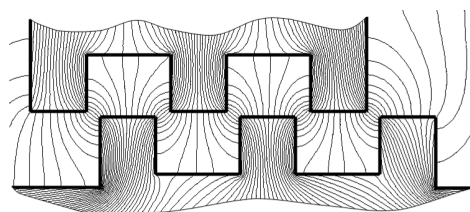
$x = 4$ мм

к



$x = 4,5$ мм

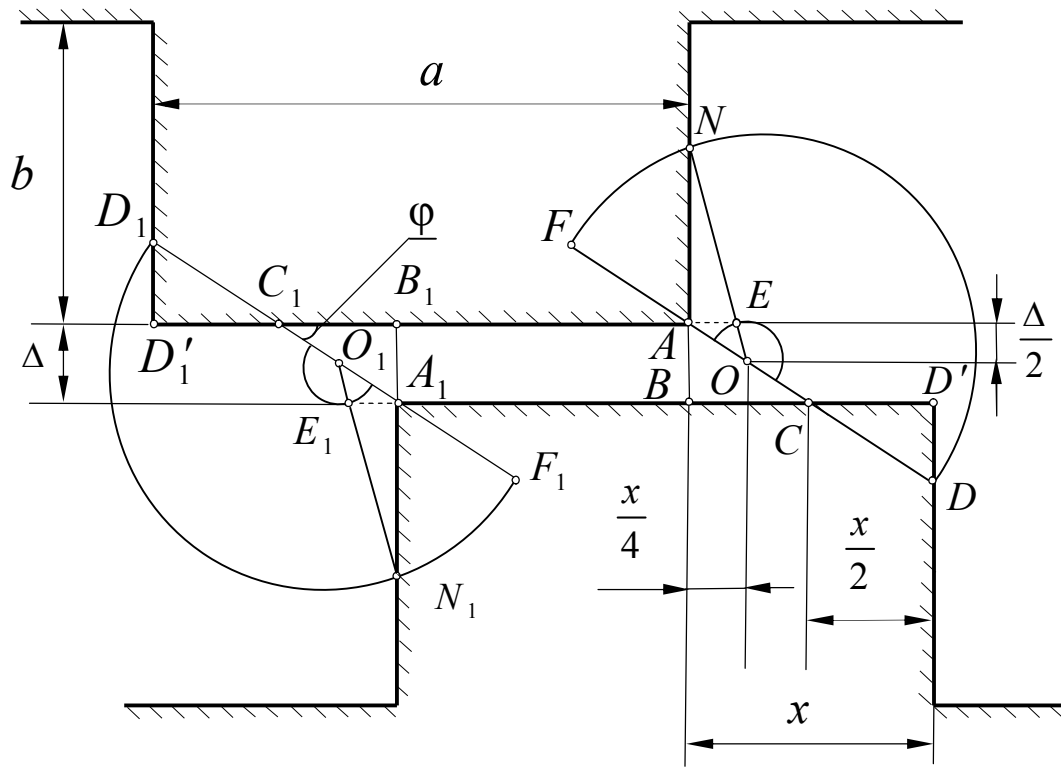
л



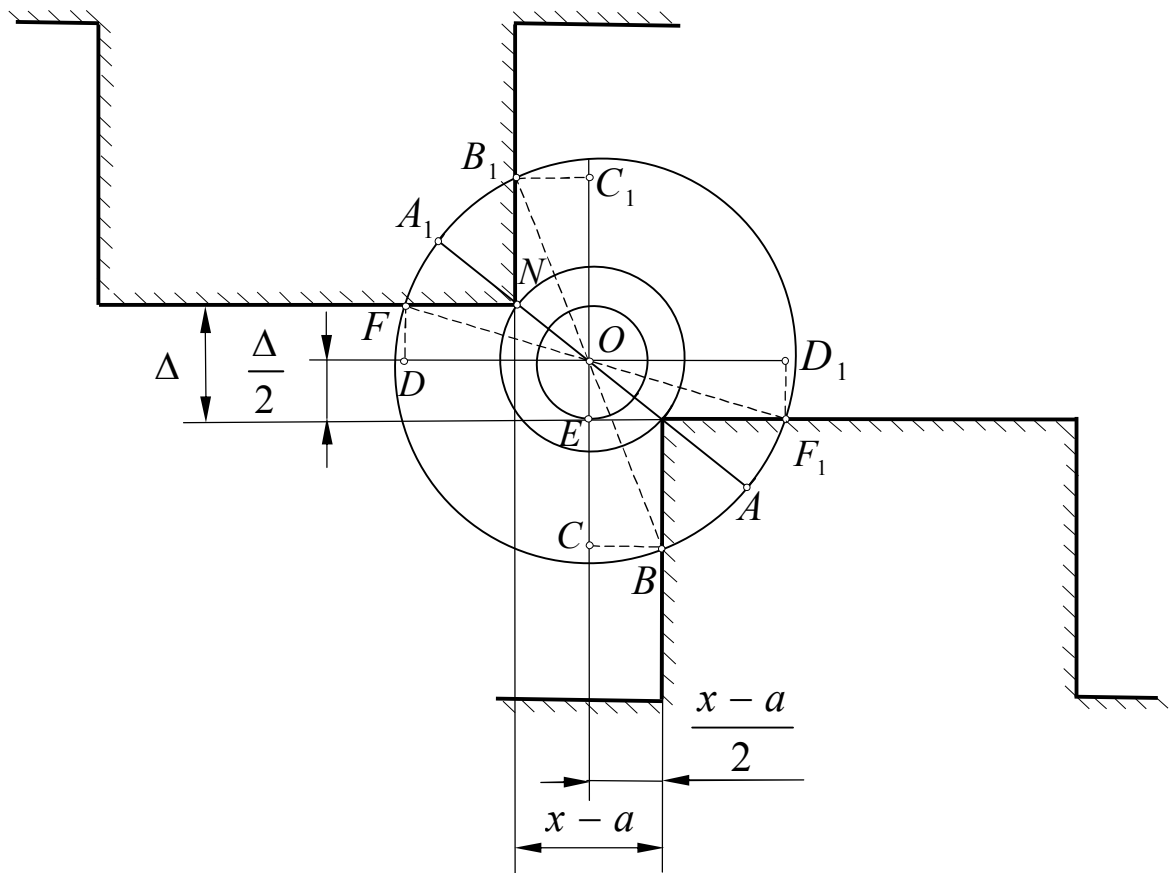
$x = 5$ мм

м

Рисунок 3.17 – Распределение линий магнитной индукции



a



б

Рисунок 3.18 – Картина разбивки магнитного поля

Для интервала смещения $0 \leq x < a$ геометрические фигуры в виде полуколец и полукругов предлагается располагать под углом φ таким образом, чтобы выполнялось равенство сторон треугольников ABC , $A_1B_1C_1$, CDD^I и $C_1D_1D_1^I$: $AB = A_1B_1 = DD^I = D_1D_1^I$, $BC = B_1C_1 = CD^I = C_1D_1^I$ и $CA = C_1A_1 = CD = C_1D_1$ (рисунок 3.18).

Сущность предлагаемой методики заключается в следующем:

1. Согласно рисунку 3.18, а для участка смещения $0 \leq x < a$ магнитная проводимость будет выражаться суммой таких простых фигур, как: прямоугольник ABA_1B_1 , треугольники ABC и $A_1B_1C_1$, полукруги с радиусами OE и O_1E_1 , сектора колец с внешними радиусами ON и O_1N_1 .

Магнитная проводимость Λ_1 , определяемая геометрической фигурой в виде прямоугольника ABA_1B_1 , и Λ_3 – в виде полукругов с радиусами OE и O_1E_1 , вычисляется по формулам, предложенным в [104].

При расчете магнитной проводимости Λ_2 , определяемой геометрическими фигурами в виде треугольников ABC и $A_1B_1C_1$, учитывалось, что они равны между собой и в сумме дают прямоугольник со сторонами $AB = \Delta$ и $BC = x/2$.

Учитывая то, что только одна из сторон треугольников находится на поверхности зубцов, то получаемый при их суммировании прямоугольник должен иметь в два раза меньшую магнитную проводимость, чем равный ему по площади прямоугольник, расположенный в воздушном зазоре между зубцами. Данное предположение было подтверждено в ходе численного эксперимента.

Конечно-элементное моделирование осуществлялось при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны ЛЭМД: $n = 3$, $c/a = 1,5$, $l_1/a = 11$, $b/a = 1$, $a = 4$ мм и диапазона соотношений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$. При этом индукция в стали составляла 0,25 Тл.

В ходе исследования было установлено, что на интервале смещения $0 < x < a$ значение магнитной проводимости $2\Lambda_2$, определяемой суммой двух треугольников, фактически равно значению $0,5\Lambda_1$, определяемому прямоугольником

(рисунок 3.19). При этом площадь двух треугольников равнялась площади прямоугольника.

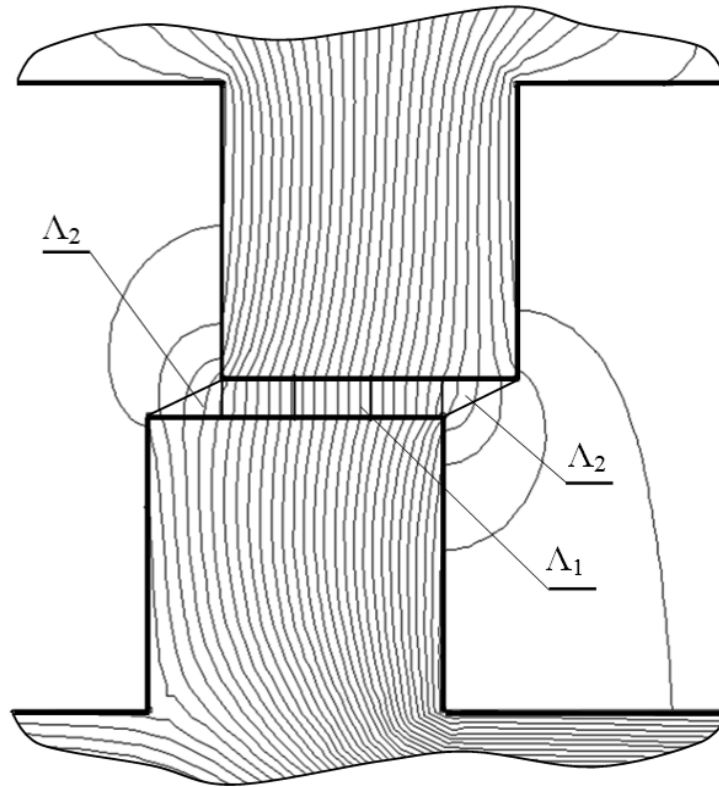


Рисунок 3.19 – К расчету магнитной проводимости

Тогда, учитывая вышеизложенное, суммарную магнитную проводимость двух равных треугольников, поверхность которых пересекается равным числом силовых линий, можно выразить следующим образом:

$$2\Lambda_2 = l_1\mu_0 \frac{x}{4\Delta}; \quad (3.8)$$

Формула для расчета магнитной проводимости Λ_4 , определяемой геометрическими фигурами в виде полуколец с внешними радиусами ON и O_1N_1 , с учетом уравнений, предложенных в [95], можно выразить следующим образом:

$$\Lambda_4 = l_1\mu_0 \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{ON}{OE}\right); \quad (3.9)$$

где $\alpha = \pi - \gamma$, $OE = \Delta/2$, $ON = 0,4c$ при $b > 0,4c$, $ON = b$ при $b < 0,4c$.

В данном случае угол γ определялся по теореме косинусов исходя из треугольника OAE :

$$\gamma = \arccos \frac{OA^2 + OE^2 - AE^2}{2OA \times OE} = \arccos \frac{\frac{5}{16}x^2 + c\Delta}{c\sqrt{\Delta^2 + \frac{x^2}{4}}}; \quad (3.10)$$

Следует отметить, что при вычитании сегмента с углом γ происходит так же вычитание треугольника ANE , площадь и магнитная проводимость которого принимается близкой к площади и магнитной проводимости треугольника CDD' . С учетом данного допущения по формуле 3.10 получаем магнитную проводимость, определяемую фигурой $CANDD'$.

Тогда формула суммарной магнитной проводимости для ЛЭМД с числом n зубцов и одним технологическим воздушным зазором Δ в зубцово-пазовой зоне выражается следующим образом:

$$\Lambda_{\Sigma} = n(\Lambda_1 + 2\Lambda_2 + 2\Lambda_3 + 2\Lambda_4) = nl_1\mu_0 \left(\frac{a - \frac{3}{4}x}{\Delta} + 0,52 + \frac{2}{\pi - \gamma} \ln \left(\frac{0,8c}{\Delta} \right) \right); \quad (3.11)$$

а с двумя технологическими воздушными зазора Δ :

$$\Lambda_{\Sigma} = (\Lambda_1 + 2\Lambda_2 + 2\Lambda_3 + 2\Lambda_4)n/2 = l_1\mu_0 \left(\frac{a - \frac{3}{4}x}{\Delta} + 0,52 + \frac{2}{\pi - \gamma} \ln \left(\frac{0,8c}{\Delta} \right) \right) n/2; \quad (3.12)$$

Согласно рисунку 3.18, б для участка смещения $a \leq x \leq (a+c)/2$ магнитная проводимость будет определяться суммой таких простых фигур, как: полукруги с

радиусом OE , сектора колец с радиусами OE и ON , сектора колец с радиусами ON и OA .

Магнитная проводимость Λ_5 , определяемая геометрической фигурой в виде полукруга с радиусом OE , рассчитывалась согласно формуле, предложенной в [104].

При выводе формулы расчета магнитной проводимости Λ_6 , определяемой геометрической фигурой в виде полукольца с радиусами OE и ON , использовались уравнения, предложенные в [95], и магнитная проводимость выражалась следующим образом:

$$\Lambda_6 = l_1 \mu_0 \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{ON}{OE} \right), \quad (3.13)$$

где $\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta$, $OE = \Delta/2$, $ON = \sqrt{\frac{(x-a)^2}{4} + \frac{\Delta^2}{4}}$.

При этом углы α и β определяются по теореме косинусов исходя из треугольников ODF и COB соответственно:

$$\alpha = \arccos \frac{OD^2 + OF^2 - DF^2}{2OD \times OF} = \arccos \sqrt{1 - \frac{\Delta^2}{0,64c^2}}; \quad (3.14)$$

$$\beta = \arccos \frac{CO^2 + OB^2 - CB^2}{2OB \times CO} = \arccos \sqrt{1 - \frac{(x-a)^2}{0,64c^2}}. \quad (3.15)$$

Магнитная проводимость секторов колец с радиусами ON и OA , с учетом уравнений, предложенных в [95], выражается как:

$$\Lambda_7 = l_1 \mu_0 \frac{1}{\pi - \gamma} \ln \left(\frac{OA}{ON} \right) = l_1 \mu_0 \frac{1}{\frac{\pi}{2} + \alpha + \beta} \ln \left(\frac{OA}{ON} \right), \quad (3.16)$$

где $ON = \sqrt{\frac{(x-a)^2}{4} + \frac{\Delta^2}{4}}$, $OA = 0,4c$ при $b > 0,4c$, $OA = b$ при $b < 0,4c$.

Тогда формула суммарной магнитной проводимости для ЛЭМД с n числом зубцов и одним технологическим воздушным зазором Δ в зубцово-пазовой зоне выражается следующим образом:

$$\Lambda_{\Sigma} = n(2\Lambda_5 + 2\Lambda_6 + 2\Lambda_7) = n l_1 \mu_0 \left(0,52 + \frac{2\mu_0}{\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta} \ln \left(\frac{\sqrt{(x-a)^2 + \Delta^2}}{\Delta} \right) + \frac{2\mu_0}{\frac{\pi}{2} + \alpha + \beta} \ln \left(\frac{0,8c}{\Delta} \right) \right); \quad (3.17)$$

а с двумя технологическими воздушными зазора Δ :

$$\Lambda_{\Sigma} = (2\Lambda_5 + 2\Lambda_6 + 2\Lambda_7) n/2 = l_1 \mu_0 \left(0,52 + \frac{2\mu_0}{\frac{\pi}{2} - \alpha - \beta} \ln \left(\frac{\sqrt{(x-a)^2 + \Delta^2}}{\Delta} \right) + \frac{2\mu_0}{\frac{\pi}{2} + \alpha + \beta} \ln \left(\frac{0,8c}{\Delta} \right) \right) n/2. \quad (3.18)$$

Предлагаемые формулы для расчета магнитной проводимости рекомендуются использовать с учетом поправочного коэффициента k_2 , полученного в параграфе 3.3. Применение данного поправочного коэффициента позволяет повысить

точность получаемых расчетных значений магнитной проводимости в диапазоне соотношений размеров $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$.

Для проверки точности значений магнитной проводимости, получаемых по предлагаемой методике, был проведен численный эксперимент в плоскопараллельной постановке задачи для вариантов ЛЭМД, описанных в параграфе 1.5 (рисунок 1.16).

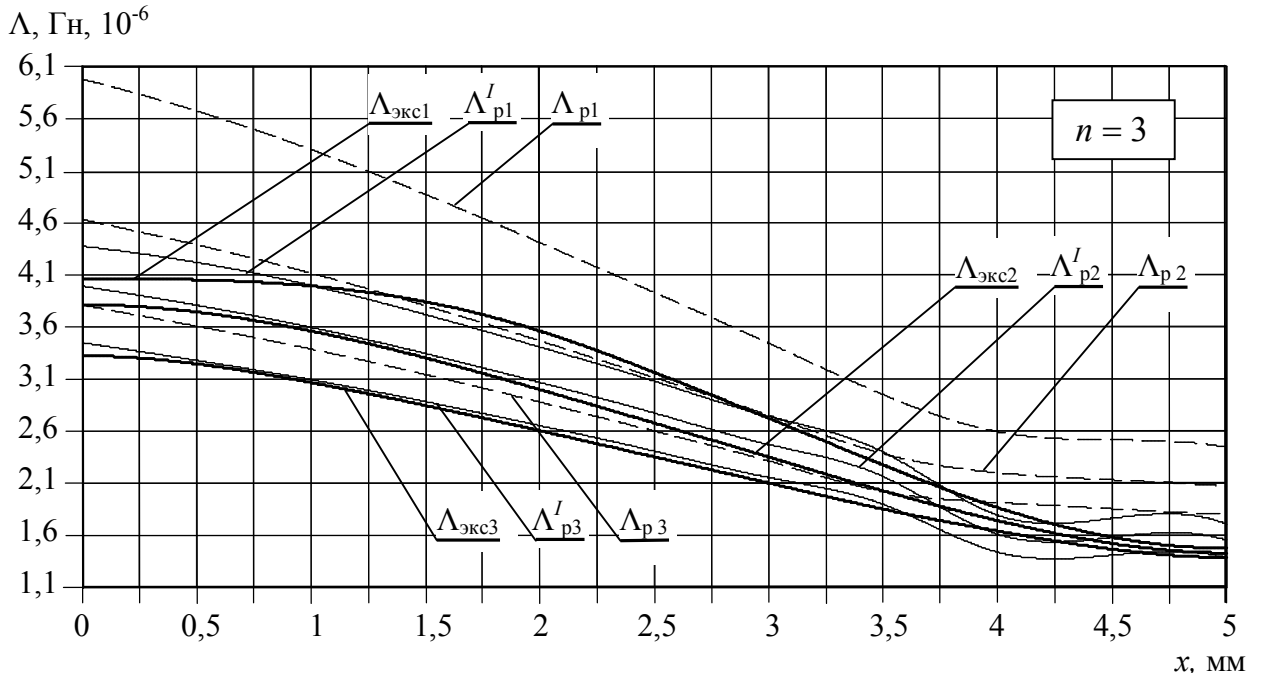
Исследование проводилось для числа n зубцов якоря $n = 3 \div 5$ и следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоной: $c/a = 1,5$, $l_1/a = 11$, $b/a = 1$, $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$. При этом индукция в стали составила $0,25$ Тл [127].

В качестве примера на рисунках 3.20 – 3.21 отображены результаты исследования для ЛЭМД рисунка 1.16, б (параграф 1.5).

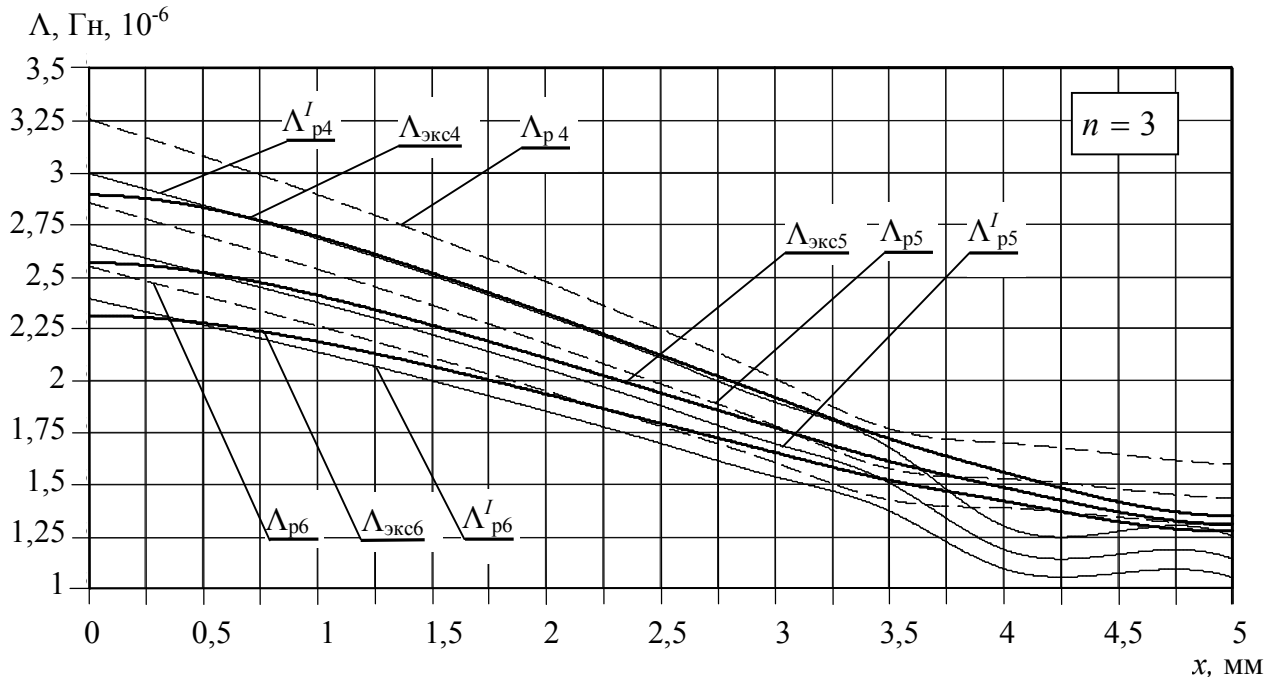
Экспериментальные значения магнитной проводимости характеризует кривая $\Lambda_{\text{экс}}$. Кривые, обозначенные через Λ_p и Λ_p^I , характеризуют значения, полученные по предлагаемой методике соответственно без и с учетом поправочного коэффициента k_2 . Числовой индекс кривой соответствует заданному соотношению Δ/a : так кривая с индексом 1 определяет магнитную проводимость при значении $\Delta/a = 0,075$, с индексом 2 – $\Delta/a = 0,1$, с индексом 3 и 4 – $\Delta/a = 0,125$ и $\Delta/a = 0,15$ соответственно, а с индексами 5 и 6 – $\Delta/a = 0,175$ и $\Delta/a = 0,2$ соответственно.

Максимальная относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости, полученных по предлагаемой методике, представлена в таблице 3.1.

Согласно полученным данным, с целью уменьшения погрешности расчетов, для диапазона соотношений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,15$ рекомендуется использовать поправочный коэффициент k_2 , а в интервале соотношений $0,15 < \Delta/a \leq 0,2$ им можно пренебречь.

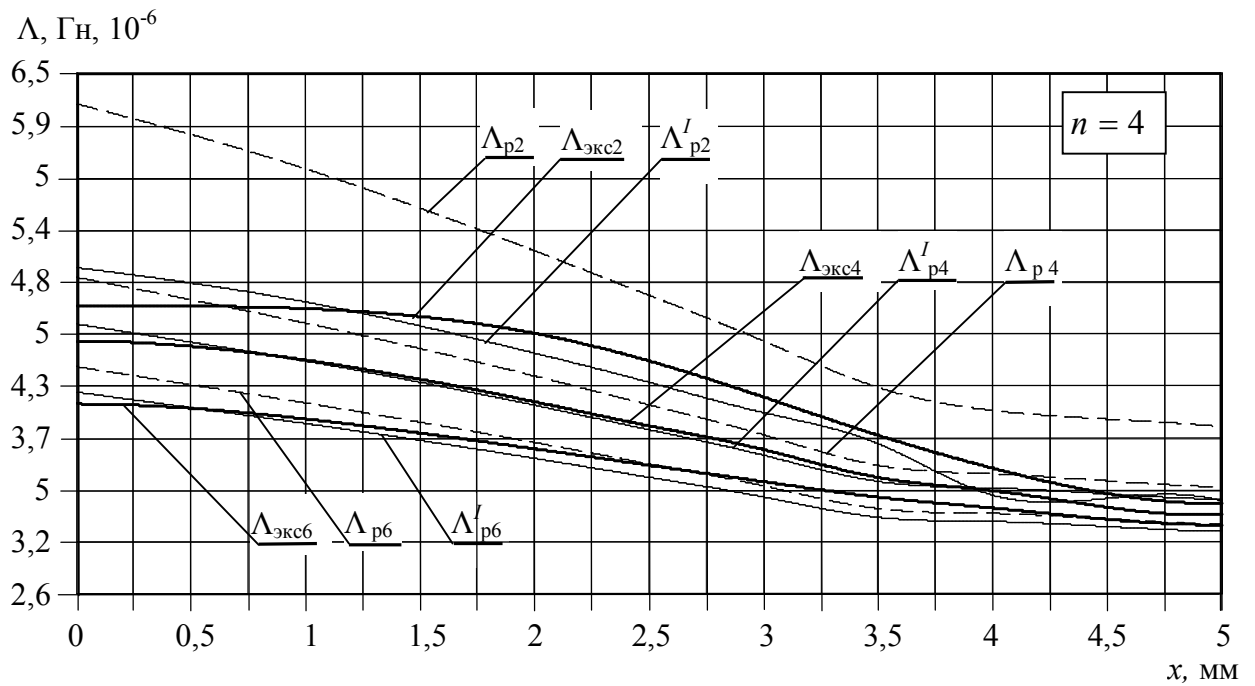


а

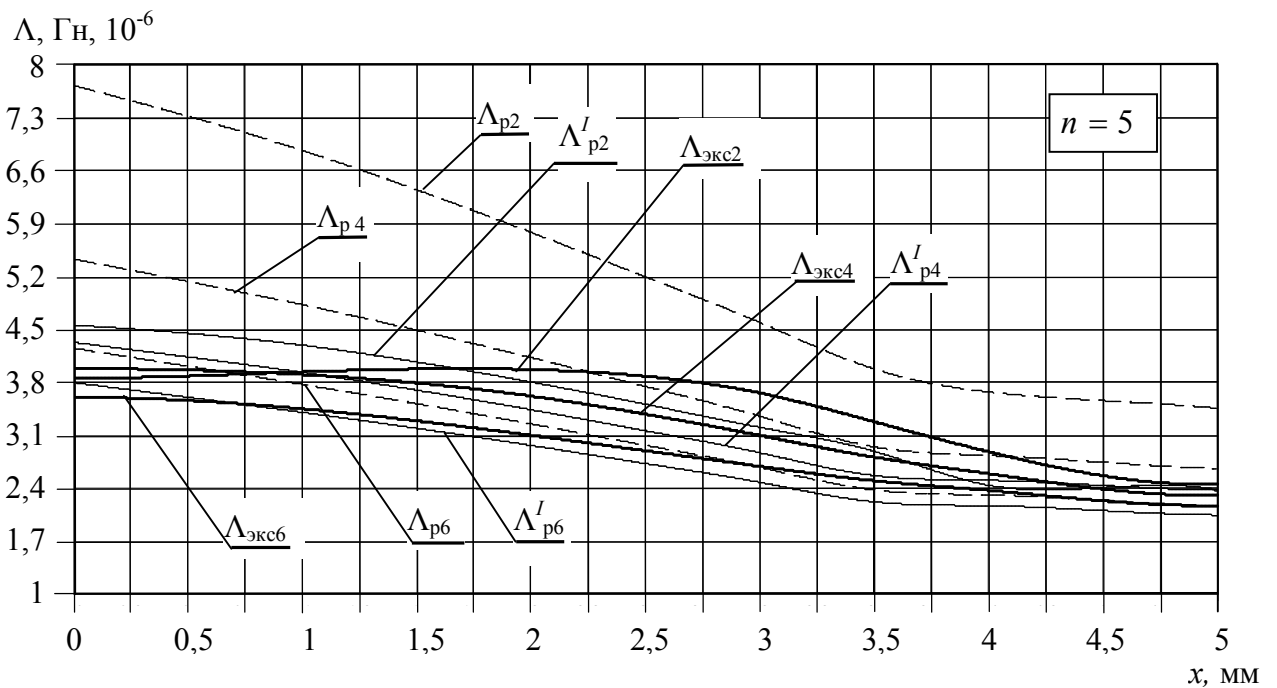


б

Рисунок 3.20– Графики зависимости магнитной проводимости от смещения x зубцов



а



б

Рисунок 3.21 – Графики зависимости магнитной проводимости от смещения x зубцов

Таблица 3.1 – Максимальная относительная погрешность расчетных значений магнитной проводимости

Значение Δ/a	Погрешность без учета k			Погрешность с учетом k		
	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
0,075	60%	64%	70%	15%	15%	15%
0,1	44%	52%	68%	8,5%	13%	15%
0,125	30%	32%	40%	12,3%	13%	15%
0,15	18%	18%	30%	14%	14%	15%
0,175	11%	12%	14%	11%	10%	21%
0,2	10%	13%	15%	10%	8%	24%

Разработанная комбинированная методика предлагается для расчета магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны развернутых вариантов ЛЭМД рисунка 1.16 (параграф 1.5). При этом результаты расчета для конструктивной схемы рисунка 1.16, в, необходимо умножать на корректирующий коэффициент k_1 , учитывающий угол раскрытия полюсов α и число пар полюсов z статора двигателя.

Использование предлагаемой методики при расчете магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД позволяет сократить набор операций, необходимых для расчета, и повышать его точность [128, 129].

3.5 Выводы

1. Установлено, что для интервала соотношений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ наибольшая доля в суммарном значении магнитной проводимости Λ_{Σ} приходится на составляющую магнитной проводимости Λ_1 , определяемую геометрической фигурой в виде призмы. Отношение $\Lambda_1/\Lambda_{\Sigma}$ в интервале соотношений размеров $1 \leq c/a \leq 2$ изменяется в пределах 1-3 %.

2. Предложен поправочный коэффициент k_2 , учитывающий число зубцов якоря, индукцию в стали и угол рассогласования кривых, определяющих значения составляющей магнитной проводимости Λ_1 , полученные в результате конечно-элементного моделирования и аналитических расчетов. Предложено использовать поправочный коэффициент k_2 применительно к составляющей магнитной проводимости Λ_1 при аналитических подходах к расчету магнитной проводимости методом вероятных путей потока.

3. Выявлено, что для диапазона соотношений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$ и $a = 4$ мм в интервале смещения зубцов относительно друг друга $0,25 \leq x \leq 3,75$ мм производная составляющей магнитной проводимости Λ_1 изменяется в пределах 12 % от среднего значения Λ_1 на данном участке. В связи с этим поправочный коэффициент k_2 может быть использован в расчетах как для значений составляющей магнитной проводимости Λ_1 , определяемой геометрической фигурой в виде призмы, так и для ее производной.

4. Разработана комбинированная методика расчета магнитной проводимости воздушных зазоров зубцово-пазовой зоны ЛЭМД, сочетающая результаты численного эксперимента и аналитических расчетов, основанных на методе вероятных путей потока. Максимальная относительная погрешность расчетных значений, полученных по предлагаемой методике для интервала соотношений $0,075 \leq \Delta/a \leq 0,2$, не превышает 15 %.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ЛЭМД С УЛУЧШЕННЫМИ УДЕЛЬНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ

4.1 Критерии выбора рациональных конструкций ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной

Проблема разработки рациональных конструкций электромагнитных двигателей сводится к нахождению их рациональных размеров. Решение данной проблемы усложняется тем, что критерии для выбора наилучшей конструкции могут быть различны в зависимости от предъявляемых требований, например, условий работы, назначения устройства, в которое интегрируется данный двигатель. Однако условия рационального выбора по ряду критериев могут не совпадать, поэтому, как правило, расчет рациональных конструкций проводят по какому-то одному определяющему критерию или по нескольким сходным [130, 131]

С точки зрения предварительной оценки разрабатываемой конструкции электромагнитного двигателя выделяют следующие наиболее важные критерии:

1. Статическая тяговая характеристика, представляющая собой зависимость электромагнитной силы от положения якоря при различных постоянных значениях напряжения, подведенного к обмотке или тока в обмотке: $F_{эм} = f(x)$ при $U = \text{const}$ или $I = \text{const}$ [131-136].

2. Характеристика противодействующих усилий электромагнита, которая представляет собой зависимость противодействующих сил от перемещения якоря: $F_{п} = f(x)$.

Сопоставление противодействующей и тяговой характеристики дает возможность сделать предварительное заключение о работоспособности электромагнитного двигателя. Для нормального функционирования устройства необходимо, чтобы на всем интервале рабочего хода якоря выполнялось условие $F_{п} < F_{эм}$ [131-133, 137].

3. Нагрузочная характеристика, которая связывает значение электромагнитной силы и напряжения, подведенного к обмотке, или тока в ней, при фиксиро-

рованном положении якоря: $F_{\text{ЭМ}} = f(u)$ или $F_{\text{ЭМ}} = f(i)$ [131].

5. Интегральная работа – это параметр, характеризующий потенциальную возможность в совершении полезной механической работы двигателем.

Графическое пояснение к данному критерию оценки представлено на рисунке 4.1, где заштрихованная площадь под кривой пропорциональна значению интегральной работы на выбранном участке хода якоря.

4. Условная полезная работа представляет собой произведение значений перемещения якоря x и тягового усилия $F_{\text{ЭМ}}(i, x)$, возникающего при данном перемещении:

$$A_{\text{у.п.}} = F_{\text{ЭМ}}(i, x)x \quad (4.1)$$

Графическое пояснение к данному критерию оценки представлено на рисунке 4.2

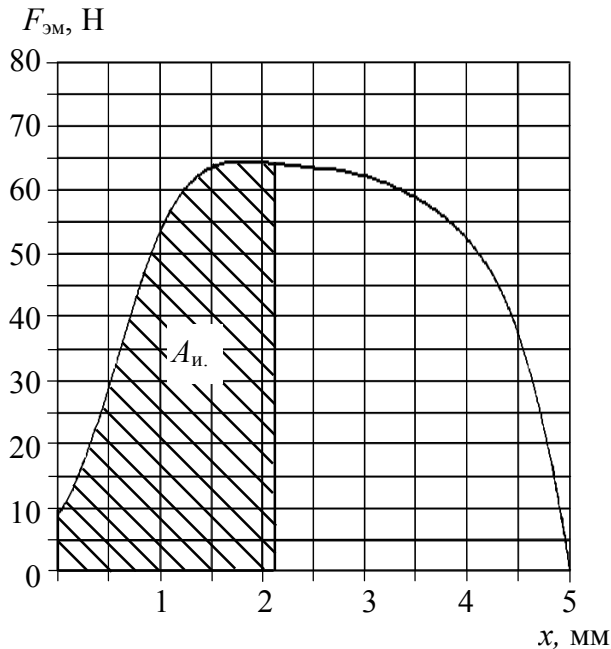


Рисунок 4.1 – Интегральная работа электромагнитного двигателя

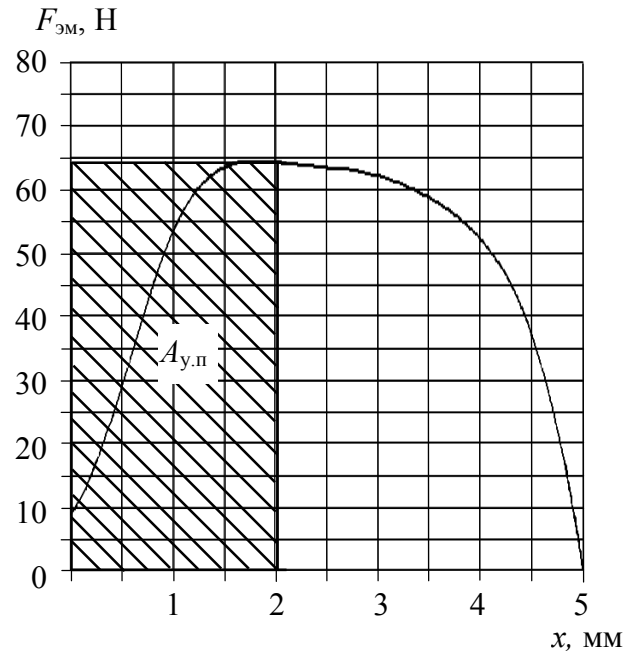


Рисунок 4.2 – Условная полезная работа электромагнитного двигателя

5. Механическая эффективность – это относительная величина интегральной работы $A_{и}$ по сравнению с максимально возможной $A_{и \max}$, соответствующей всей площади под кривой на рисунке 4.1 [138]:

$$\eta_{\text{мех}} = A_{и} / A_{и \max} \quad (4.2)$$

6. Время срабатывания электромагнитного двигателя – это время с момента подачи сигнала на обмотку до перехода якоря в его конечное положение.

7. Характеристика нагрева, которая представляет собой зависимость температуры нагрева обмотки электромагнитного двигателя от продолжительности включенного состояния: $\vartheta_{\text{обм}} = f(t)$ [68, 131].

8. Показатель добротности электромагнитного двигателя определяется как отношение его массы $M_{\text{дв}}$ к максимальному значению интегральной работы $A_{и \max}$:

$$Д = \frac{M_{\text{дв}}}{A_{и \max}} \quad (4.3)$$

9. Показатель экономичности является отношением потребляемой обмоткой электромагнита мощности W к максимальному значению интегральной работы $A_{и \max}$:

$$\mathcal{E} = \frac{W}{A_{и \max}} \quad (4.4)$$

Все эти показатели позволяют установить пригодность электромагнитного двигателя к определенным условиям его работы.

Выбор рациональных конструкций вариантов ЛЭМД, описанных в параграфе 1.5. (рисунок 1.16), выполнялся по таким критериям, как: максимальные зна-

чения статического тягового усилия и интегральной работы в минимальном объеме магнитной системы.

4.2 Исследование конструктивных схем ЛЭМД с различной конфигурацией зубцово-пазовой зоны по силовым и интегральным критериям оценки

Для обеспечения наибольшей эффективности по удельным силовым и энергетическим показателям таких технологических устройств как компрессоры, вибраторы, насосы и т.д., в большинстве случаев в их приводе используют электромагнитные линейные двигатели с фиксацией конечного положения якоря. Это позволяет наилучшим образом концентрировать магнитное поле в области электро-механического преобразования магнитной энергии.

Однако при проектировании подобных устройств возникает необходимость создания тяговых характеристик специального вида, не допускающих удара в рабочем диапазоне перемещений якоря, что может быть связано с совершенствованием самих электромеханических преобразователей энергии или оптимизацией алгоритмов управления ими [139, 140].

Наличие динамической зависимости между массой механических звеньев устройства и условиями его работы, а также высокой частоты колебаний (до 50 Гц) усложняет процесс управления и качество позиционирования якоря при перемещении, что не гарантирует безударной работы устройства.

Наилучшие результаты в достижении поставленной цели можно получить применением ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, это дает ряд преимуществ, когда отсутствие механической фиксации якоря сочетается со значительным тяговым усилием и относительно малыми размерами самого устройства.

На рисунке 4.3 представлены цилиндрические варианты ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной. Прототипами данных конструктивных схем являются варианты двигателей рисунка 1.16, а и рисунка 1.16, б параграфа 1.5.

Выполнение двигателей цилиндрической формы позволяет конструктивно

просто выполнить элементы магнитопровода и направляющих устройств для прямолинейного перемещения якоря.

Цилиндрический двигатель (рисунок 4.3, а) содержит статор 1, имеющий наружный магнитопровод с примыкающими к нему полюсами и расположенной внутри катушкой 2 с подвижным элементом (якорем) 3. На одной из сторон якоря выполнены равномерно чередующиеся зубцы 4 в виде колец, являющиеся частью магнитной системы и расположенные перпендикулярно передаваемой силе.

По образующей внутренней цилиндрической поверхности полюсной системы статора выполнены ответные зубцы 5 с равномерным шагом, равным шагу зубцов на якоре.

Структура элементов магнитной системы двигателя удовлетворяет следующим значениям геометрических соотношений: $h_k/l_k = 0,5$; $a/\tau = 0,4$; $a/b = 1,0$; $c/\tau = 0,6$; $\Delta/\tau = 0,05$, где h_k – высота обмоточного пространства; l_k – длина обмоточного пространства; b – высота зубца; a и c – соответственно ширина зубца и межзубцового расстояния, τ – зубцовое деление; Δ – воздушный технологический зазор.

Между полюсными элементами статора и якорем по конструктивно-технологическим соображениям выполнен воздушный зазор Δ , исключающий их механическое взаимодействие.

При протекании тока в катушке движение якоря осуществляется в аксиальном направлении. Направление движения якоря определяется начальным положением зубцов на якоре по отношению к зубцам на полюсах статора.

В другом варианте двигателя (рисунок 4.3, б) достигается симметрирование магнитной системы за счет того, что зубцы 4, 5 на якоре 3 и ответные зубцы 6, 7 на полюсах статора 1 выполнены по симметричной, по отношению к катушке 2, двухсторонней схеме. По сути вариант двигателя, выполненный по рисунку 4.3, б, является логическим завершением варианта двигателя по схеме рисунка 4.3, а. Структура элементов магнитной системы удовлетворяет тем же соотношениям.

На рисунке 4.3, в приведена конструкция аналогичного по назначению и принципу действия линейного электромагнитного двигателя, но в отличие от ва-

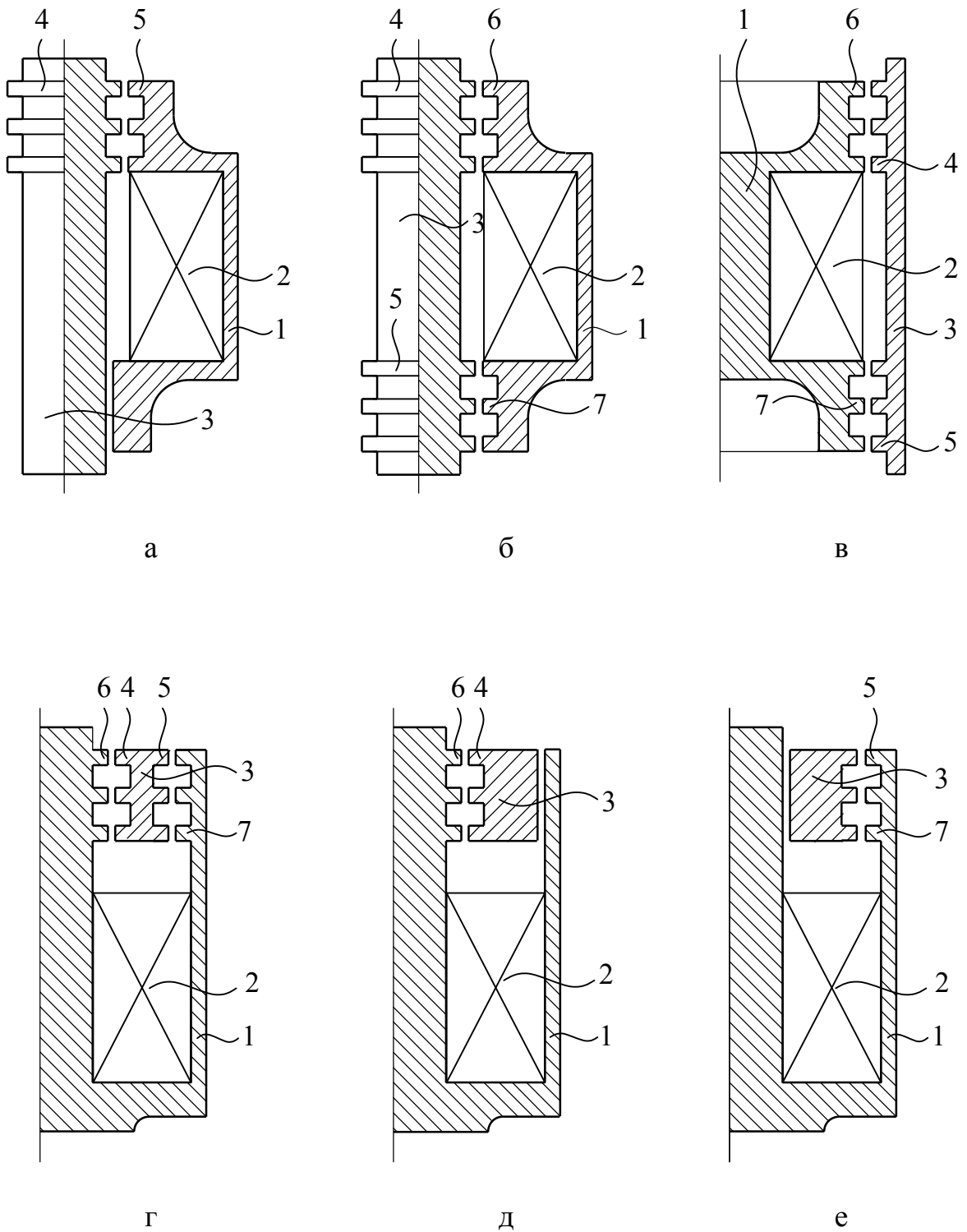


Рисунок 4.3 – Варианты конструктивных схем двигателей

риантов двигателей рисунка 4.3, а и рисунка 4.3, б статор 1 с намотанной на него катушкой 2 расположен внутри цилиндрического по форме якоря 3. Предлагаемый вариант схемы по конструкции магнитопровода имеет симметрированную магнитную систему. Зубцы 4, 5 на якоре 3 и зубцы 6, 7 на полюсах статора 1 выполнены по симметрированной схеме.

Рассмотренный вариант схемы двигателя (рисунок 4.3, в) по аналогии с вариантом схемы двигателя рисунка 4.3, а может быть также реализован по односторонней схеме.

Принципиальные конструктивные отличия имеют линейные электромагнитные двигатели, выполненные по вариантам схем, представленным на рисунке 4.3, г–е. Основу конструкции таких двигателей составляет цилиндрический линейный электромагнитный двигатель поперечного магнитного потока с кольцеобразным якорем [84].

Цилиндрический двигатель (рисунок 4.3, г) содержит статор 1 с расположенными внутри катушкой 2 и кольцеобразным втяжным якорем 3. На внешнем и внутреннем диаметре якоря выполнены с равным шагом зубцы 4 и 5, расположенные перпендикулярно передаваемой силе. По внутренним диаметрам статора 1 выполнены с равным шагом ответные зубцы 6 и 7. Структура элементов магнитной системы двигателя удовлетворяет соотношениям варианта схемы рисунка 4.3, а.

В варианте двигателя по рисунку 4.3, д предполагается использование односторонней зубчатости якоря 3 по его внешней образующей цилиндрической поверхности, а в варианте двигателя по рисунку 4.3, е – по его внутренней образующей цилиндрической поверхности. Следовательно, сочетание конструктивных особенностей двигателей, выполненных по вариантам схем рисунка 4.3, д и рисунка 4.3, е, позволяет реализовать вариант двигателя рисунка 4.3, г [94].

Максимальная разница в значениях объемов рассматриваемых вариантов двигателей не превышает 6 %.

На основании анализа характера распределения магнитных полей и сил можно сформулировать требования к построению магнитных систем с зубцово-

пазовой зоной, заключающиеся в наибольшей концентрации магнитного поля в области электромеханического преобразования энергии, снижении магнитных сопротивлений путем сокращения длины силовых линий магнитного поля, формировании за счет пространственной геометрии взаимодействующих элементов, синхронизирующих характеристик требуемого вида, повышении магнитной индукции в рабочем зазоре концентрацией магнитных полей [139-142].

Алгоритм исследования базировался на использовании семейства тяговых характеристик, определяемых для различных взаимных положений якоря относительно статора в интервале одного шага зубцового деления τ с применением метода конечных элементов [144, 145]. Апробация данного метода показала высокую степень точности получаемых результатов для электромагнитных двигателей со сложной конфигурацией магнитной системы [90-92, 99, 145].

В процессе расчетов для каждого варианта двигателя рисунка 4.3 рассчитывалась статическая тяговая характеристика при одинаковых значениях намагничивающей силы обмоток и значениях индукции, близких к насыщению стальных участков магнитопровода при положении зубцов якоря по отношению к зубцам статора, обеспечивающем наименьшее магнитное сопротивление.

Также варьирование количества пар зубцов оказывает влияние на форму тяговых характеристик, в связи с чем в проводимых исследованиях количество пар зубцов n во всех вариантах двигателей было ограничено $n = 3$. Форма и соотношения размеров зубцово-пазовой зоны двигателя, как и свойства магнитных материалов, принимались одинаковыми. Намагничивающая сила катушки принималась равной $F = 1000$ А при токе $I = 4$ А. При этом индукция в стали не превышала 2 Тл.

На рисунке 4.4 приведены полученные в ходе численного эксперимента значения статического тягового усилия в зависимости от положения якоря. Номер кривой, указанный на рисунке, соответствует варианту схемы двигателя на рисунке 4.3.

Положение прямоугольных по форме зубцов якоря относительно зубцов на полюсах статора, указанное на рисунке 4.3, соответствует точке статического тя-

гового усилия с координатой $x = 5$ мм. Точка на графике (рисунок 4.4) с координатой $x = 0$ мм соответствует начальному положению якоря.

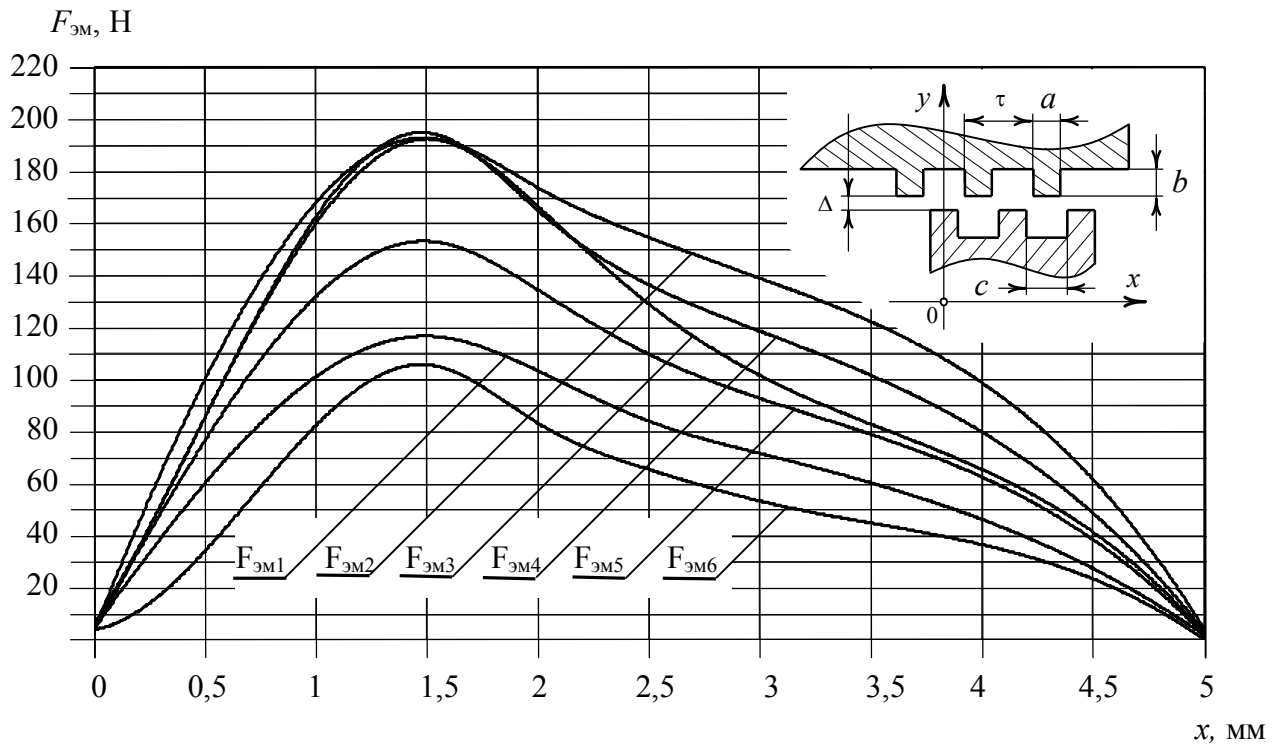


Рисунок 4.4 – Статические тяговые характеристики

В результате исследований было установлено, что при одном и том же значении намагничивающей силы и размера воздушного технологического зазора Δ статическое тяговое усилие для различных вариантов исполнения двигателей существенно отличается.

Анализ показал, что наилучшими показателями обладают варианты схем двигателей рисунка 4.3, б-г.

Сравнение двух наиболее близких по конструкции вариантов схем двигателей с одно- (рисунок 4.3, а) и двухсторонней продольной зубчатостью якоря (рисунок 4.3, б) показывает, что выполнение зубцово-пазовой зоны по двухсторонней схеме позволяет добиться увеличения тягового усилия в 1,7 раза. Это связано с тем, что тяговое усилие пропорционально квадрату индукции и площади сечения зубцово-пазовой зоны, тогда при вдвое большей ее площади в варианте схемы двигателя рисунка 4.3, б по сравнению с вариантом рисунка 4.3, а практически

двухкратное увеличение усилия возможно только при постоянстве индукции в области технологического воздушного зазора Δ .

Возможность данного утверждения доказывает распределение индукции в воздушном технологическом зазоре Δ , полученное по ширине зубцово-пазовой зоны и представленное на рисунке 4.5, а и рисунке 4.5, б при притянutom якоре, соответствующие вариантам схем двигателей рисунка 4.3, а и рисунка 4.3, б.

Так как все варианты схем двигателей имеют одинаковые соотношения размеров и отличаются только одно- или двухсторонней зубчатостью магнитной системы и ее конструктивного исполнения, то при одинаковой площади сечения зубцово-пазовой зоны тяговое усилие будет в значительной степени определяться индукцией.

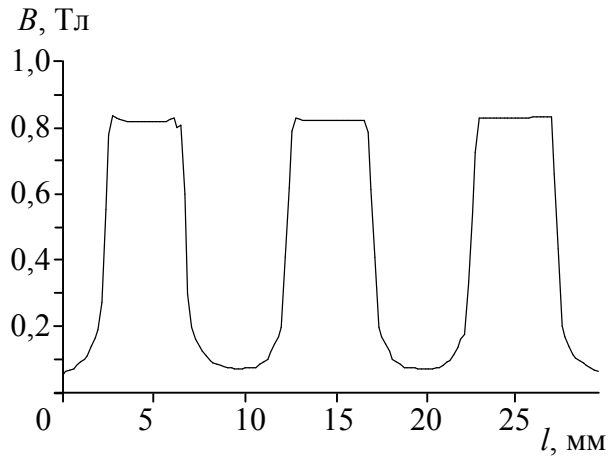
Сравнения статических тяговых усилий (рисунок 4.4) и соответствующих вариантам схем двигателей распределений индукции в воздушном технологическом зазоре Δ (рисунок 4.5) показывают полную идентичность между максимальными значениями тягового усилия и индукции.

Для варианта схемы двигателя (рисунок 4.3, г) распределение индукции в воздушном технологическом зазоре Δ показано по внутреннему диаметру якоря (рисунок 4.5, г), а распределение индукции по внешнему диаметру аналогично варианту схемы двигателя рисунка 4.3, е.

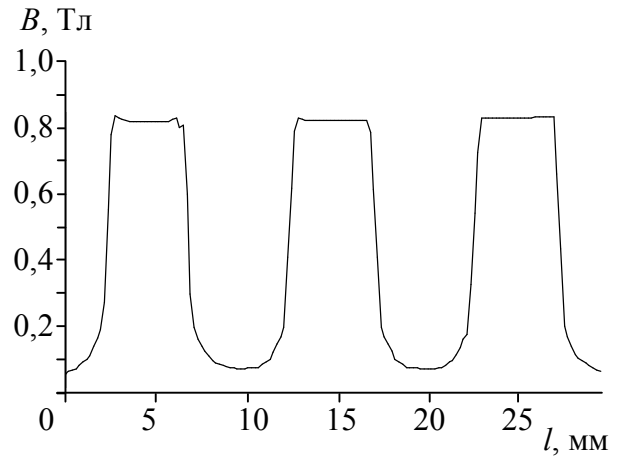
При использовании того или иного варианта схемы двигателя (для принятого за 100%) на рисунке 4.6 для сравнения показано распределение максимальных значений статических тяговых усилий.

Дальнейшее сравнение рассматриваемых вариантов двигателей приведено по интегральной работе (рисунок 4.7): в диапазоне рабочего хода определялась площадь под кривыми статических тяговых характеристик (рисунок 4.4). Интегральная работа $A_{\text{и}}$ представлялась в процентах по отношению (принятая за 100%) к варианту схемы двигателя рисунка 4.3, б.

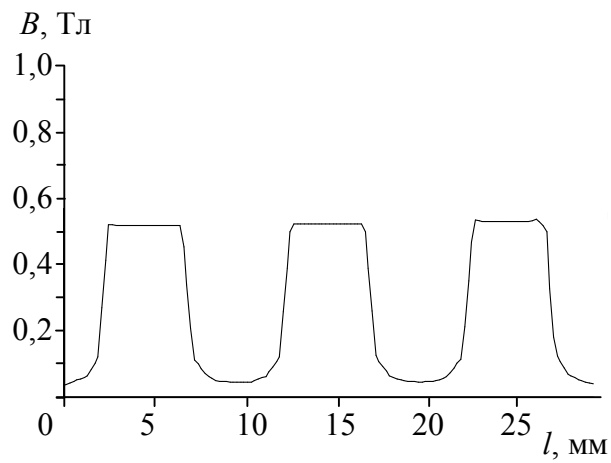
Сравнение вариантов схем двигателей по критерию интегральной работы показало, что наиболее высокими значениями обладают варианты двигателей рисунка 4.3, б и рисунка 4.3, г.



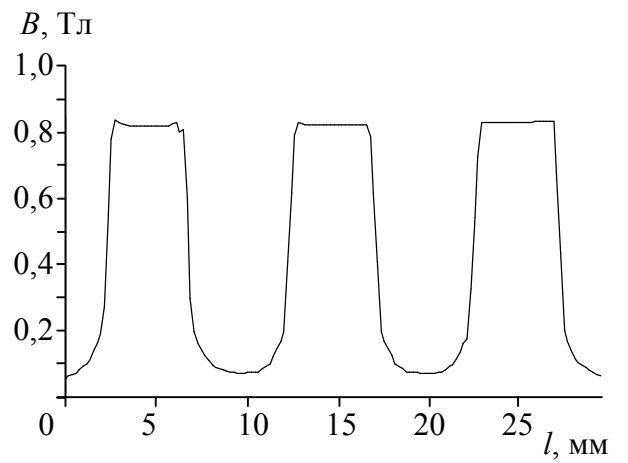
а



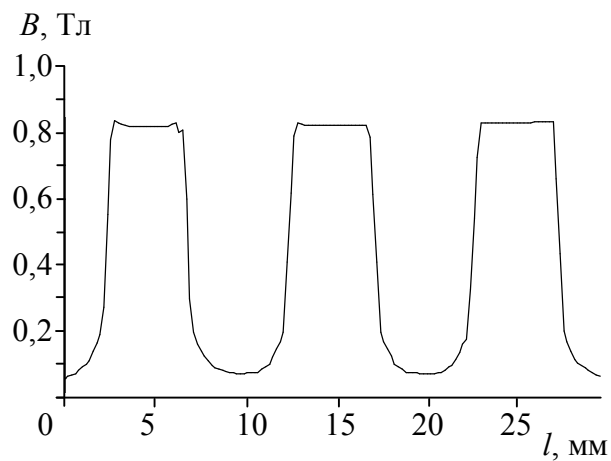
б



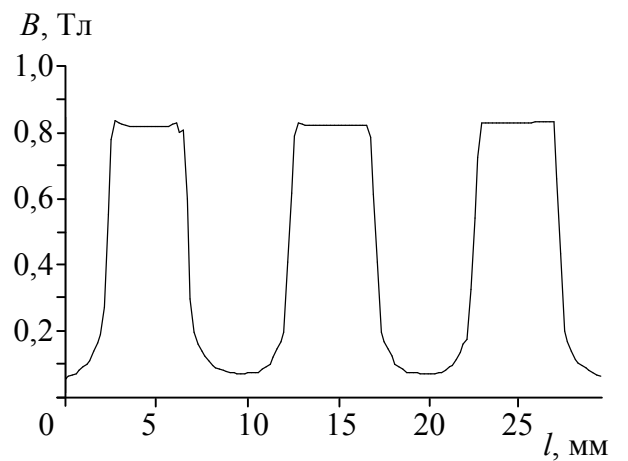
в



г



д



е

Рисунок 4.5 – Распределение индукции в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД

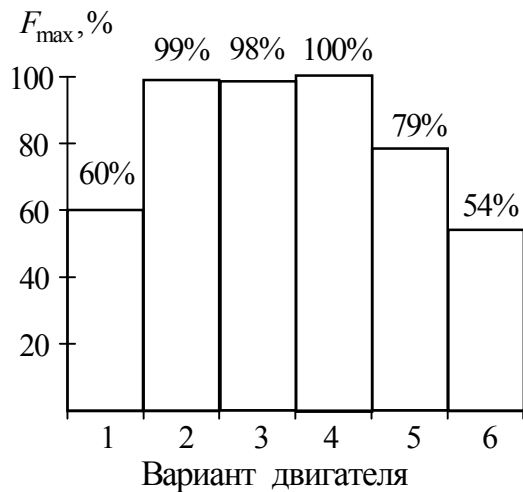


Рисунок 4.6 – Относительные значения максимального тягового усилия

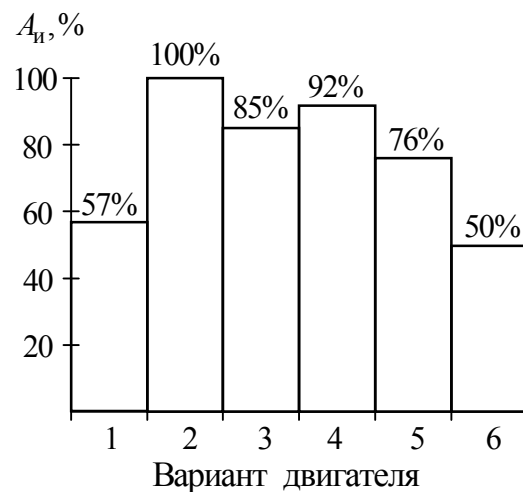


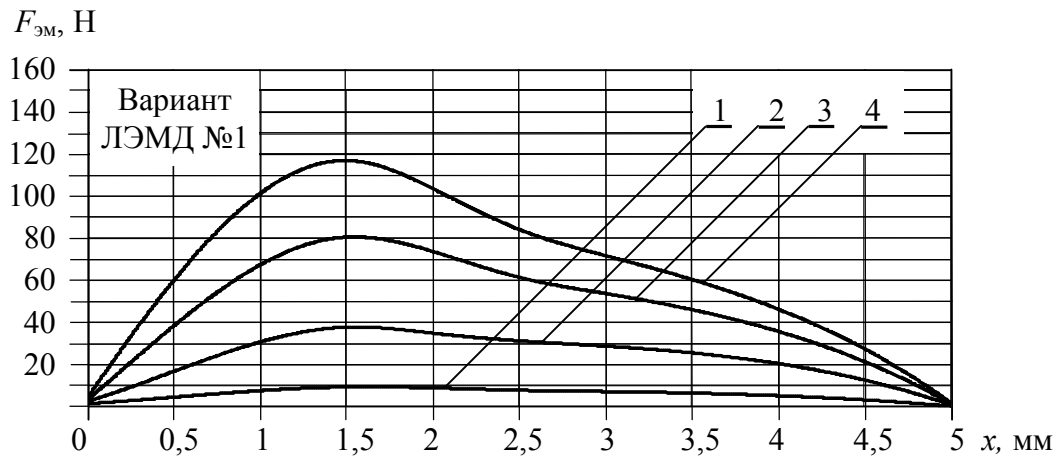
Рисунок 4.7 – Относительные значения показателя интегральной работы

Так как максимальная разница в значениях объемов исследуемых двигателей не превышает 6 %, то и удельные показатели $F_{\text{эм max}}$, A_i на единицу объема магнитной системы практически не будут отличаться в процентном соотношении, как и их абсолютные значения (рисунок 4.6 и рисунок 4.7).

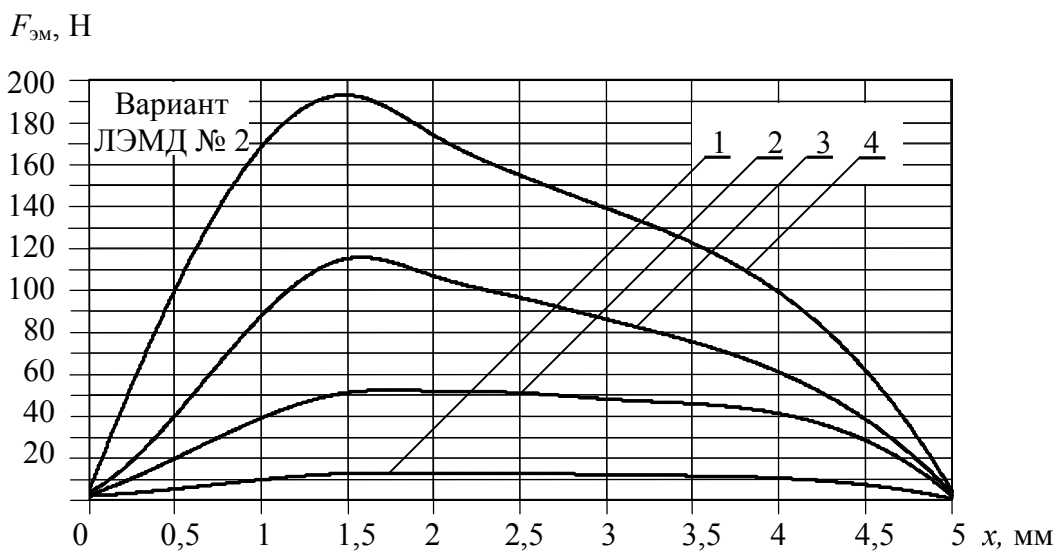
Исследования показали, что при сохранении массогабаритных показателей и одинаковой структуре элементов магнитной системы варианты ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной могут в значительной степени отличаться между собой по силовым и энергетическим показателям [94]. Наиболее высокими показателями обладают двигатели, выполненные по вариантам схем рисунка 4.3, б и рисунка 4.3, г.

При изменении параметров магнитной системы, например тока, максимальные значения статического тягового усилия будут достигаться при различных значениях смещения зубцов якоря относительно зубцов статора. С целью проверки данного утверждения для ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной рисунка 4.3 были выполнены численные эксперименты по определению максимальных значений статического тягового усилия в интервале значений тока $I = 1 \div 4$ А. При этом значения индукции в стали находилась в диапазоне $B_{\text{ст}} = 0,6 \div 2$ Тл.

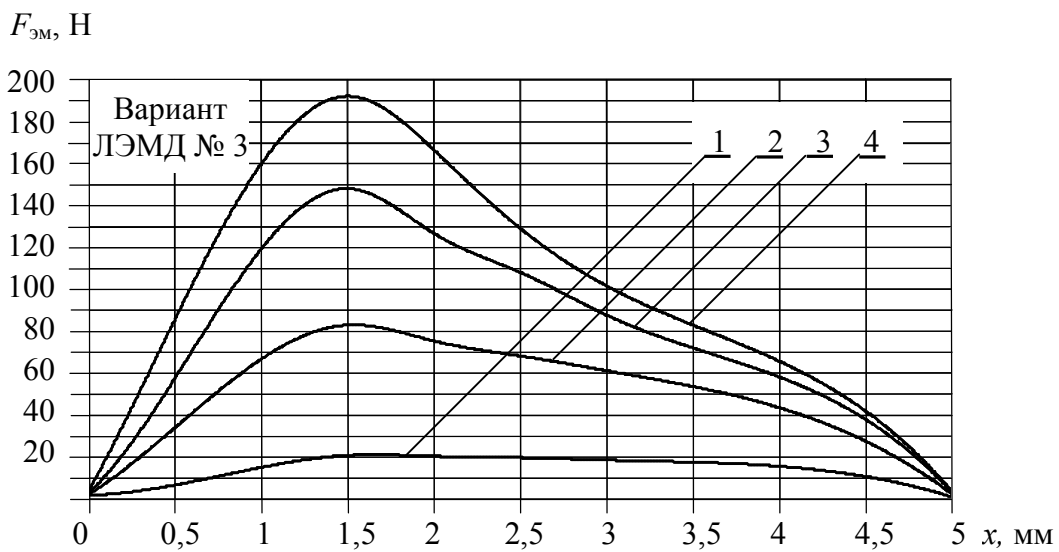
Результаты исследования представлены на рисунке 4.8 и рисунке 4.9, где кривые с индексом 1, характеризуют значения статического тягового усилия при токе $I = 1$ А, кривые с индексом 2 – при токе $I = 2$ А и т. д.



а

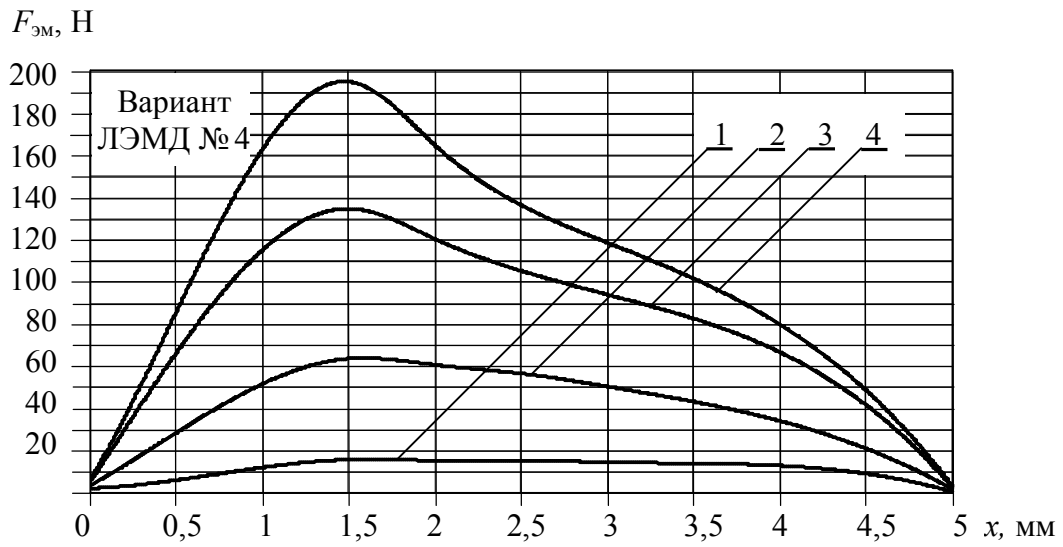


б

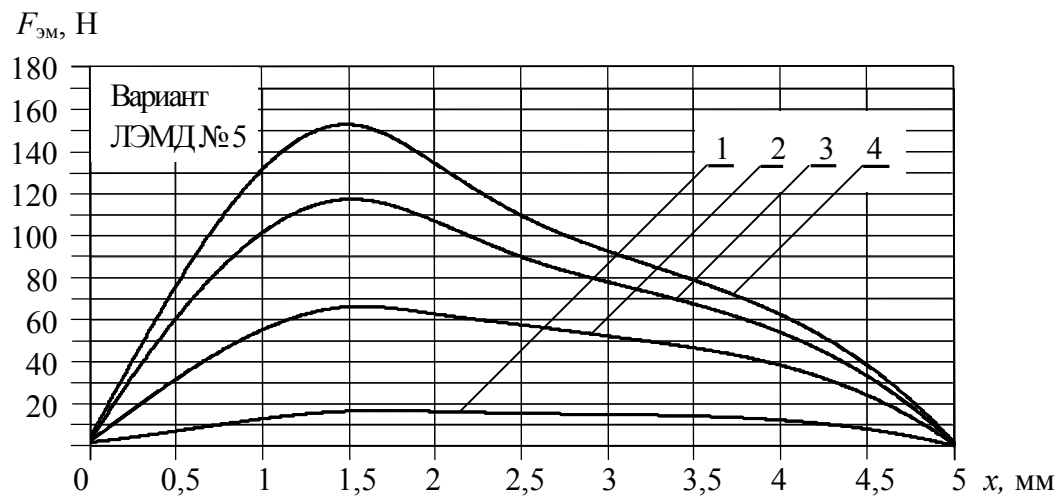


в

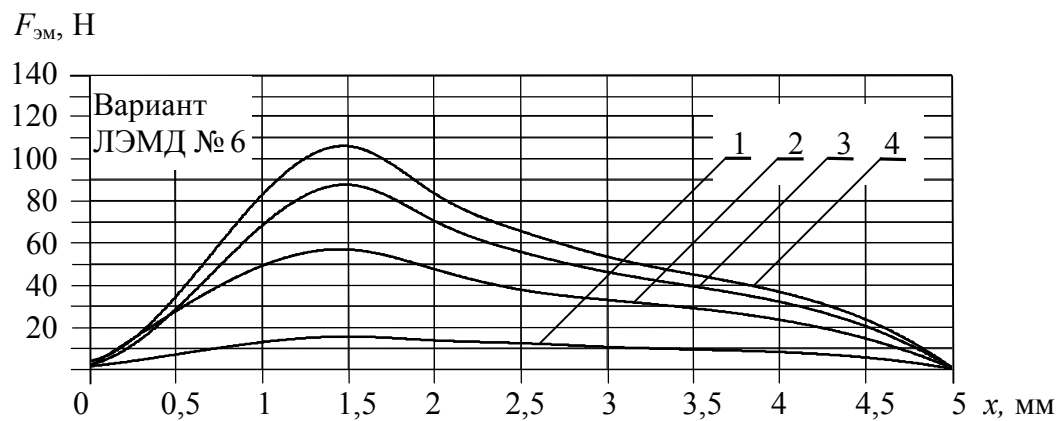
Рисунок 4.8 – Статические тяговые усилия ЛЭМД с одним воздушным технологическим зазором



а



б



в

Рисунок 4.9 – Статические тяговые усилия ЛЭМД с двумя воздушными технологическими зазорами

Номеру варианта ЛЭМД, указанному на рисунках 4.8-4.9, соответствует вариант двигателя рисунка 4.3.

Установлено, что при значениях тока до $I = 1$ А максимальные значения статического тягового усилия неявно выражены. В интервале значений тока $1 \text{ А} < I \leq 4 \text{ А}$ максимальные значения статического тягового усилия достигаются при одинаковых значениях смещения зубцов якоря относительно зубцов статора. Следовательно, рациональные геометрические соотношения ЛЭМД, полученные по критерию максимальных значений статического тягового усилия в интервале $I = 1 \div 4 \text{ А}$ (при $B_{\text{ст}} = 0,6 \div 2 \text{ Тл}$), будут иметь одинаковые значения.

4.3 Разработка и обоснование новой конфигурации зубцово-пазовой зоны

При проектировании любого технологического оборудования, в том числе компрессорного, необходимо уделять должное внимание их конструктивному исполнению, так как оно напрямую влияет на получаемую статическую тяговую характеристику [146, 147].

На основании проведенных ранее исследований было установлено, что на значения статического тягового усилия в значительной степени влияет конфигурация и пространственное расположение зубцово-пазовой зоны ЛЭМД. В частности, в варианте исполнения двигателя, изображенного на рисунке 4.10, а, наблюдается неравномерность распределения линий магнитной индукции, вызванная разной площадью сечений элементов магнитной системы.

Для устранения данного недостатка предлагается выполнять зубцово-пазовую зону двигателя согласно рисунку 4.10, б, так как в данном случае обеспечивается равенство сечений элементов магнитопровода ($S'_1 = \pi R_3^2 - \pi R_2^2$, $S'_2 = \pi R_1^2$) и зубцово-пазовой зоны двигателя ($S_1 = an2\pi r_1$, $S_2 = an2\pi r_2$) (рисунок 4.11). Предлагаемое усовершенствование защищено патентом на полезную модель [148-150].

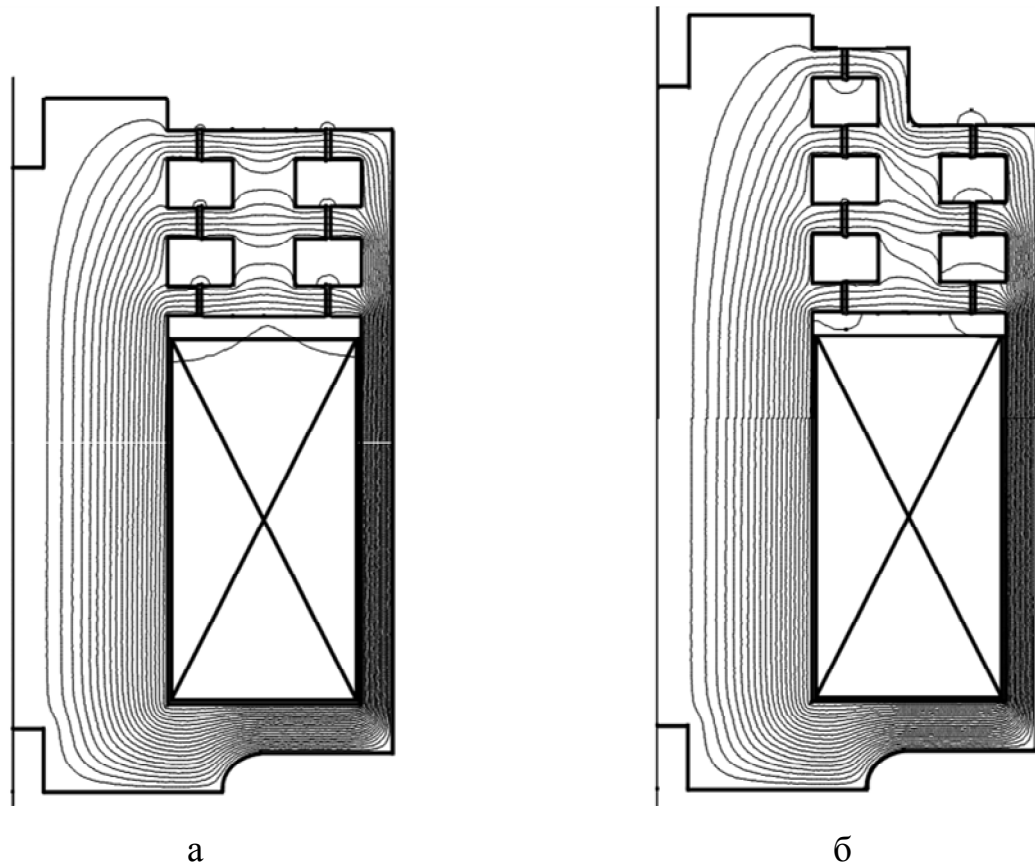


Рисунок 4.10 – Геометрическая структура вариантов конструктивных схем и линий магнитной индукции

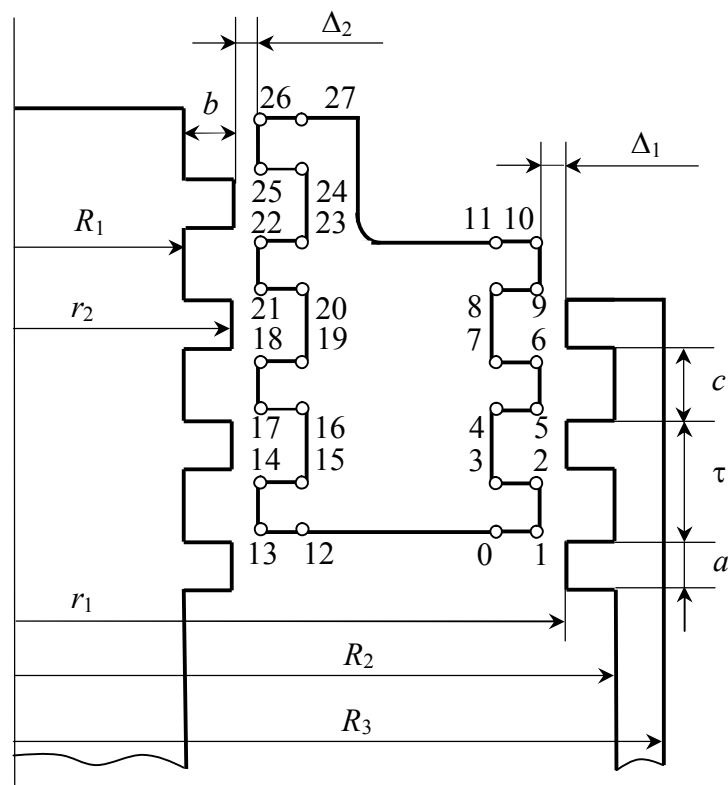


Рисунок 4.11 – Эскиз зубцово-пазовой зоны электромагнитного двигателя

Оценка эффективности вводимого конструктивного усовершенствования выполнялась при осесимметричной постановке задачи по критерию максимального значения статического тягового усилия.

Исследование проводилось при следующих геометрических соотношениях зубцово-пазовой зоны: $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$, $c/a = 1,5$, $b/a = 1$ (рисунок 4.11). Намагничивающая сила катушки при этом составляла $F = 500\text{А}$ ($I = 2\text{А}$).

Положение зубцов якоря относительно зубцов на полюсах статора, указанное на рисунке 4.11, соответствует начальному положению якоря и точке графика статической тяговой характеристики с координатой $x = 0$ мм, а точка с координатой $x = 5$ мм – конечному положению якоря (рисунок 4.10).

Результаты исследования представлены в виде кривых на рисунке 4.12, где номеру кривой соответствует вариант двигателя на рисунке 4.10.

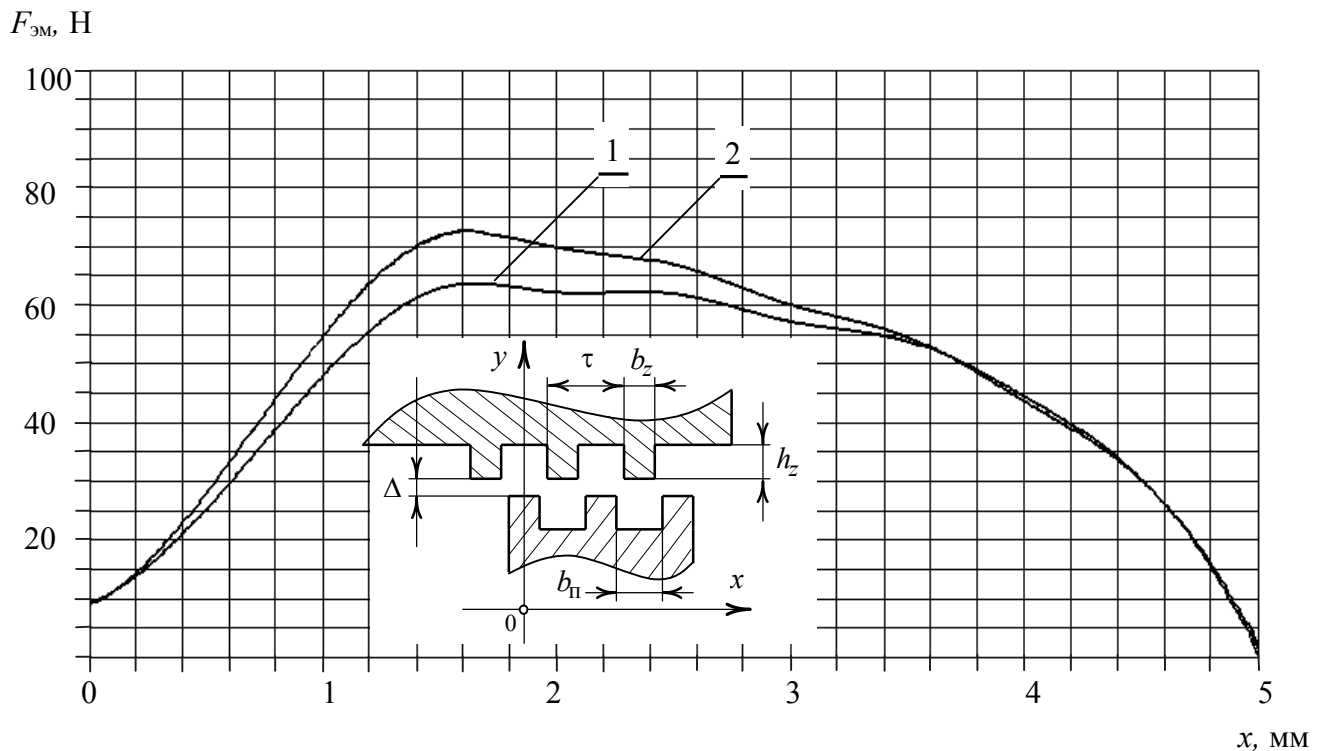


Рисунок 4.12 – Статические тяговые характеристики

Анализ полученных данных показывает, что вариант схемы двигателя, представленный на рисунке 4.10, б, превосходит по силе тяги конструктивный вариант рисунка 4.10, а в 1,12 раза.

Дальнейшее сравнение вариантов схем двигателей было выполнено по относительным максимальными значениям статического тягового усилия, которое позволило установить, что значение создаваемое вариантом рисунка 4.10, а, составляет 88 % от значения, создаваемого вариантом рисунка 4.10, б.

Аналогичным образом было произведено сравнение относительных значений интегральной работы $A_{\text{и}}$, которое позволило установить, что значение создаваемое вариантом рисунка 4.10, а, составляет 92 % от значения, создаваемого вариантом рисунка 4.10, б.

В ходе численного эксперимента выполнен анализ распределения линий магнитной индукции в воздушных технологических зазорах зубцово-пазовой зоны ЛЭМД при смещении зубцов $x = 5$ мм.

Установлено, что для варианта ЛЭМД рисунка 4.10, а разница между значениями индукции в воздушных технологических зазорах Δ составила 61 % (рисунок 4.13, а-б), а для варианта рисунка 4.10, б – 27% (рисунок 4.13, в-г).

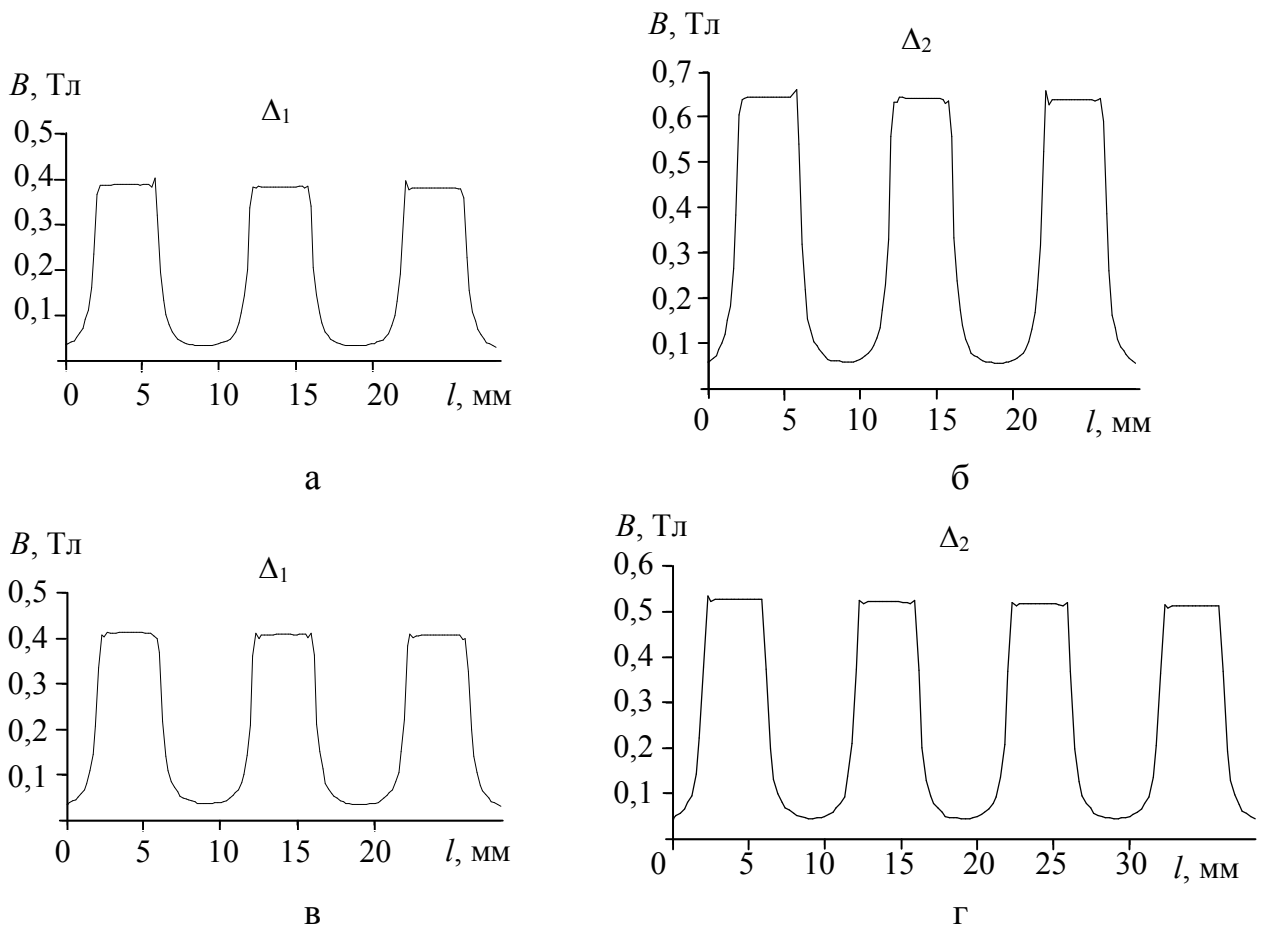


Рисунок 4.13 – Распределение индукции в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД

Следовательно, конструктивное исполнение ЛЭМД согласно рисунку 4.10, б, по сравнению с вариантом рисунка 4.10, а, позволяет уменьшить неравномерность насыщения отдельных элементов магнитопровода [149, 150].

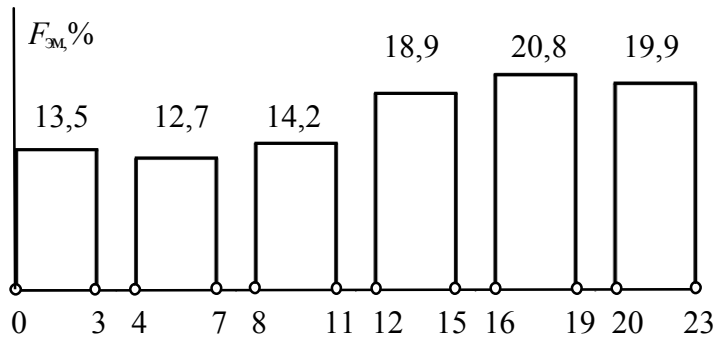
С целью определения наиболее эффективных участков элементов магнитной системы с точки зрения создаваемого максимального значения статического тягового усилия, было выполнено исследование распределения тягового усилия по зубцам в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД [151].

Конечно-элементное моделирование выполнялось при осесимметричной постановке задачи по критерию максимального значения статического тягового усилия. Результаты исследования представлены на рисунках 4.14 и 4.15 в виде диаграмм, отражающих выраженные в процентах отношения значений статического тягового усилия того или иного зубца к значению результирующего усилия в зубцово-пазовой зоне двигателя. На участках, характеризующих межзубцовое расстояние (3-4, 7-8 и т.д.), процентное соотношение тягового усилия от значения результирующего усилия составляет менее 0,01 %, поэтому на диаграммах оно не представлено.

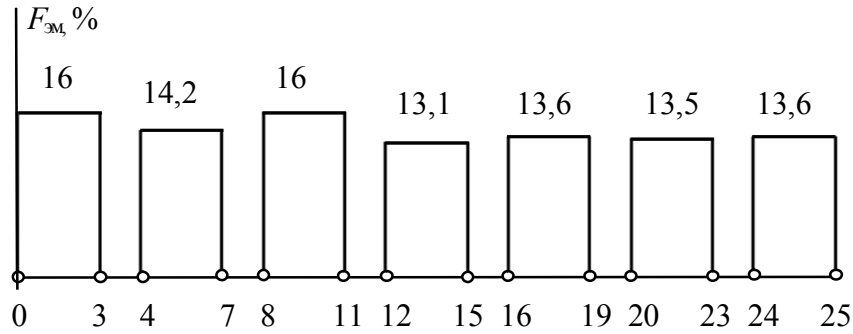
Из данных рисунка 4.14 следует, что значения тяговых усилий вблизи зубцов, расположенных в области Δ_2 , превышают тяговые усилия вблизи зубцов, расположенных в области Δ_1 , в 1,47 раза для варианта рисунка 4.10, а (рисунок 4.14, а) и 1,17 раза для варианта рисунка 4.8, б (рисунок 4.14, б), что подтверждает факт повышения равномерности распределения линий магнитной индукции в элементах магнитной системы [148-150].

При более детальном рассмотрении влияния каждой из сторон зубцов на результирующее значение тягового усилия (рисунок 4.15), создаваемого полем катушки вблизи зубцов, было установлено, что:

- на участках, характеризующих верхнюю часть зубцов (2-3, 6-7, 11-10, 14-15 и т.д.), тяговое усилие направлено против сил движения якоря и составляет около 6% от результирующего усилия;

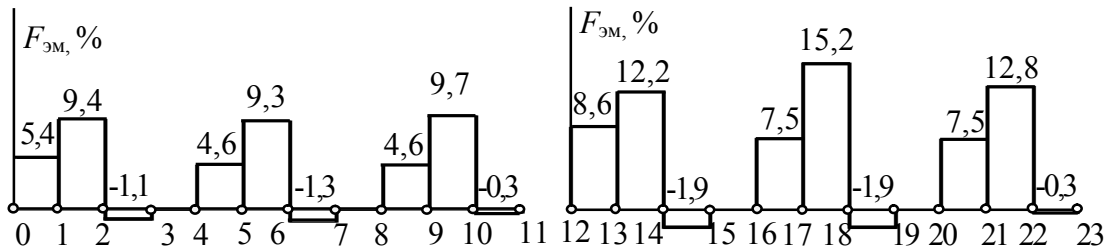


а

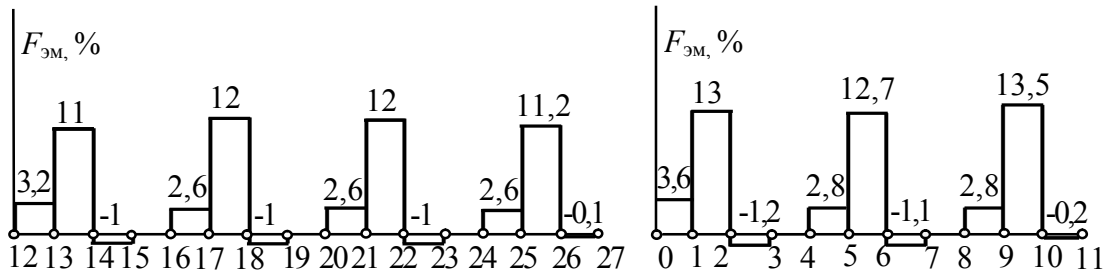


б

Рисунок 4.14 – Распределение тягового усилия по зубцам в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД



а



б

Рисунок 4.15 – Распределение тягового усилия по сторонам зубцов в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД

- наибольшая доля тягового усилия приходится на участки, характеризующие среднюю часть зубца (1-2, 5-6, 9-10, 13-14 и т.д.), и составляет 68% от результирующего значения для варианта рисунка 4.10, а и 85% – для варианта рисунка 4.10, б;

- в конструктивном варианте рисунка 4.10, а тяговое усилие на участках, характеризующих среднюю часть зубцов (1-2, 5-6 и т.д.) превышает тяговое усилие нижней части (0-1, 4-5 и т.д.) в 1,8 раза (рисунок 4.15, а), для варианта рисунка 4.8, б – в 4,3 раза (рисунок 4.15, б). Следовательно, конструктивное исполнение ЛЭМД согласно рисунку 4.10, б позволяет добиться уменьшения в 2,4 раза усилия, противодействующего результирующему усилию.

В заключение следует отметить, что зубцово-пазовую зону ЛЭМД с двумя технологическими воздушными зазорами следует выполнять согласно рисунку 4.10, б, так как при этом происходит увеличение максимальных значений статического тягового усилия и равномерности распределения линий магнитной индукции в зубцово-пазовой зоне магнитной системы [152].

4.4 Результаты поиска и выбора рациональных геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны ЛЭМД по критерию максимальных значений статического тягового усилия

На предварительном этапе проектирования ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной немаловажным является вопрос выбора ее рациональных геометрических соотношений, обеспечивающих получение высоких значений тяговых усилий без увеличения экономической составляющей, связанной с возможным ростом массогабаритных параметров [153-158].

В качестве конструкции, подлежащей исследованию, был выбран вариант ЛЭМД рисунка 4.3, б, как обладающий наиболее высокими максимальными значениями статического тягового усилия из вариантов двигателей, представленных на рисунке 4.3.

Численный эксперимент был выполнен в программном пакете FEMM при осесимметричной постановке решения задачи для наиболее часто встречающихся в литературе диапазонов геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны: $c/a = 1 \div 2$, $b/a = 0,5 \div 1,5$, $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$. При этом намагничивающая сила катушки составила $F = 500\text{A}$ ($I = 2\text{A}$). Значение индукции в стали на участках, подверженных наибольшему насыщению, не превышало 1,8 Тл [159].

Определение рациональных геометрических соотношений зубцово-пазовой зоны в ходе конечно-элементного моделирования осуществлялось при смещении зубцов $x = 1,5$ мм (рисунок 4.16), обеспечивающем получение максимальных значений статического тягового усилия.

В ходе численного эксперимента было установлено, что изменение значений соотношения c/a в диапазоне $0,5 \div 2$ приводит к увеличению максимального значения статического тягового усилия в 2 раза. Изменение значений соотношения b/a в интервале $1 \div 1,5$ не оказывает существенного влияния на получаемые значения статического тягового усилия (рисунок 4.17).

На основании проведенного исследования для диапазона соотношений $\Delta/a = 0,075 \div 0,2$ были получены геометрические соотношения зубцово-пазовой зоны ЛЭМД, обеспечивающие получение максимальных значений статического тягового усилия: $b/a = 1$, $c/a = 1,25 \div 2$. В данном случае при выборе значения межзубцового расстояния c следует руководствоваться требуемым значением рабочего хода якоря.

Помимо геометрических соотношений, на максимальные значения статического тягового усилия также влияет число зубцов в зубцово-пазовой зоне ЛЭМД. На основании этого был проведен численный эксперимент по определению значений статического тягового усилия ЛЭМД с числом зубцов $n = 2 \div 5$ (рисунок 4.18). За базовую конструкцию был принят вариант ЛЭМД рисунка 4.3, б.

Результаты исследований представлены на рисунке 4.19, где номеру кривой с индексом 1 соответствует конструктивная схема двигателя рисунка 4.18, а, с индексом 2 – изображенная на рисунке 4.18, б и т.д. [159].

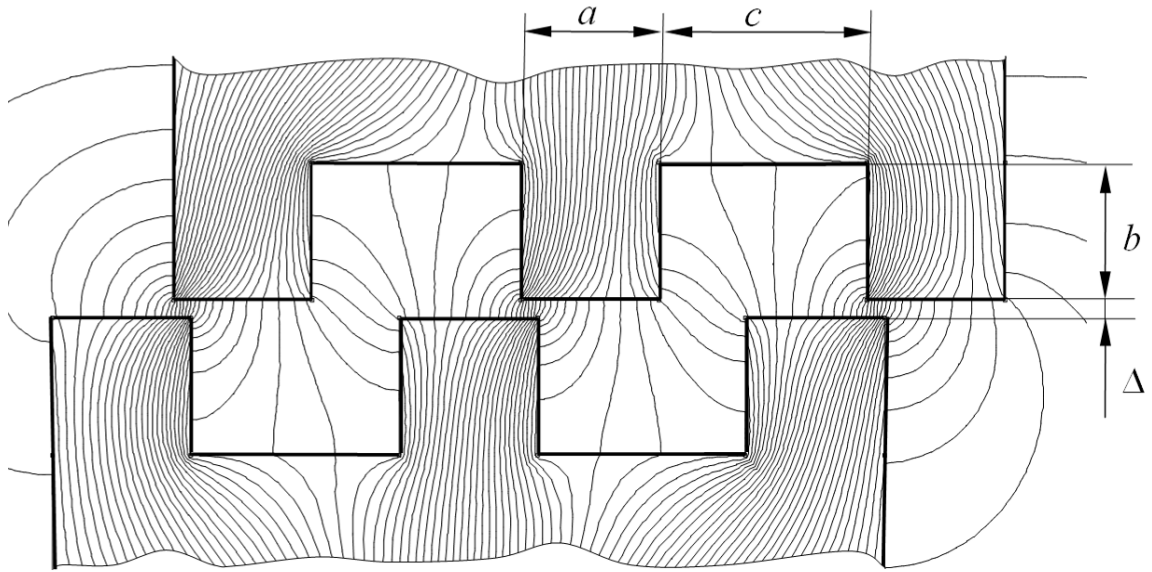


Рисунок 4.16 – Положение зубцов при максимальном значении статической тяговой характеристики

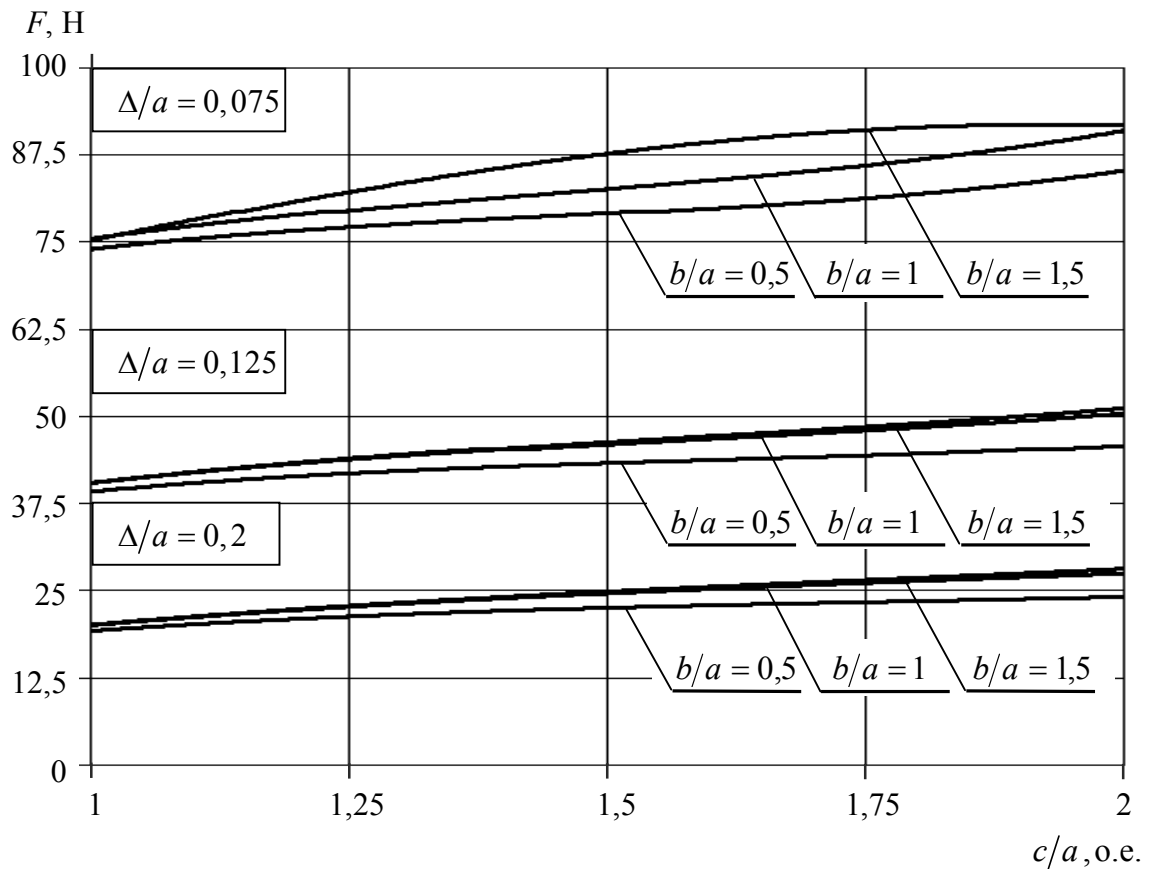


Рисунок 4.17 – Зависимость максимальных значений статического тягового усилия от значения соотношения размеров c/a

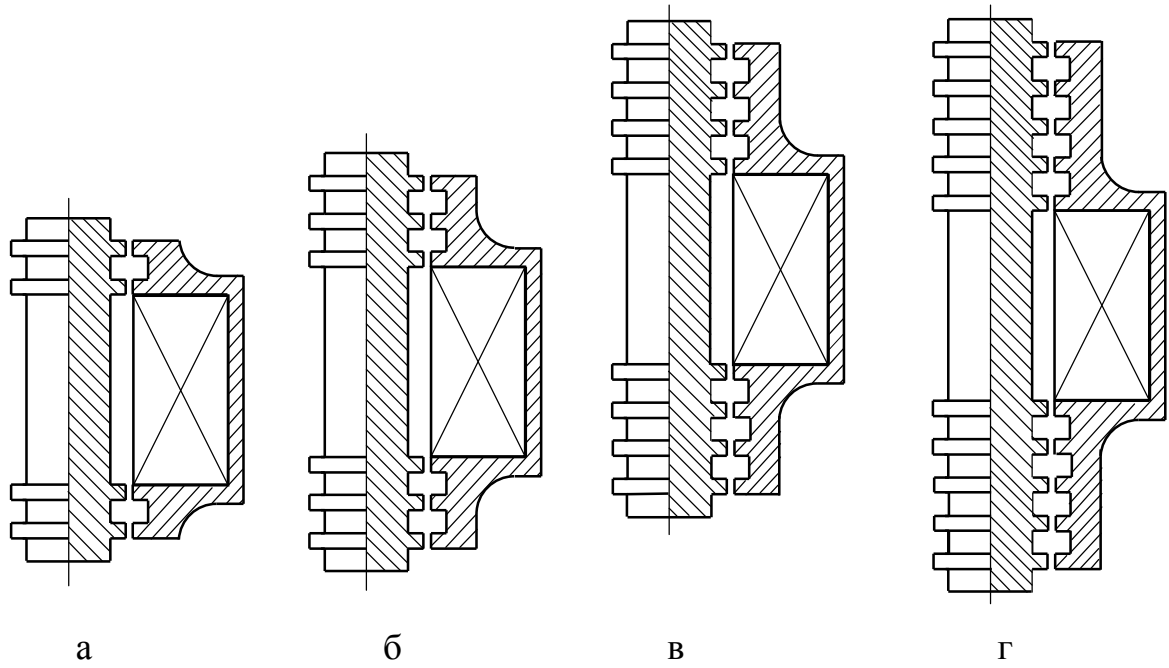


Рисунок 4.18 – Варианты конструктивных схем двигателей

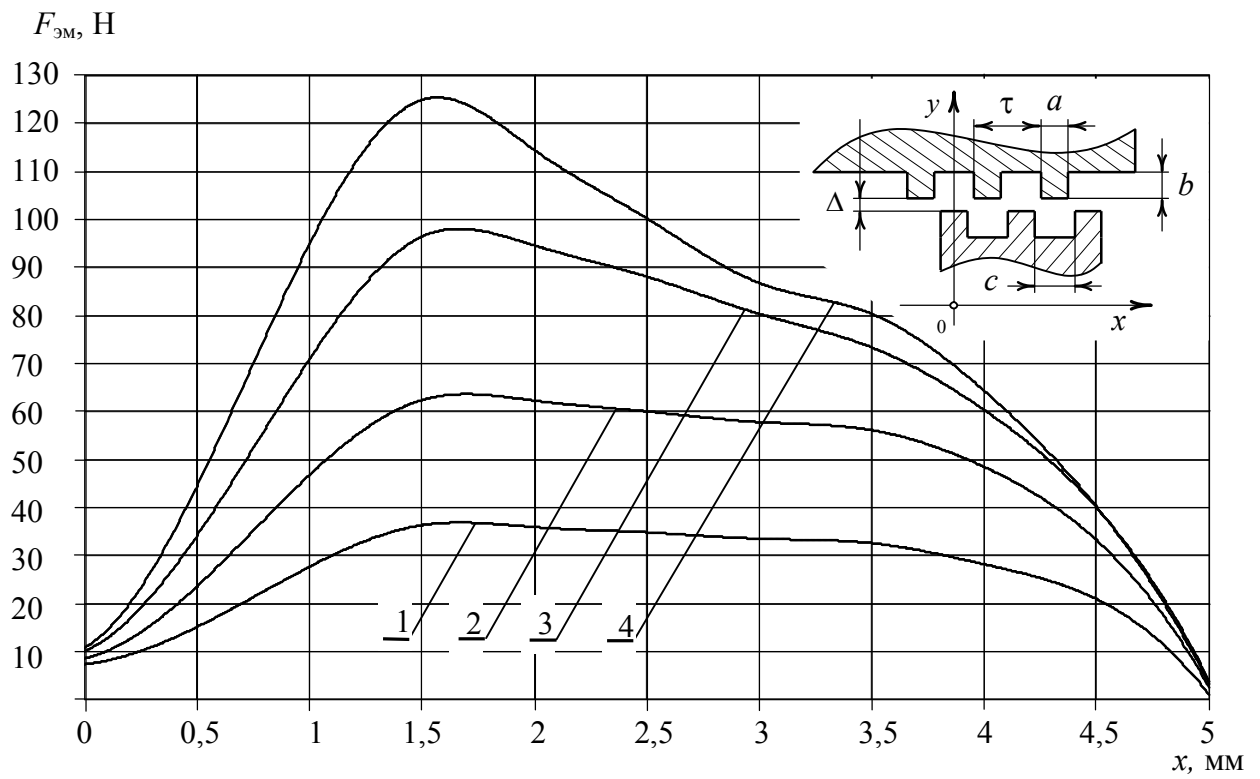


Рисунок 4.19 – Статические тяговые характеристики

Так как рассматриваемые варианты двигателей отличаются по массогабаритным показателям, то были определены значения тяговых усилий, приходящихся на единицу объема конструкции. Что позволило установить варианты ЛЭМД, обеспечивающие высокие значения статического тягового усилия при минимальных значениях объема двигателя. Результаты исследования, представлены на рисунке 4.20, при этом индексация кривых осуществлялась аналогично рисунку 4.19.

В рамках данного исследования было выполнено сравнение относительных максимальных значений статического тягового усилия представленных конструктивных схем (рисунок 4.21) и их относительной интегральной работы (рисунок 4.22). Под относительными максимальными значениями статического тягового усилия подразумевалось отношение максимального значения тягового усилия F_{\max} к F_{\max} конструктивной схемы, принимаемой за 100%.

Аналогичным образом определялось значение относительной интегральной работы $A_{и}$. При этом за 100 % принимались значения конструктивной схемы, изображенной на рисунке 4.18, г.

В результате проведенных исследований было установлено, что:

- с увеличением числа зубцов в зубцово-пазовой зоне с 2 до 5 повышение относительных максимальных значений статического тягового усилия происходит быстрее, чем относительных значений интегральной работы;
- конструктивный вариант двигателя рисунка 4.18, г превосходит вариант, изображенный на рисунке 4.18, а, по тяговому усилию в 2,23 раза, а вариант, представленный на рисунке 4.18, б – в 1,55 раза;
- вариант ЛЭМД, изображенный на рисунке 4.18, г превосходит по массе вариант, представленный на рисунке 4.18, а в 1,5 раза.
- наиболее выгодными с точки зрения получения максимальных значений статического тягового усилия являются варианты ЛЭМД, изображенные на рисунке 4.18, в-г. При этом наиболее высоких значений тягового усилия, приходящихся на единицу объема двигателя, можно добиться при выполнении ЛЭМД по вариантам, представленным на рисунке 4.18, б-в.

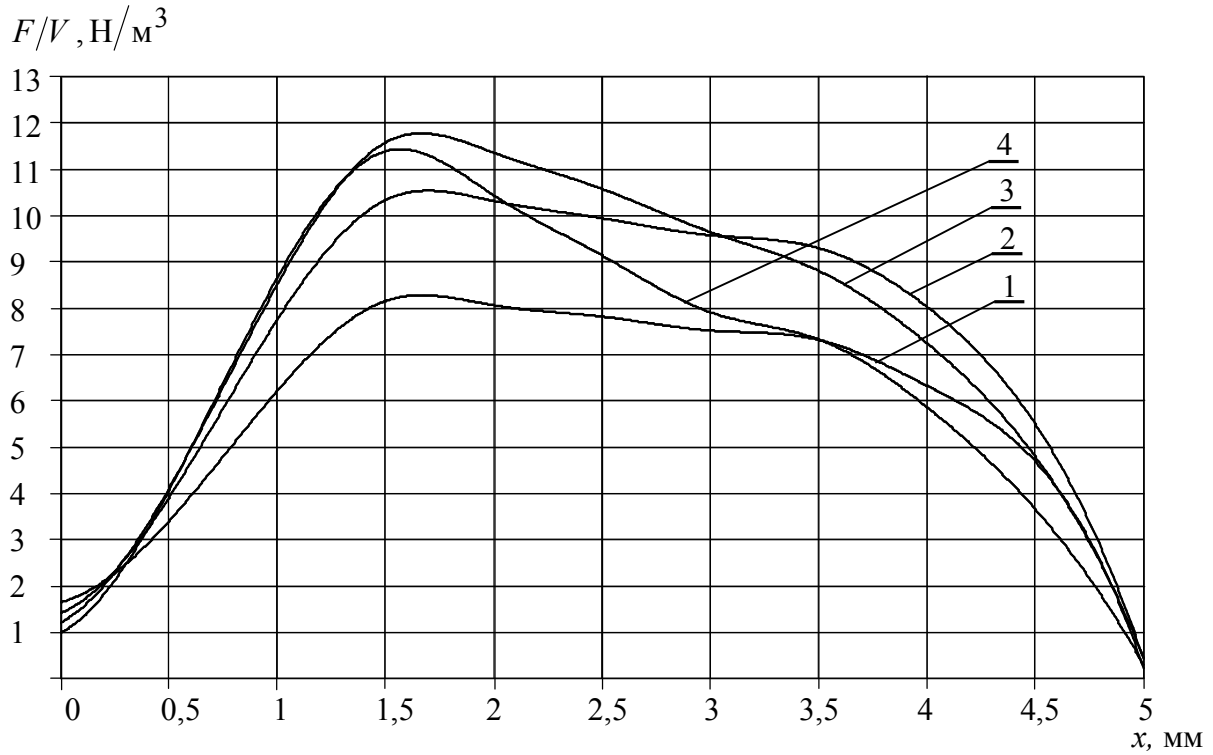


Рисунок 4.20 – Зависимость отношения F/V от смещения x зубцов

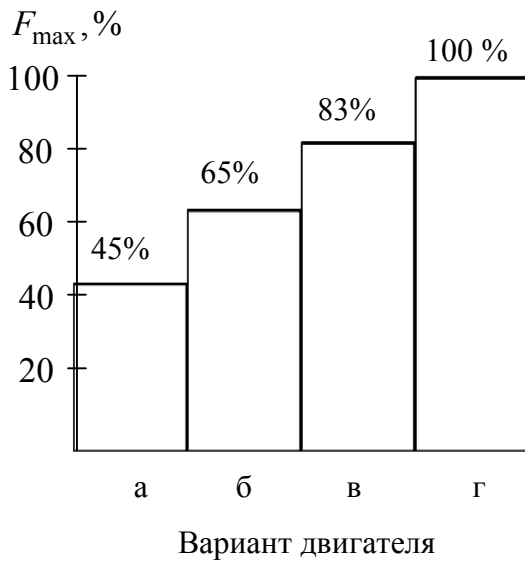


Рисунок 4.21 – Относительные значения максимального усилия

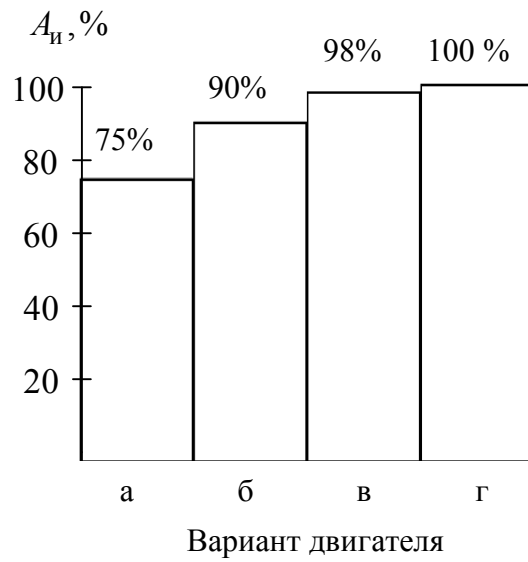


Рисунок 4.22 – Относительные значения показателя интегральной работы

В заключение следует отметить, что принятые рациональные число зубцов и значения геометрических соотношений зубцов-пазовой зоны ЛЭМД обеспечивают получение максимальных значений статического тягового усилия.

4.5 Разработка методики расчета и выбора рациональных геометрических соотношений ЛЭМД

Подход к решению вопроса о наиболее выгодных соотношениях между основными размерами ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной может быть различным в зависимости от основных требований, предъявляемых к двигателю. Однако в большинстве случаев основные размеры целесообразно выбирать таким образом, чтобы отношение механической работы, совершаемой электромагнитом, к объему магнитной системы было максимальным [132, 133, 141, 160].

В этой связи автором предлагается методика по расчету и выбору рациональных геометрических соотношений ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.

С точки зрения предварительной оценки разрабатываемого варианта электромагнитного двигателя задача выбора рациональной конструкции, при заданном значении тягового усилия, сводилась к отысканию геометрических размеров ЛЭМД, обеспечивающих минимальную массу двигателя.

В качестве критерия выбора был определен минимум массы двигателя, а в виде ограничения задавался критерий по максимуму тягового усилия.

Математическая постановка задачи исследования заключалась в нахождении значений переменных $Y_1, Y_2 \dots Y_n$, которые минимизируют массу электромагнитного двигателя $M_{\Sigma} = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$, при этом значения тягового усилия находились в заданном диапазоне $F_{\text{эmin}} \leq F_{\text{э}}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \leq F_{\text{эmax}}$. При выводе основных расчетных формул использовались уравнения, приведенные в работах [161, 162].

Переменные $Y_1, Y_2 \dots Y_n$ выражались через геометрические размеры двигателя (рисунок 4.23): h_1 – высоту немагнитной втулки в якоре, h_2 – высоту якоря с учетом высоты зубца b , h_3 – высоту полюсного наконечника статора, h_4 – высоту полюса статора, h_5 – высоту ярма статора, Δ – размер воздушного технологиче-

ского зазора, l_2 – длину полюсного наконечника статора, l_3 – длину обмоточного пространства, a – ширину зубца, c – размер межзубцового расстояния, n – число зубцов на полюсе якоря.

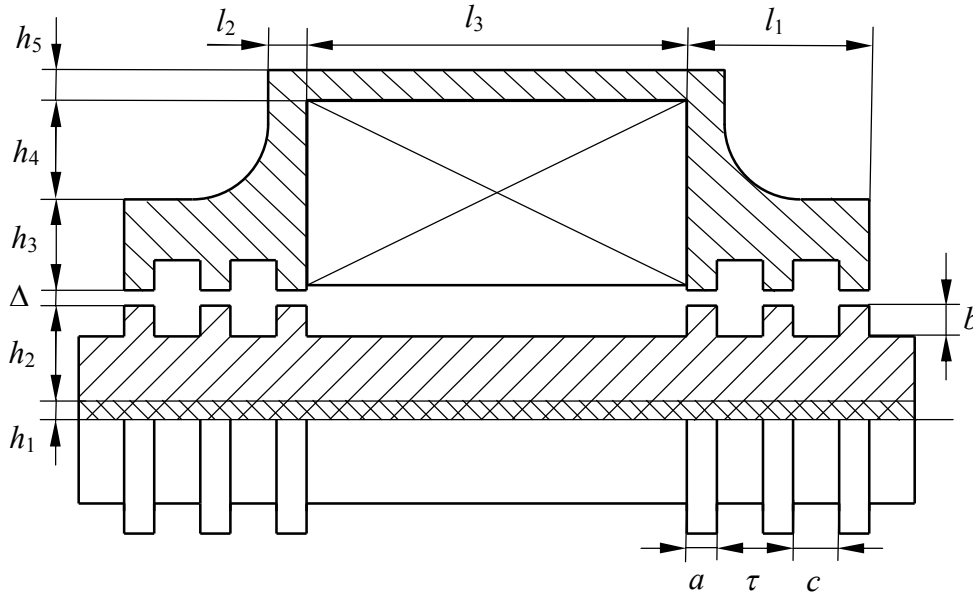


Рисунок 4.23 – Конструктивная схема электромагнитного двигателя

Значения h_1 , Δ , l_3 , b , c , a и n задавались исходя из конструктивных соображений. Длина полюсного наконечника статора l_1 определялась исходя из равенства сечений якоря ($S_{\text{я}} = \pi \left[(h_1 + h_2 - b)^2 - h_1^2 \right]$) и кольцевой поверхности зубцово-пазовой зоны полюса статора ($S_{\text{зпн}} = 2\pi an(h_1 + h_2)$), и выражалась следующим образом: $l_1 = na + (n - 1)c$.

Расчет геометрических соотношений ЛЭМД по предлагаемой методике осуществлялся следующим образом:

1. Задаются геометрические размеры h_1 , l_3 , a , c , b , Δ , n , и, из равенства сечений отдельных элементов конструкции магнитопровода [108], определяется усредненное значение высоты якоря:

$$h_2 = \bar{Y}_1 = \frac{-(2h_1 - 2b - an)}{2} + \sqrt{\left[\frac{(2h_1 - 2b - an)^2}{4} - (b^2 - 2h_1b - 2anh_1) \right]}. \quad (4.5)$$

2. Затем, исходя из конструктивных соображений, определяется усредненное значение высоты ярма статора h_4 :

$$h_4 = \bar{Y}_2 = \frac{Y_{2\max} + Y_{2\min}}{2} . \quad (4.6)$$

3. Далее, из условия равенства сечений якоря $S_{\text{я}}$, ярма $S_{\text{яс}}$ и полюсного наконечника статора $S_{\text{пн}}$ определяются значения переменных $h_5 = Y_3$, $l_2 = Y_4$ и $h_3 = Y_5$, выраженные через усредненные значения \bar{Y}_1 и \bar{Y}_2 :

$$h_5 = Y_3 = -(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + Y_2) + \sqrt{\left[(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2)^2 + (h_1 + Y_1)^2 - h_1^2 \right]} ; \quad (4.7)$$

$$l_2 = Y_4 = \frac{(h_1 + Y_1)^2 - h_1^2}{2(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5)} ; \quad (4.8)$$

$$h_3 = Y_5 = -(h_1 + h_2 + \Delta) + \sqrt{(h_1 + h_2 + \Delta)^2 + (h_2^2 + 2h_1h_2 + 2b\Delta)} . \quad (4.9)$$

4. После нахождения значений $Y_1 - Y_5$ производится расчет массы двигателя M_{Σ} через массы отдельных элементов конструкции: ярма статора $M_{\text{яс}}$, полюса статора $M_{\text{пс}}$, полюсного наконечника статора $M_{\text{пн}}$, якоря $M_{\text{я}}$, втулки $M_{\text{в}}$ и обмотки $M_{\text{об}}$:

$$M_{\Sigma} = M_{\text{яс}} + 2M_{\text{пс}} + 2M_{\text{пн}} + M_{\text{я}} + M_{\text{в}} + M_{\text{об}} , \quad (4.10)$$

масса элементов конструкции определялась следующим образом:

$$M_{\text{яс}} = \gamma_{\text{с}}\pi(l_3 + 2l_2) \left[(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + Y_2 + Y_3)^2 - (h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + Y_2)^2 \right] ; \quad (4.11)$$

$$M_{\text{пс}} = \gamma_{\text{с}}\pi l_2 \left[(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + Y_2)^2 - (h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5)^2 \right] ; \quad (4.12)$$

$$M_{\text{пн}} = \gamma_{\text{с}}\pi \left[l_1 \left[(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5)^2 - (h_1 + Y_1 + \Delta + b)^2 \right] + an \left[(h_1 + Y_1 + \Delta + b)^2 - (h_1 + Y_1 + \Delta)^2 \right] \right] ; \quad (4.13)$$

$$M_{\text{я}} = \gamma_{\text{с}}\pi \left[(l_3 + 2l_1 + 2(\tau - a)) \left[(h_1 + Y_1 - b)^2 - h_1^2 \right] + 2an \left[(h_1 + Y_1)^2 - (h_1 + Y_1 - b)^2 \right] \right] ; \quad (4.14)$$

$$M_{\text{вн}} = \gamma_{\text{л}} \pi h_1^2 (l_3 + 2l_1 + 2(\tau - a)); \quad (4.15)$$

$$M_{\text{об}} = \gamma_{\text{м}} \pi l_3 \left[(h_1 + Y_1 + \Delta + Y_5 + Y_2)^2 - (h_1 + Y_1 + \Delta + a)^2 \right]. \quad (4.16)$$

Затем, переменная Y_2 выражается через M_{Σ} , путем ряда преобразований формул (4.11)-(4.16) с сохранением переменных Y_1 и Y_2 :

$$\begin{aligned} q_1 &= \gamma_{\text{с}} \pi (l_3 + 2l_2); \quad q_2 = h_1 + \Delta + Y_5 + Y_3; \quad q_3 = h_1 + \Delta + Y_5; \quad q_4 = \gamma_{\text{с}} \pi Y_4; \\ q_5 &= \gamma_{\text{с}} \pi l_1; \quad q_6 = h_1 + \Delta + b; \quad q_7 = h_1 + \Delta; \quad q_8 = \gamma_{\text{с}} \pi a n; \\ q_9 &= \gamma_{\text{с}} \pi [l_3 + 2l_1 + 2(\tau - a)]; \quad q_{10} = h_1 - b; \quad q_{11} = \gamma_{\text{л}} \pi [l_3 + 2l_1 + 2(\tau - a)]; \\ q_{12} &= \gamma_{\text{м}} \pi l_3; \quad q_{13} = h_1 + \Delta + a, \end{aligned}$$

тогда, с учетом предлагаемых преобразований, формула (4.10) примет вид:

$$\begin{aligned} M_{\Sigma} &= q_1 (q_2^2 - q_3^2) + 2Y_1 (q_2 q_1 - q_3 q_1) + 2Y_1 (q_2 q_1 - q_3 q_1) + 4q_3 q_4 Y_2 + \\ &+ 4q_4 Y_1 Y_2 + 2q_4 Y_2^2 + 2q_5 (q_3^2 - q_6^2) + 2q_8 (q_6^2 - q_7^2) + \\ &+ 4Y_1 (q_5 q_3 - q_5 q_6 + q_8 q_6 - q_7 q_8) + (q_{10}^2 - h_1^2) (q_9 - 2q_8) + \\ &+ 2Y_1 (q_9 q_{10} + 2q_8 h_1 - 2q_8 q_{10}) + q_9 Y_1^2 + q_{11} h_1^2 + q_{12} q_3^2 + \\ &+ 2q_{12} Y_1 (q_3 - q_{13}) + 2q_{12} q_3 Y_2 + 2q_{12} Y_1 Y_2 + 2q_{12} Y_2^2, \end{aligned} \quad (4.17)$$

а после повторного преобразования слагаемых формулы (3.13) на ряд единичных переменных, с сохранением варьируемых величин Y_1 и Y_2 :

$$\begin{aligned} d_1 &= 2q_4 + q_{12}; \quad d_2 = 2q_2 q_1 - 2q_3 q_1 + 4q_3 q_4 + 2q_{12} q_3; \\ d_3 &= 2q_3 + 2q_{12}; \quad d_4 = q_9; \\ d_5 &= 2q_2 q_1 - 2q_3 q_1 + 4(q_5 q_3 + q_5 q_6 + q_8 q_6 - q_7 q_8) + 2(q_9 q_{10} + 2q_8 h_1 - \\ &- 2q_8 q_{10}) + 2q_{12} (q_3 - q_{13}); \\ d_6 &= q_1 (q_2^2 - q_3^2) + 2q_5 (q_3^2 - q_6^2) + 2q_8 (q_6^2 - q_7^2) + (q_{10}^2 - h_1^2) \times \\ &\times (q_9 - 2q_8) + q_{11} h_1^2 + q_{12} q_3^2; \end{aligned}$$

при подстановке в формулу (3.6) полученных выражений получаем квадратное уравнение:

$$d_1 Y_2^2 + (d_2 + d_3 Y_1) Y_2 + d_4 Y_1^2 + d_5 Y_1 + d_6 - M_\Sigma = 0. \quad (4.18)$$

Решение уравнения относительно переменной Y_2 дает один отрицательный и один положительный корень вида:

$$Y_2 = \frac{-(d_2 + d_3 Y_1) + \sqrt{(d_2 + d_3 Y_1)^2 - 4d_1(d_4 Y_1^2 + d_5 Y_1 + d_6 - M_\Sigma)}}{2d_1}. \quad (4.19)$$

5. После нахождения действительного корня квадратного уравнения производится расчет переменной Y_2 в диапазоне значений $5\text{мм} \leq Y_1 \leq 40\text{мм}$. При этом, при расчете по формуле (3.21), приближенные значения массы двигателя M_Σ рассчитываются следующим образом:

$$M_1 = \gamma_c \pi (h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2 + Y_3)^2 (l_3 + 2l_1); \quad (4.20)$$

$$M_2 = \gamma_c \pi \left[(h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + h_3 + \bar{Y}_2 + Y_3)^2 - \left((h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta)^2 - (h_1 + \bar{Y}_1)^2 \right) \right] (l_3 + 2l_1); \quad (4.21)$$

$$M_3 = \gamma_c \pi \left[(h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2 + Y_3)^2 (l_3 + 2l_1) - \left((h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + a)^2 - (h_1 + \bar{Y}_1 - a)^2 \right) (l_3 + 2(n-1)(\tau - a)) \right]; \quad (4.22)$$

$$M_4 = \gamma_c \pi \left[(h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2 + Y_3)^2 (l_3 + 2l_1) - \left((h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + a)^2 - (h_1 + \bar{Y}_1 - a)^2 \right) (l_3 + 2(n-1)(\tau - a)) - \left((h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2)^2 - (h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5)^2 \right) 2(l_1 - l_2) \right]; \quad (4.23)$$

$$M_5 = \gamma_c \pi \left[(h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2 + Y_3)^2 (l_3 + 2l_1) - \left((h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + a)^2 - (h_1 + \bar{Y}_1 - a)^2 \right) (l_3 + 2(n-1)(\tau - a)) - \left((h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5 + \bar{Y}_2)^2 - (h_1 + \bar{Y}_1 + \Delta + Y_5)^2 \right) 2(l_1 - l_2) + (h_1 + \bar{Y}_1)^2 2(\tau - a) \right]. \quad (4.24)$$

Графическое пояснение к формулам (4.20)-(4.24) отображено на рисунке 4.24, где рисунку 4.24, а соответствует первое приближение массы (формула (4.20)), рисунку 4.24, б – второе приближение (формула (4.21)), и т. д.

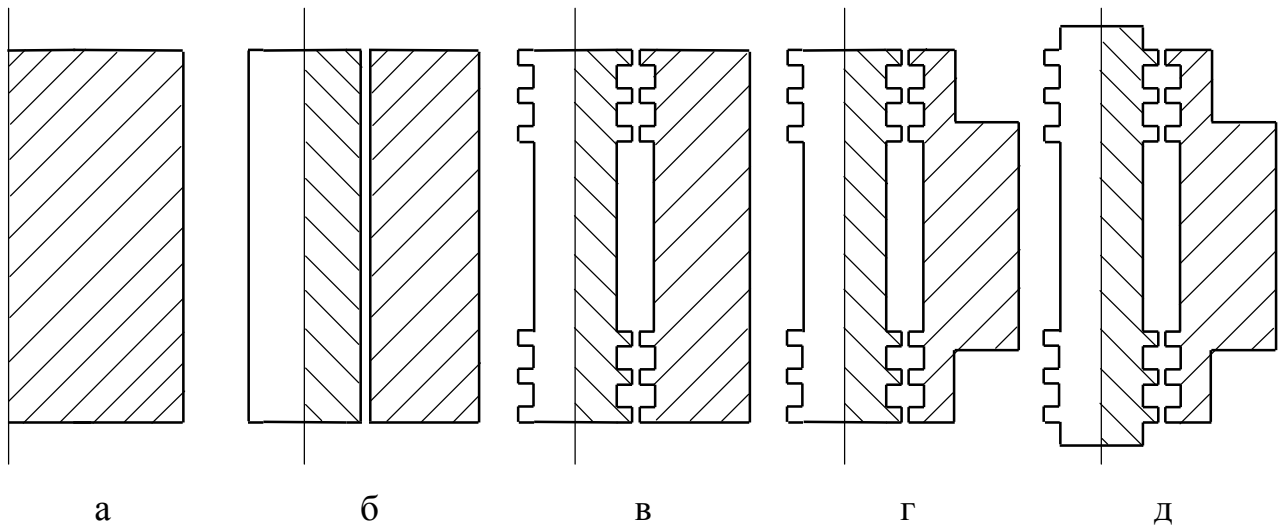


Рисунок 4.24 – К расчету массы электромагнитного двигателя

7. После определения расчетных значений Y_2 в диапазоне $5\text{ мм} \leq Y_1 \leq 40\text{ мм}$ с учетом ряда приближений массы двигателя производится расчет ограничивающей функции: определение значений Y_2 в диапазоне $5\text{ мм} \leq Y_1 \leq 40\text{ мм}$ с учетом максимального значения тягового усилия F_3 , развиваемого двигателем и определяемого следующим образом:

$$F_3 = \frac{(Iw)^2}{2} \frac{d\Lambda}{dx}, \quad (4.25)$$

учитывая, что $Iw = jk_{3.ок} S_{ок} = jk_{3.ок} (l_3 Y_2)$, то переменную Y_2 можно выразить через усилие F_3 следующим образом:

$$Y_2 = \sqrt{\frac{2F_3}{(jk_{3.ок} l_3)^2 \frac{n}{2} \frac{d\Lambda}{dx}}}. \quad (4.26)$$

В данном случае производная магнитной проводимости $d\Lambda/dx$ для одной пары зубцов определялась следующим образом по методике, предложенной в параграфе 3.4:

$$\frac{d\Delta}{dx} = \mu_0 l \left\{ \frac{3}{4\Delta} + \frac{2 \ln(0,8c/\Delta) \left[\frac{5x}{8c\sqrt{\Delta^2 + x^2/4}} - \frac{x \left(c\Delta + \frac{5x^2}{16} \right)}{4c \left(\Delta^2 + x^2/4 \right)^{3/2}} \right]}{\left[\arccos \left(\frac{5x^2 + c\Delta}{c\sqrt{\Delta^2 + x^2/4}} \right) - \pi \right]^2 \sqrt{1 - \frac{(5x^2 + c\Delta)^2}{c^2 + (\Delta^2 + x^2/4)}}} \right\}, \quad (4.27)$$

где l – длина зубцов, x – смещение зубцов якоря относительно зубцов статора.

7. На основании значений, полученных по формулам (4.19) и (4.26) строятся графики зависимостей $Y_2 = f(F_3, Y_1)$ и $Y_2 = f(M_\Sigma, Y_1)$, координаты точек пересечения либо касания которых определяют рациональные значения переменных Y_1 и Y_2 при заданных значениях усилия и массы электромагнитного двигателя.

8. Затем, по найденным значениям переменных Y_1 и Y_2 , уточняются значения Y_3 , Y_4 и Y_5 по формулам (4.7)-(4.9).

По предлагаемой методике был произведен расчет ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной и числом зубцов на одном полюсе якоря $n_1 = 2$, $n_2 = 3$, $n_3 = 4$ при соответствующих максимальных значениях тягового усилия $F_1 = 45$ Н, $F_2 = 75$ Н и $F_3 = 105$ Н [163, 164].

Расчет был выполнен для ЛЭМД со следующими исходными данными (рисунки 4.23): $h_1 = 6 \times 10^{-3}$ м, $\Delta = 0,5 \times 10^{-3}$ м, $a = b = 4 \times 10^{-3}$ м, $\tau = 10 \times 10^{-3}$ м, $n = 2 \div 4$, $x = 1,5 \times 10^{-3}$ м, $l_3 = 40 \times 10^{-3}$ м, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м, $j = 5 \times 10^6$ А/м², $k_{3.ок} = 0,5$.

Приближенные значения масс электромагнитных двигателей, использованные при построении графиков $Y_2 = f(M_\Sigma, Y_1)$, представлены в таблице 4.1.

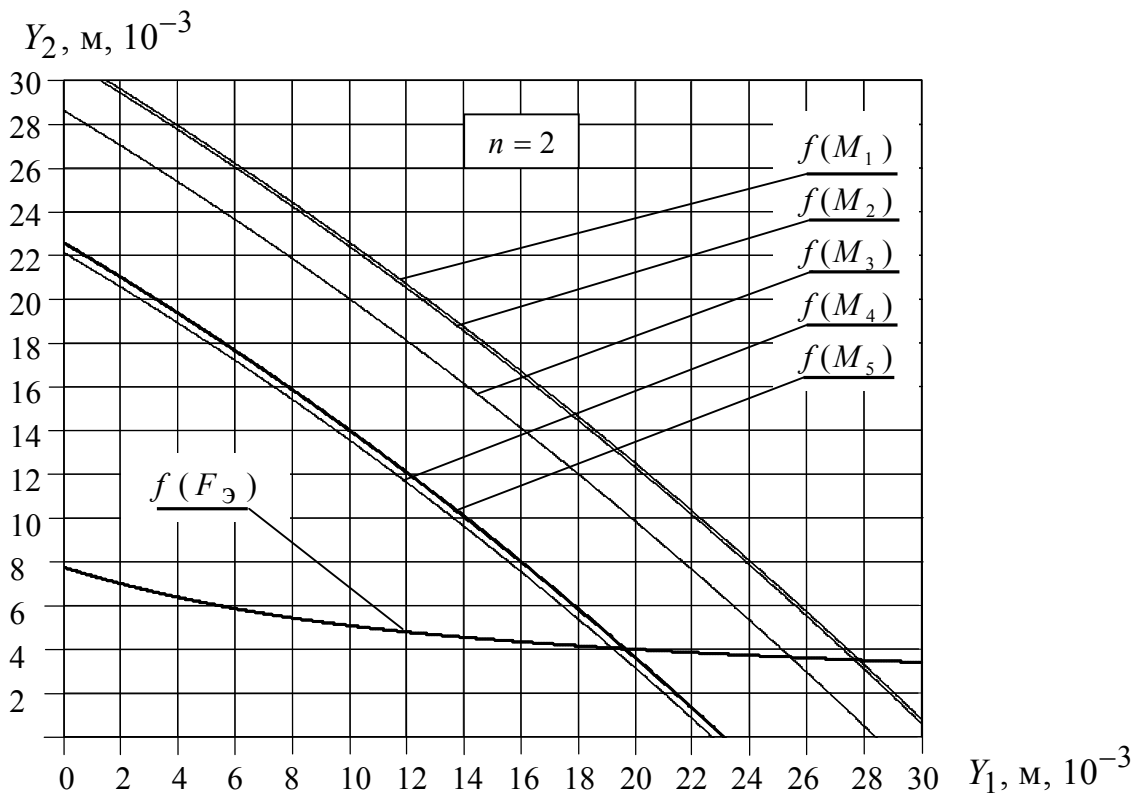
Таблица 4.1 – Приближенные значения масс электромагнитных двигателей

Число зубцов n	Масса, кг				
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
2	3,006	2,981	2,662	1,892	1,942
3	5,066	5,025	4,543	2,972	3,053
4	7,964	7,904	7,221	4,626	4,748

Результаты расчетов при различных значениях n представлены в виде кривых на рисунке 4.25 и рисунке 4.26.

Проверка точности выведенных формул и полученных по ним расчетных значений осуществлялась следующим образом:

1. На основании предварительных расчетных значений Y_1 - Y_5 , полученных по формулам (4.7)-(4.9), в осесимметричной постановке задачи строятся конечно-элементные модели ЛЭМД и определяются их максимальные значения статического тягового усилия F_{max} .

Рисунок 4.25 – Графики зависимости Y_2 от Y_1

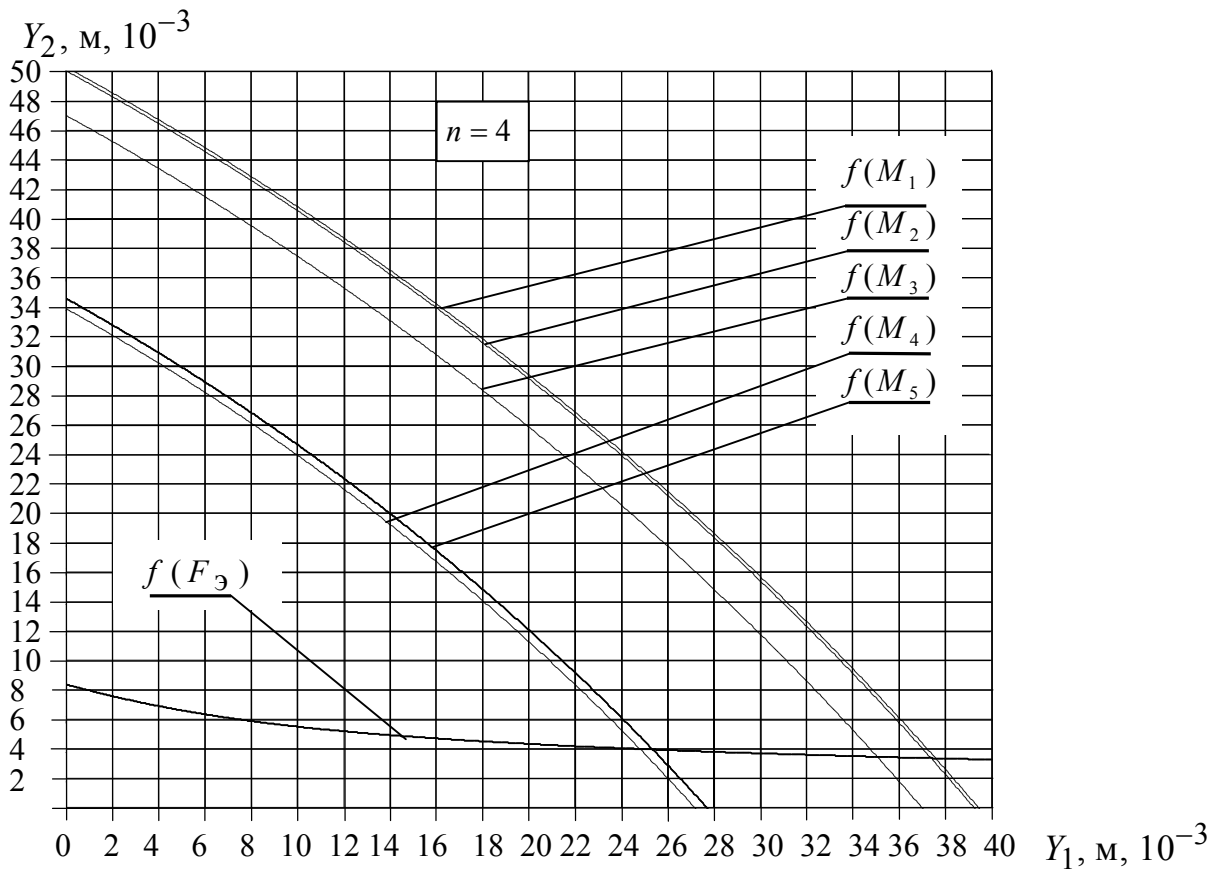
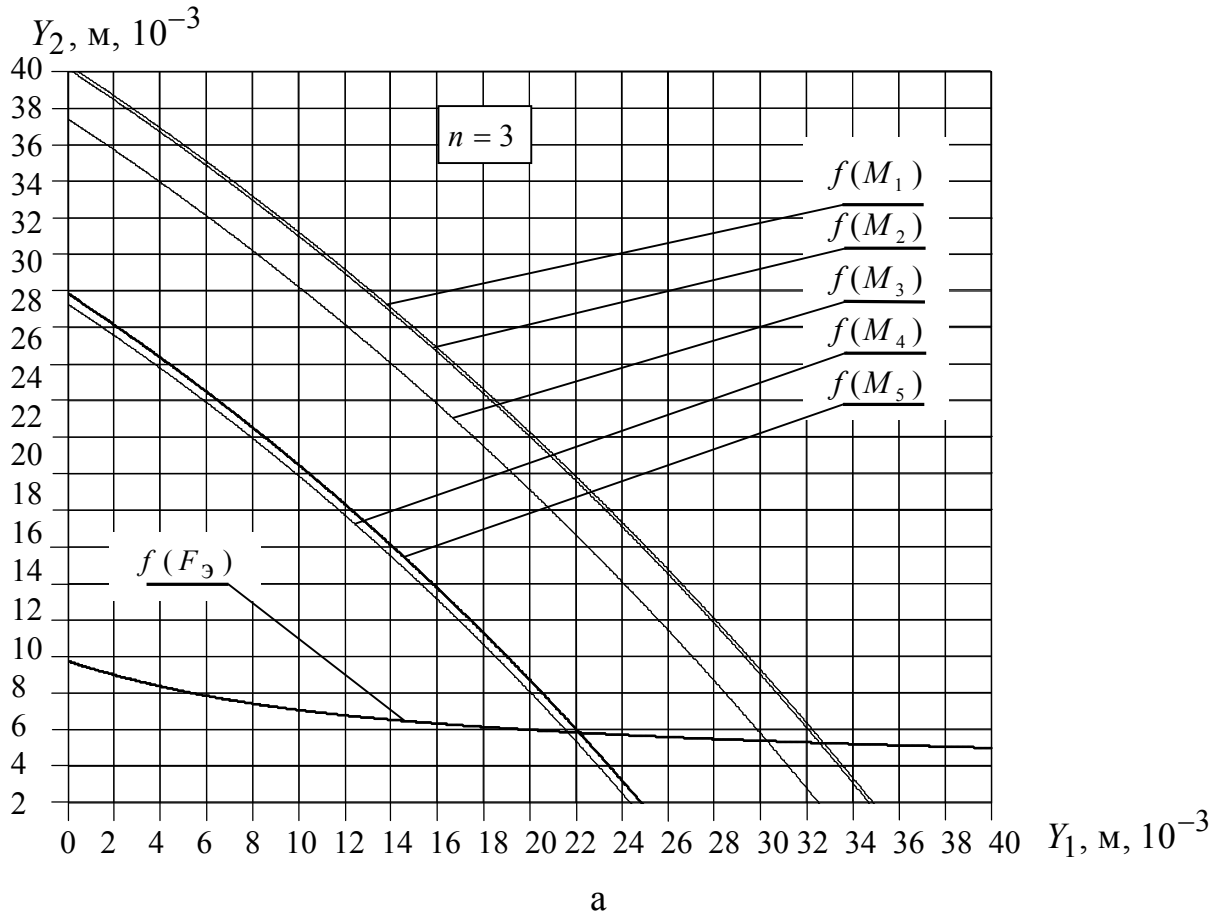


Рисунок 4.26 – Графики зависимости Y_2 от Y_1

В ходе численного эксперимента индукция на участках магнитопровода, подверженных наибольшему насыщению, не превышала 0,9 Тл.

2. Затем по поверочной формуле определяется значение Y_2 :

$$Y_2 = \sqrt{\frac{F_{\text{эmax}}(Iw)^2}{(jk_{3.ок}l_3)^2 \frac{n}{2} F_{\text{э}}}} \quad (4.28)$$

где $F_{\text{э}}$ – тяговое усилие, полученное расчетным путем, $F_{\text{эmax}}$ – тяговое усилие, полученное в ходе численного эксперимента.

Формула (4.28) получена путем выражения $d\Lambda/dx$ из формулы (4.25) и ее подстановки в (4.27).

Было установлено, что разница в значениях Y_2 , представленных в виде кривых на рисунках 4.25-4.26, и значениях Y_2 , полученных по формуле (4.28) не превышает 15% для числа зубцов $n = 2$, 11% и 2% – соответственно для $n = 3$ и $n = 4$, что подтверждает правильность выведенных формул [164].

Результаты расчета рациональных значений переменных $Y_1 - Y_5$ по предлагаемой методике были сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Значения геометрических размеров двигателя при M_5

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

С учетом полученных расчетных значений переменных $Y_1 - Y_5$ были выполнены эскизы конструктивных схем ЛЭМД (рисунок 4.27).

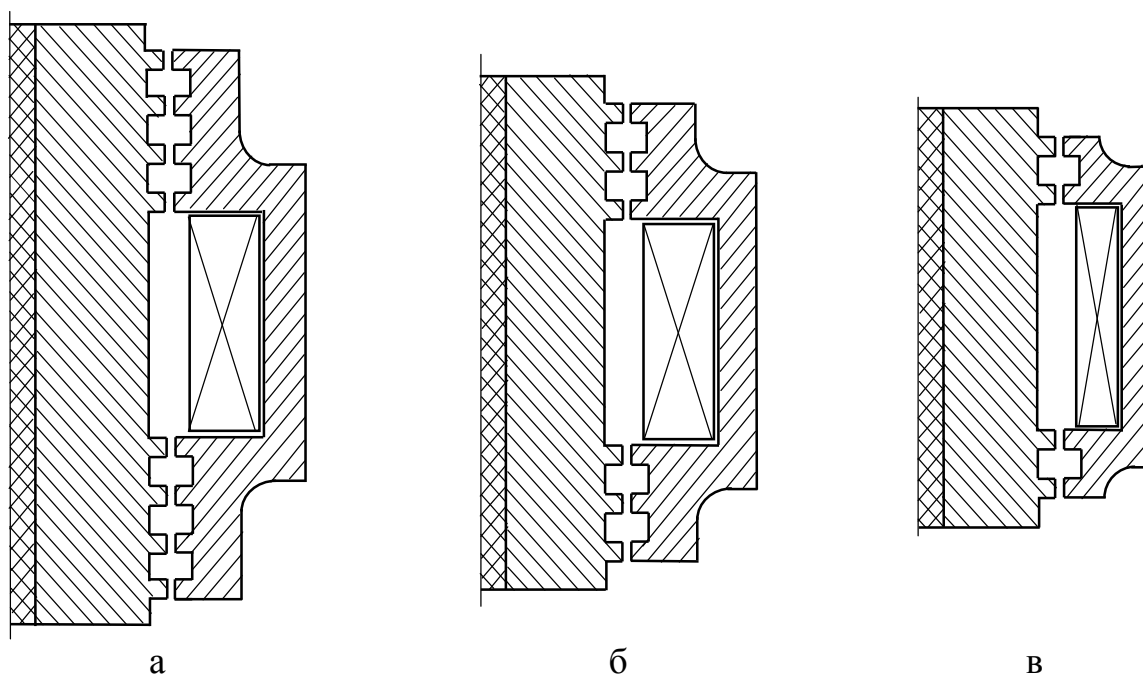


Рисунок 4.27 – Эскизы электромагнитных двигателей

В заключении следует отметить, что использование предлагаемой методики при расчете и выборе рациональных геометрических соотношений конструкции ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной позволяет получать максимальные значения статического тягового усилия при минимальной массе магнитной системы с максимальной относительной погрешностью не превышающей 15 % [163, 164].

4.6 Результаты анализа и выбора конструкций ЛЭМД с минимальной массой по критерию максимального значения интегральной работы

В параграфе 4.5, были определены рациональные геометрические соотношения ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, обеспечивающие получение максимальных значений тягового усилия в минимальном объеме электромагнитного двигателя, однако при этом объем, занимаемый катушкой, принимался неизменным. При проектировании ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной необходимо учитывать намагничивающую силу катушки и занимаемый ею объем, так как от этого напрямую будет зависеть значение рабочего магнитного потока [93, 165-167].

Выбор рациональных соотношений размеров обмоточного пространства, позволит, при сравнительной оценки различных вариантов двигателей, определить наиболее выгодные конструкции в отношении расхода активных материалов в заданном диапазоне значений тяговых усилий. Исследование проводилось для следующих соотношении геометрических размеров обмоточного пространства: отношение внутреннего диаметра d_1 обмоточного пространства к внешнему d_2 ($X = d_1/d_2$), отношение длины обмоточного пространства l_3 к его внешнему d_2 и внутреннему диаметру d_1 ($Y = l_3/d_2$ и $Z = l_3/d_1 = \text{const}$).

Поиск и выбор рациональных геометрических соотношений обмоточного пространства осуществлялся согласно критерию оценки, обеспечивающему получение максимального значения интегральной работы $A_{\text{И}}$ при минимальном значении объема $V_{\text{ДВ}}$ и массы двигателя $M_{\text{ДВ}}$ и определяемому по формуле (4.3).

Масса двигателя определялась следующим образом:

$$M_{\text{ДВ}} = k_3 V_{\text{М}} g_{\text{М}} + V_{\text{СТ}} g_{\text{СТ}} \quad (4.29)$$

где $V_{\text{М}}$, $V_{\text{СТ}}$ – объем меди и стали ЛЭМД; $g_{\text{М}}$, $g_{\text{СТ}}$ – удельный вес меди и стали; k_3 – коэффициент заполнения обмоточного пространства.

При изменении геометрических параметров Y и Z значения намагничивающей силы катушки определялись исходя из допустимого перегрева при периодическом повторно-кратковременном режиме работы, по следующей формуле:

$$I_w = \sqrt{\frac{100}{\text{ПВ}}} \cdot \sqrt{\frac{2k_{\text{T}} \tau S_{\text{ОКН}} k_3 l_{\text{К}}}{\rho}} \quad (4.30)$$

где ПВ – продолжительность включения двигателя, k_{T} – коэффициент теплоотдачи; τ – температура перегрева обмотки; $S_{\text{ОКН}}$ – сечение окна обмоточного пространства; l_3 – длина обмоточного пространства; ρ – удельное сопротивление материала обмотки.

Удельное сопротивление ρ материала провода определялось по допустимой средней температуре нагрева обмотки:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 \tau_{\text{доп}}) \quad (4.31)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление при $\tau_{\text{доп}} = \tau + t_{\text{окр}} \text{ } ^\circ\text{C}$, α_0 - температурный коэффициент материала проводника, $\tau_{\text{доп}} = \tau + t_{\text{окр}}$ - допустимая температура нагрева. Так для проводника из меди $\alpha_0 = 0,00425 \text{ 1/град}$ и $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

В ходе исследования производилась корректировка намагничивающей силы катушки, вызванная изменением сечения площади окна обмоточного пространства. Площадь поверхности охлаждения при этом оставалась неизменной [168-170].

В качестве базовой конструкции для исследования был выбран вариант ЛЭМД рисунка 4.27, б, геометрические размеры которого представлены в таблице 4.2 (параграф 4.5).

Расчет и исследование осуществлялись при следующих значениях параметров двигателя: $\text{ПВ} = 60 \%$, $k_3 = 0,6$, $g_M = 8600 \text{ кг/м}^3$, $g_{\text{ст}} = 7800 \text{ кг/м}^3$, $l_3 = 40 \text{ мм}$, $\tau = 70^\circ\text{C}$, $t_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$, $k_T = 15 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

Для оценки влияния значения рабочего хода якоря на получаемые максимальные значения статического тягового усилия двигателя конечно-элементное моделирование осуществлялось для ЛЭМД с числом зубцов на полюсе статора $n = 2 \div 4$ [171, 172]. При этом выполнялось условие $an = \text{const}$ и $c/a = 1,5$ (рисунок 4.28).

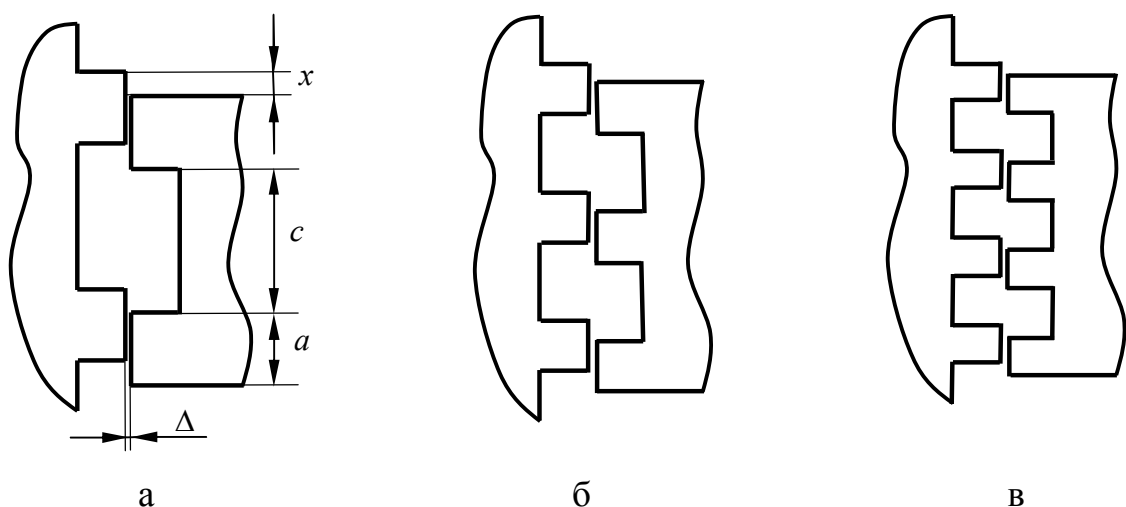


Рисунок 4.28 – Элементы зубцово-пазовой зоны ЛЭМД

Благодаря этому площадь сечения зубцово-пазовой зоны и массогабаритные параметры двигателя при изменении значения n сохранялись постоянными.

Полученные расчетные значения для дальнейшего численного моделирования магнитного поля конечно-элементных моделей ЛЭМД были сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры для моделирования

x	d_1/d_2	0,750	0,711	0,675	0,640	0,600	0,574	0,563	0,540	0,519	0,500
V_m	10^{-4} м^3	3,229	3,355	3,463	3,871	3,777	3,902	3,965	4,090	4,236	4,360
$V_{ст}$	10^{-4} м^3	0,7125	0,899	1,095	1,322	1,629	1,860	1,979	2,226	2,482	4,360
I_w	А	641	708	770	833	906	955	979	1024	1068	1110

Численный эксперимент осуществлялся в осесимметричной постановке задачи при фиксированном значении $Z = l_3/d_1 = 0,675$ и изменении соотношения $X = d_1/d_2$ при $d_2 = 36 \div 54$ мм (рисунок 4.29). Значение индукции в стали находилось в пределах $B_{ст} = 1,2 \div 1,95$ Тл.

В ходе численного эксперимента были определены максимальные значения статического тягового усилия для каждой из магнитных систем в диапазоне соотношений $X = d_1/d_2 = 0,5 \div 0,75$ (рисунок 4.30).

Установлено, что увеличение числа зубцов n приводит к повышению максимальных значений статического тягового усилия при сохранении постоянными площади сечения зубцово-пазовой зоны двигателя и значения индукции в стали.

По результатам исследования были построены графики зависимости $M_{дв}/A_{и}$ от соотношения d_1/d_2 для различных значений n (рисунок 4.31-4.32). Исходя из данных графиков были определены рациональные ряды соотношений $X = d_1/d_2$, обеспечивающие наименьшие значения соотношения $M_{дв}/A_{и}$ для каждой из магнитных систем.

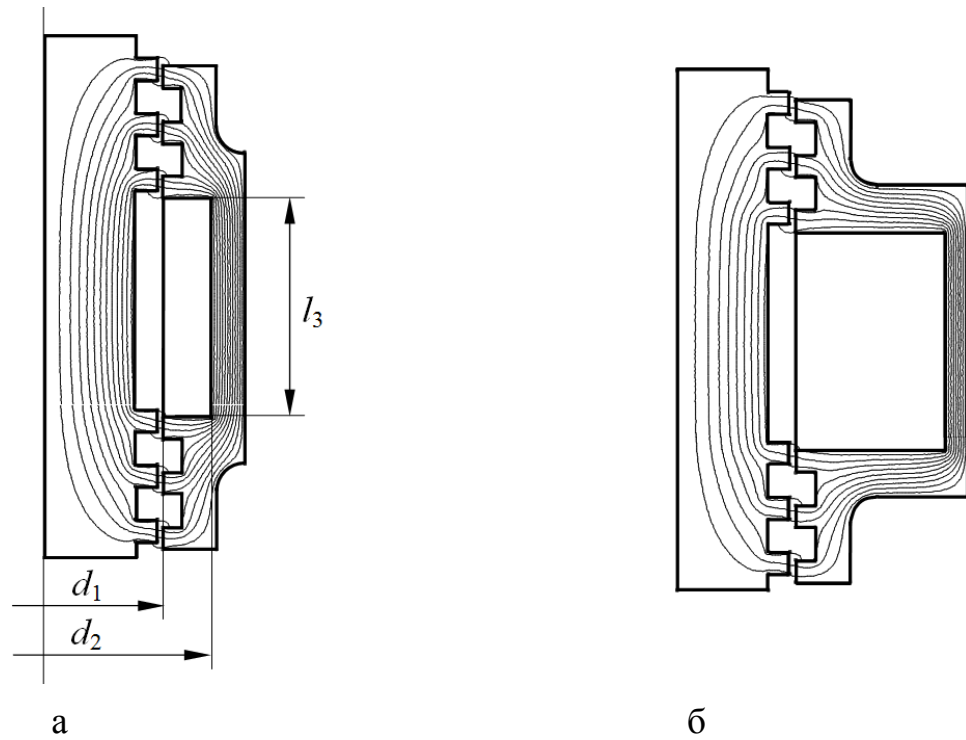


Рисунок 4.29 – Геометрическая структура вариантов конструктивных схем

ЛЭМД и линий магнитной индукции: а) при $\frac{d_1}{d_2} = 0,75$, б) при $\frac{d_1}{d_2} = 0,5$

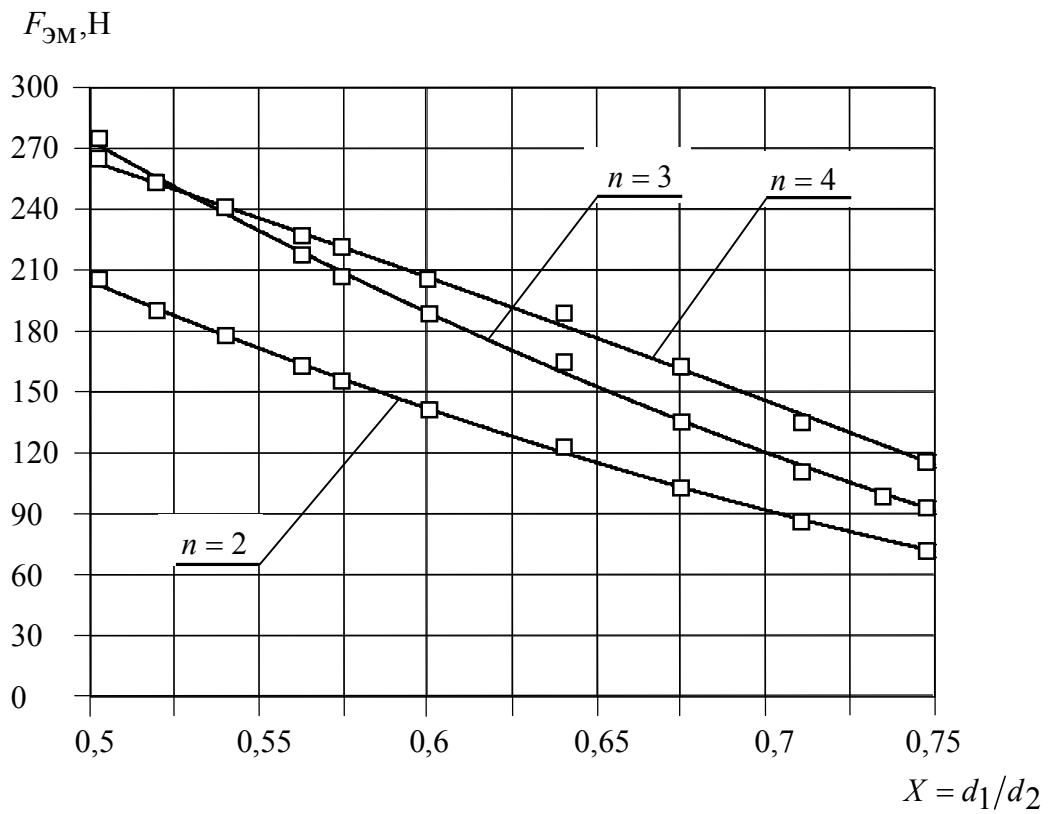


Рисунок 4.30 – Значения тягового усилия в зависимости от числа зубцов n

Затем, для граничных значений выявленных рациональных диапазонов переменной $X = d_1/d_2$ определялся рациональный ряд значений переменной Y при изменении ее в диапазоне $Y = l_3/d_2 = 0,4 \div 1,2$.

Расчетные значения для дальнейшего моделирования магнитного поля конечно-элементных моделей ЛЭМД при $n = 2 \div 4$ были сведены в таблицы 4.4-4.6.

Вносимая корректировка намагничивающей силы в данном случае была вызвана изменением сечения площади окна обмоточного пространства и поверхности охлаждения обмотки, а средняя длина витка обмотки сохранялась постоянной, изменялось только сечение обмоточного провода [170-174].

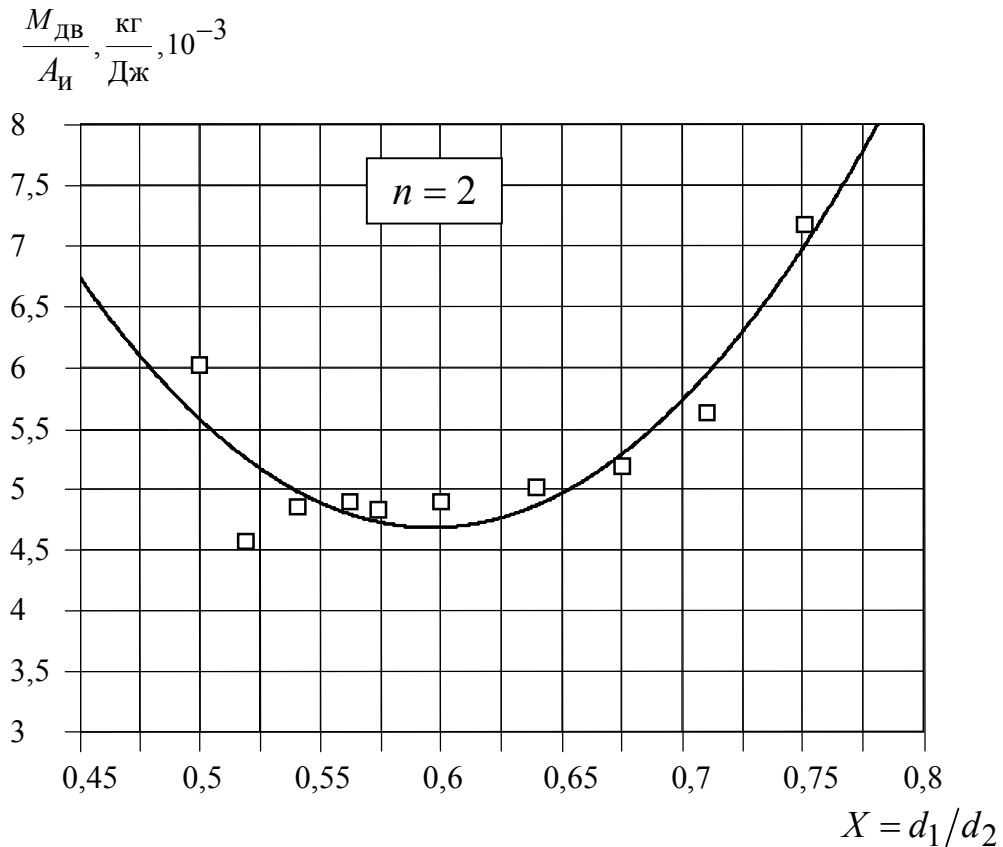
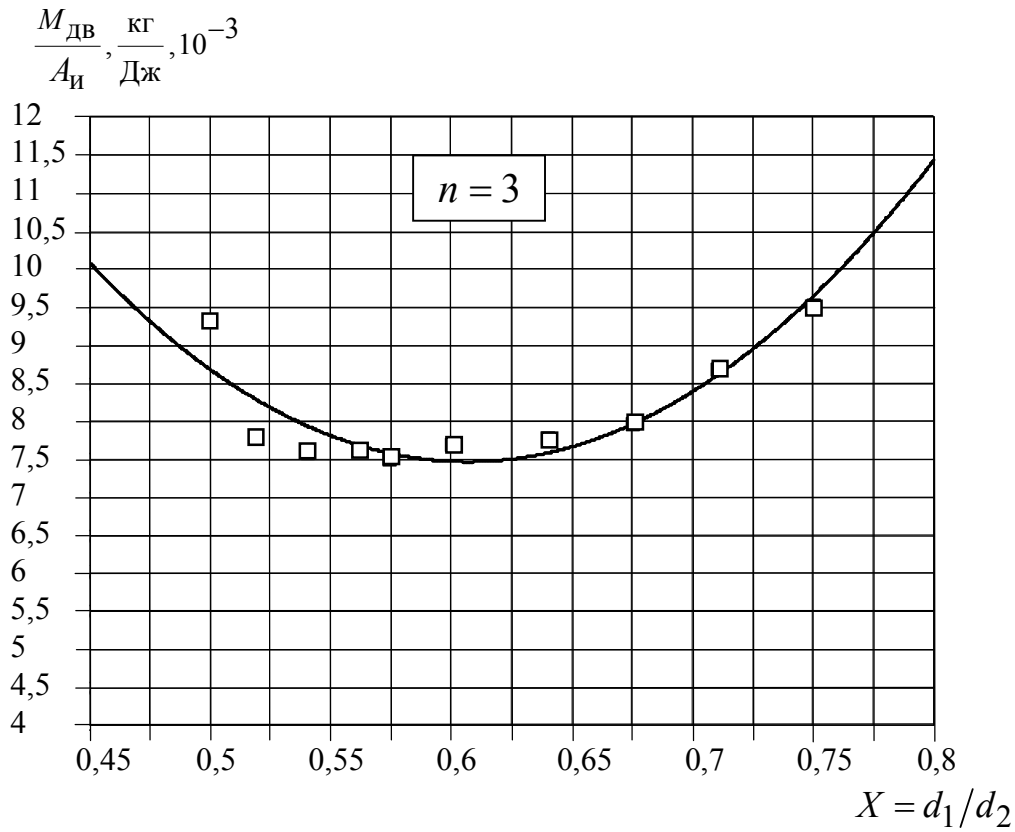
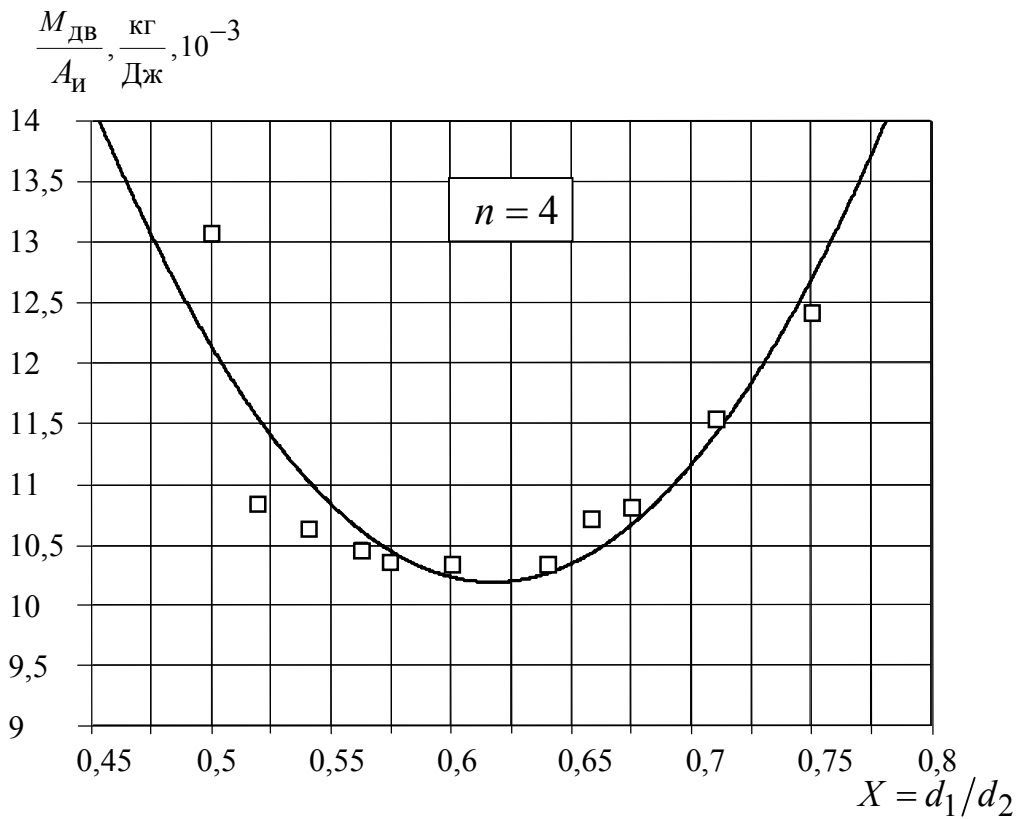


Рисунок 4.31– Зависимость $M_{ДВ}/A_{И}$ от соотношения $X = d_1/d_2$



а



б

Рисунок 4.32— Зависимость $M_{\text{ДВ}}/A_{\text{И}}$ от соотношения $X = d_1/d_2$

Таблица 4.4 – Параметры для моделирования магнитных систем при $n=2$

x	d_1/d_2	0,540						0,640					
	l_3/d_2	0,4	0,6	0,8	0,91	1	1,2	0,4	0,6	0,8	0,91	1	1,2
V_M	10^{-4}М^3	3,11	3,409	3,708	3,871	4,006	4,482	3,499	3,794	4,090	4,252	4,385	4,681
V_{CT}	10^{-4}М^3	0,582	0,872	1,163	1,322	1,454	1,917	1,113	1,669	2,226	2,532	2,782	3,338
I_W	A	489	734	1024	1114	1224	1469	366	549	733,00	833,00	916	1099

Таблица 4.5 – Параметры для моделирования магнитных систем при $n=3$

x	d_1/d_2	0,563						0,640					
	l_3/d_2	0,417	0,625	0,833	0,948	1,042	1,250	0,417	0,625	0,833	0,948	1,042	1,250
V_M	10^{-4}М^3	3,110	3,409	3,704	3,871	4,006	4,006	3,372	3,669	3,965	4,261	4,261	4,558
V_{CT}	10^{-4}М^3	0,582	0,872	1,160	1,322	1,454	1,454	0,9896	1,484	1,979	2,474	2,474	2,969
I_W	A	489	734	979	1114	1224	1469	366	549	731	833	916	1099

Таблица 4.6 – Параметры для моделирования магнитных систем при $n=4$

x	d_1/d_2	0,563						0,659					
	l_3/d_2	0,417	0,625	0,675	0,975	1,042	1,250	0,417	0,625	0,675	0,975	1,042	1,250
V_M	10^{-4}М^3	3,372	3,669	3,965	4,167	4,261	4,558	2,845	3,099	3,162	3,526	3,606	3,860
V_{CT}	10^{-4}М^3	0,9896	1,484	1,979	2,316	2,474	2,969	0,508	0,766	0,829	1,196	1,277	1,534
I_W	A	489	734	979	1224	1224	1469	339	511	553	799	853	1025

Геометрические структуры магнитных систем и распределение в них линий магнитной индукции представлены на рисунке 4.33.

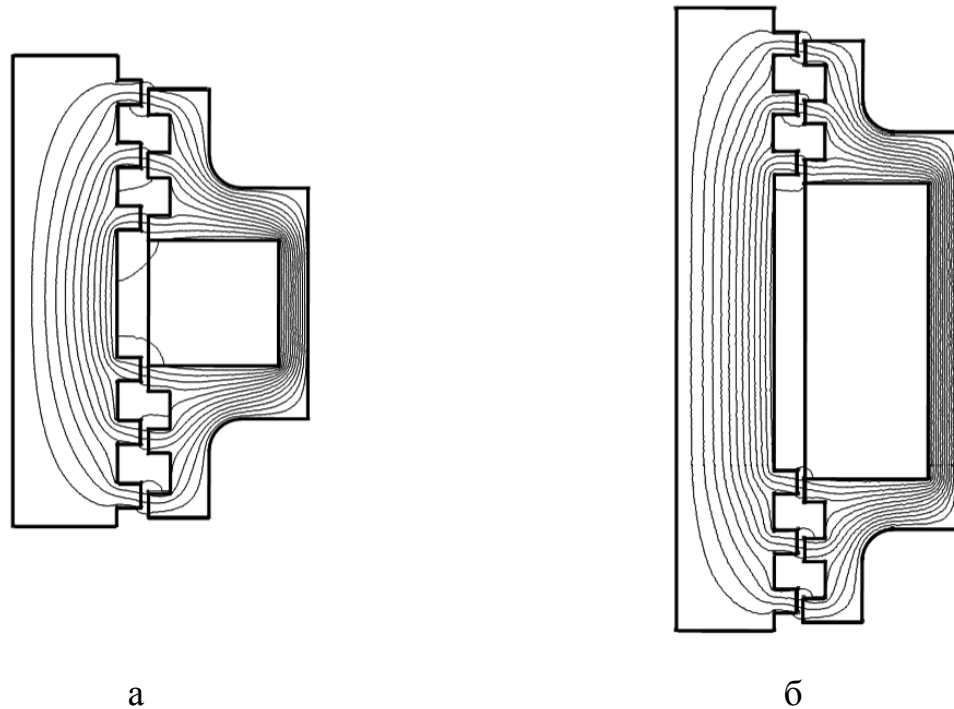


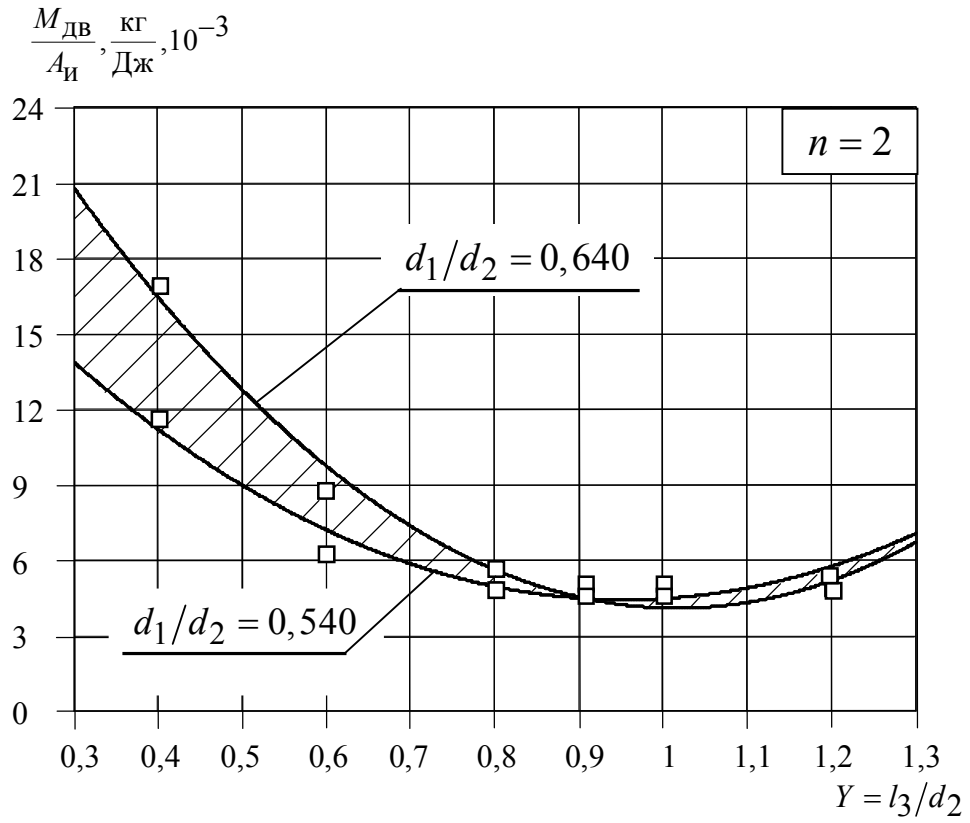
Рисунок 4.33 – Геометрическая структура вариантов конструктивных схем ЛЭМД и линий магнитной индукции для случая $X = d_1/d_2 = 0,563$:

а) при $l_3/d_2 = 0,417$, б) при $l_3/d_2 = 1,25$

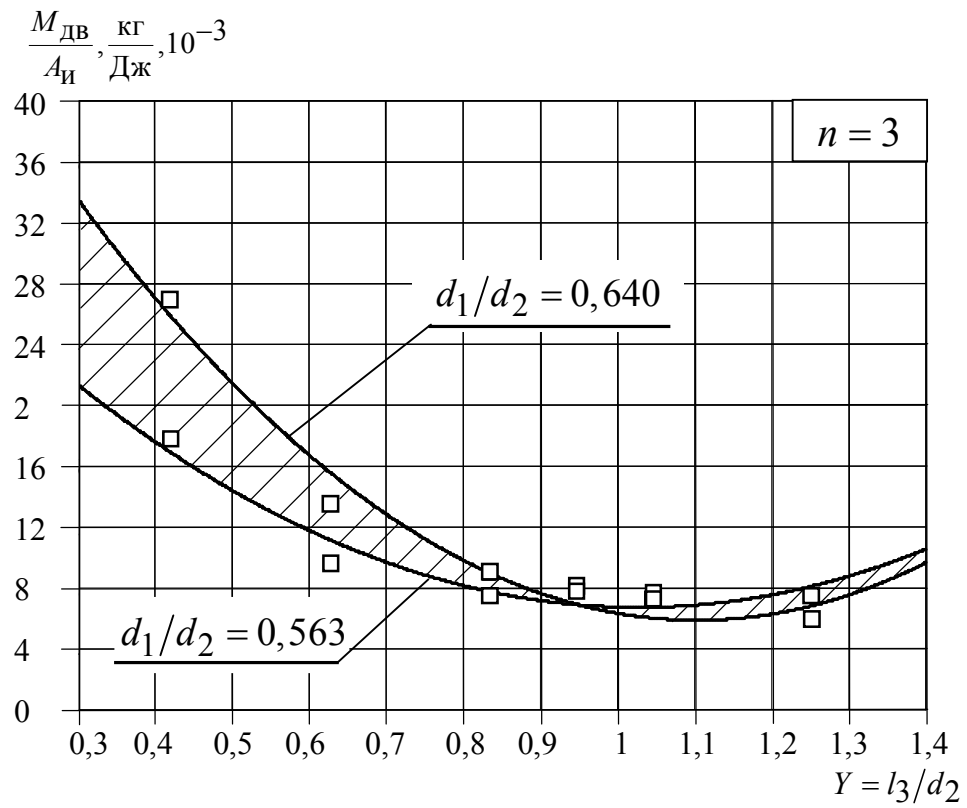
По результатам выполненных исследований были построены графики зависимости $M_{дв}/A_{и}$ от соотношения $Y = l_3/d_2$, анализ которых позволил определить рациональные ряды соотношений $Y = l_3/d_2$ при $n = 2 \div 4$ (рисунок 4.34 и рисунок 4.35).

Выявлено, что для магнитных систем с различным числом зубцов n , несмотря на разницу в максимальных значениях тягового усилия, рациональные ряды соотношений $X = d_1/d_2$ и $Y = l_3/d_2$ имеют близкие значения

В установленных рациональных рядах $X = d_1/d_2$ с увеличением значения переменной $Y = l_3/d_2$ уменьшается разброс в значениях $M_{дв}/A_{и}$.



а



б

Рисунок 4.34 – Зависимость $M_{ДВ}/A_{И}$ от соотношения $Y = l_3/d_2$

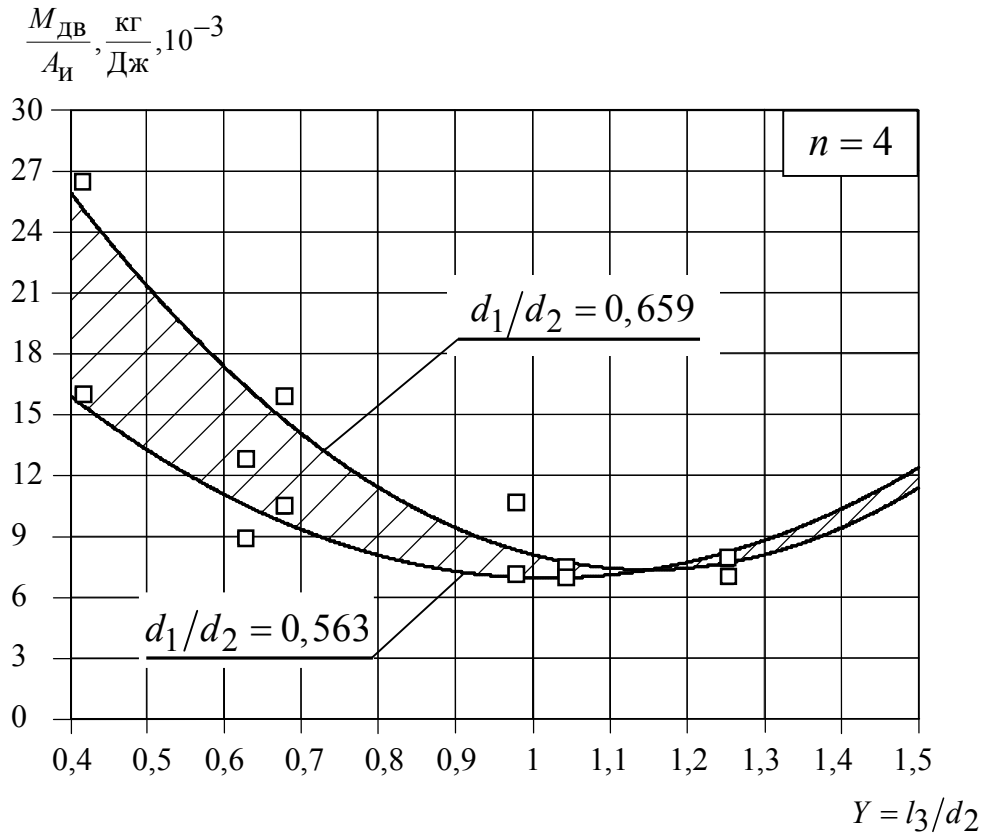


Рисунок 4.35 – Зависимость $M_{ДВ}/A_{И}$ от соотношения $Y = l_3/d_2$

Полученные в ходе исследования рациональные ряды переменных Y и X для ЛЭМД с числом зубцов $n = 2 \div 4$ представлены в таблице 4.7 [171, 172].

Таблица 4.7 – Расчетные значения

Число зубцов, n	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

Данные ряды рациональных геометрических соотношений переменных X и Y могут быть использованы при проектировании ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной.

4.7 Обоснование применения новых конструкций ЛЭМД в электроприводе виброкомпрессора

В данном параграфе, с целью обоснования создания перспективной конструкции виброкомпрессора с линейным электромагнитным двигателем, представлен расчет основных параметров ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной в составе виброкомпрессора.

При выводе основных расчетных формул использовались подходы и уравнения, приведенные в работах [16, 45]. Расчет был выполнен в несколько этапов:

1. На первоначальном этапе задаем значение рабочего хода подвижных элементов: якоря и рабочего органа. При заданном значении производительности компрессора на выходе, рабочий ход якоря будем считать фиксированным и связанным с размерами зубцово-пазовой зоны электромагнитного двигателя (рисунок 4.36):

$$x_p = \frac{c + a}{2}. \quad (4.32)$$

2. Далее, исходя из равенства сечений якоря $S_{\text{я}}$ и полюса статора $S_{\text{п}}$ получаем:

$$S_{\text{я}} = \pi r_{\text{я}}^2; \quad (4.33)$$

$$S_{\text{п}} = a n \pi r_{\text{п}} = a n \pi (r_{\text{я}} + b); \quad (4.34)$$

и определяем усредненное значение радиуса якоря:

$$r_{\text{я}} = \frac{a n + \sqrt{(a n)^2 + 4 a n b}}{2}. \quad (4.35)$$

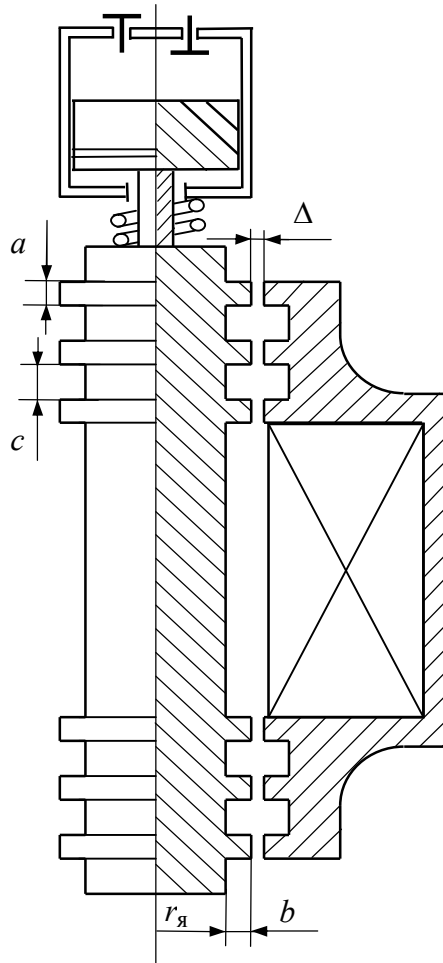


Рисунок 4. 36 – Конструктивная схема компрессора с числом зубцов якоря $n = 3$

3. На третьем этапе рассчитываем тяговое усилие и мощность ЛЭМД:

$$F_{\text{эм}} = \frac{(Iw)^2}{2} \frac{d\Lambda}{dx}. \quad (4.36)$$

В данном случае производная магнитной проводимости $d\Lambda/dx$ определялась согласно формуле (4.27). Тогда, зная значение тягового усилия, мощность ЛЭМД можно выразить следующим образом:

$$P = \frac{F_{\text{эм}} x_p}{T_{\text{ц}}}. \quad (4.37)$$

где $T_{\text{ц}}$ – время, в течение которого двигатель подключен к источнику питания.

4. Далее, определяем производительность на выходе Q_p компрессора в $\text{м}^3/\text{с}$, согласно формуле, предложенной в [16]:

$$Q_p = \frac{P\eta_{\text{из}}}{p_{\text{н}} \ln \frac{p_{\text{к}}}{p_{\text{н}}}}, \quad (4.38)$$

где $p_{\text{н}}$ – нижнее давление компрессора на входе, Па; $p_{\text{к}}$ – верхнее максимальное давление компрессора на выходе, Па; $\eta_{\text{из}}$ – изотермический КПД компрессора.

5. Затем определяем площадь поверхности S_{po} и радиус рабочего органа r_{po} :

$$S_{\text{po}} = \frac{Q_p}{f \cdot \eta_{\text{об}} \cdot x_p}, \quad (4.39)$$

где f – частота колебаний рабочего органа, $\eta_{\text{об}}$ – объемный КПД компрессора.

$$r_{\text{po}} = \sqrt{\frac{S_{\text{po}}}{\pi}}. \quad (4.40)$$

6. Далее определяем суммарную массу подвижных элементов:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{я}} + m_{\text{po}} = \pi\gamma_{\text{с}} \left[r_{\text{я}}^2 (h_{\text{к}} + 2nc) + \pi\gamma_{\text{с}} r_{\text{п}}^2 2na \right] + \pi\gamma_{\text{ал}} r_{\text{po}}^2 h_{\text{po}}, \quad (4.41)$$

где $\gamma_{\text{с}}$ – плотность стали, $\gamma_{\text{ал}}$ – плотность алюминия, $h_{\text{к}}$ – высота обмоточного пространства, $h_{\text{к}}$ – высота рабочего органа, которая принималась равной r_{po} .

7. Затем определяем жесткость упругого элемента k и противодействующего усилия $F_{\text{пр}}$:

$$F_{\text{пр}} = S_{\text{po}} p_{\text{к}}; \quad (4.42)$$

$$k = \frac{2S_{\text{po}} (S_{\text{po}} p_{\text{к}} + m_{\Sigma} g) f \eta_{\text{об}}}{Q_p}. \quad (4.43)$$

где g – ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$.

8. После чего, определяем работу, производимую компрессором:

$$A = P x_p + 0,5 k x_p^2. \quad (4.44)$$

9. На заключительном этапе, для проверки точности полученных значений приближенного расчета, определяем скорость движения подвижных элементов, которая выступает критерием оценки точности произведенных расчетов следующим образом: учитывая то, что уравнение механического равновесия для нагнетания воздуха можно записать в виде [45]:

$$m_{\Sigma} \ddot{x} + kx + P = F_{\text{ЭМ}}; \quad (4.45)$$

где \ddot{x} – ускорение движения подвижных элементов, x – координата перемещения якоря.

то, силу тяги можно выразить известным способом:

$$F_{\text{ЭМ}} = \frac{A}{\dot{x} T_{\text{Ц}}}; \quad (4.46)$$

где \dot{x} – скорость движения подвижных элементов.

тогда с учетом формулы (4.45) уравнение (4.46) примет вид:

$$m_{\Sigma} \ddot{x} + kx + P = \frac{A}{\dot{x} T_{\text{Ц}}}; \quad (4.47)$$

проинтегрировав выражение (4.47) по x и преобразовав его и уравнение (4.46) по скорости, получим следующие выражения для скорости:

$$v = \frac{p_k S_{\text{ро}} x}{m_{\Sigma}} - \frac{kx^2}{2m_{\Sigma}} + \frac{Ax}{m_{\Sigma} T_{\text{Ц}}}; \quad (4.48)$$

$$v = \frac{A}{2T_{\text{Ц}} F_{\text{ЭМ}}}. \quad (4.49)$$

Подставив полученные ранее значения в (4.48) и (4.49) можно рассчитать скорость движения якоря. При расхождении полученных значений скорости более чем на 15% расчет следует повторить.

По предлагаемой последовательности действий был рассчитана конструкция электромагнитного компрессора рисунка 4.36.

Расчет был выполнен при следующих начальных условиях:
 $c = 6 \times 10^{-3} \text{ м}$, $a = b = 4 \times 10^{-3} \text{ м}$, $\eta_{\text{из}} = 0,55$, $\eta_{\text{об}} = 0,7$, $\gamma_c = 7,9 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$,
 $\gamma_{\text{ал}} = 2,7 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $T = 0,01 \text{ с}$, $f = 50 \text{ с}^{-1}$, $n = 2 \div 5$.
 Расчет производился для двух значений давления на выходе $p_{\text{к}} = 4 \times 10^5 \text{ Па}$ и $p_{\text{к}} = 6 \times 10^5 \text{ Па}$.

Полученные значения основных параметров виброкомпрессора (таблица 4.8) близки к значениям основных параметров маломощных компрессоров, получивших наибольшее распространение на отечественном рынке (таблица 1.3 параграфа 1.1)

Максимальная разница в значениях скорости, полученных при поворочных расчетах по формулам (4.48) и (4.49) не превышает 15%.

Таблица 4.8 – Расчетные параметры компрессора

Параметры	$p_{\text{к}} = 4 \times 10^5 \text{ Па (3,95 атм.)}$				$p_{\text{к}} = 6 \times 10^5 \text{ Па (5,92 атм.)}$			
	2	3	4	5	2	3	4	5
n	2	3	4	5	2	3	4	5
$r_{\text{я}}$, м 10^{-3}	10,9	15,2	19,3	23,4	10,9	15,2	19,3	23,4
$F_{\text{эм}}$, Н	23,885	45,996	94,421	138,80	23,885	45,996	94,421	138,80
P , Вт	11,943	22,998	47,21	69,398	11,943	22,998	47,21	69,398
$Q_{\text{р}}$, м ³ /с, 10^{-5}	4,74	9,12	18,7	27,5	3,67	7,06	14,5	21,3
$S_{\text{ро}}$, м ² , 10^{-3}	0,271	0,521	1,07	1,57	0,265	0,403	0,828	1,22
$r_{\text{ро}}$, м 10^{-3}	9,28	12,9	18,5	22,4	9,19	11,3	16,2	19,7
m_{Σ} , кг	0,226	0,509	0,961	1,592	0,224	0,503	0,944	1,562
$F_{\text{пр}}$, Н	108,3	208,56	428,12	629,33	125,69	242,04	496,86	730,37
k , Н/м	44207	85419	175016	257975	51154	98791	202445	298273
A , Дж	1,094	2,111	4,328	6,371	1,268	2,445	5,015	7,380

Установлено, что при уменьшении верхнего давления в 1,5 раза производительность увеличивается в 1,2 раза. При изменении давления на выходе с 4×10^5 Па на 6×10^5 Па скорость движения якоря уменьшается на 14-15% в зависимости от значения числа зубцов n .

Предлагаемая последовательность действий позволяет выполнить приближенный расчет основных параметров электромагнитного виброкомпрессора при минимальных временных затратах.

4.8 Выводы

1. Выполнено сравнение ЛЭМД с различным конструктивным исполнением зубцово-пазовой зоны по критериям максимальных значений статического тягового усилия и интегральной работы двигателя. Установлено, что при сохранении одинаковой структуры элементов магнитной системы варианты конструктивных схем двигателей, имеющие зубцово-пазовую зону, могут существенно отличаться между собой по удельным силовым и энергетическим показателям.

2. 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.

3. Определены рациональные геометрические соотношения 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.

4. Предложена методика расчета рациональных геометрических соотношений ЛЭМД с зубцово-пазовой зоной, которая позволяет получать конструкции с максимальными значениями статического тягового усилия при минимальной массе магнитной системы.

5. По критерию определяемому, как отношение массы двигателя к его максимальному значению интегральной работы, определены диапазоны рациональных геометрических соотношений обмоточного пространства ЛЭМД с числом зубцов в зубцово-пазовой зоне $n = 2 \div 4$.

6. Дано обоснование конструкции виброкомпрессора с ЛЭМД. Полученные расчетные значения основных параметров виброкомпрессора близки к значениям основных параметров маломощных компрессоров, представленных на отечественном рынке.

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 про-

водимости 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 обмоточно-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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фотин, Б.С. Поршневые компрессоры: учебное пособие для вузов / Б.С. Фотин, И.Б. Пирумов, И.К. Прилуцкий. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 373 с.
2. ГОСТ 28567-90 Компрессоры. Термины и определения.– М.: Издательство стандартов, 1990. – 16 с.
3. ГОСТ 18517-84 Компрессоры гаражные. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 8 с.
4. Шлипченко, З.С. Насосы, компрессоры и вентиляторы / З.С. Шлипченко. – Киев: Техника, 1976. – 368 с.
5. Жилина, Е.А. О тенденциях в развитии медицинского компрессорного оборудования / Е.А. Жилина, О. В. Рогова // Современные техника и технологии: сб. тр. 17 междунар. науч.-практ. конф.–Томск, 2011. – Т. 2. – С. 67-68.
6. Карабин, А.И. Сжатый воздух. Выработка, потребление, пути экономии/ А.И. Карабин. – М: Машиностроение, 1964. – 342 с.
7. Bierbaum, U. Druckluft Kompendium / U. Bierbaum –Darmstadt: Druckhaus Darmstadt GmbH, 2004. – 227 s.
8. Щерба, В.Е. Рабочие процесс компрессоров объемного действия/ В.Е Щерба – М.: Наука, 2008 – 318 с.
9. Котзаогланиан, П. Пособие для ремонтника. Справочное руководство по монтажу, эксплуатации, обслуживанию и ремонту современного оборудования холодильных установок и систем кондиционирования / П. Котзаогланиан – М.: Эдем, 2007. – 832 с.
10. Коляда, В.В. Кондиционеры. Принцип работы, монтаж, установка, эксплуатация. Рекомендации по ремонту / Коляда В.В. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 240 с.
11. Кругляк, И.Н. Бытовые холодильники: учеб. пособие / И.Н. Кругляк. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 205 с.

12. Мааке, В. Учебник по холодильной технике / В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт, Ж.-Л. Кошпен – М.: Новости, 1998. – 1160 с.
13. Юша, В.Л. Теория, расчет и конструирование поршневых компрессоров / В.Л. Юша. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 132 с.
14. Заплатинский, В.И. Пособие по ремонту электробытовой техники / В.И. Заплатинский, Г.Д. Кортын, С.Ф. Привалов. – Л.: Лениздат, 1989. – 208 с.
15. Игнатъев, В.Г. Монтаж, эксплуатация и ремонт холодильного оборудования / В.Г. Игнатъев, А.И. Самойлов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 232 с.
16. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебник для вузов / В.М. Черкасский. – М.: Энергия, 1977. – 424с.
17. 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
18. Осин, И.Л., Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств / И.Л. Осин, Ф.М. Юферов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 424 с.
19. Копылов, И.П. Электрические машины: учебное пособие для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2002. – 607 с.
20. ГОСТ 23264-78. Машины электрические малой мощности. Условные обозначения. – М: Издательство стандартов, 1988. – 15 с.
21. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
22. Каргин, В.А. Оценка надежности электроприводов с линейным перемещением рабочего органа / В.А. Каргин, К.М. Усанов, С.М. Зубарев, А.В. Ивченко // Достижения науки – агропромышленному производству. – Челябинск: ЧГАА, 2010. – С. 389-393.
23. Рогова, О.В. Состояние и перспективы современного производства электрических приводов для бытового компрессорного оборудования / О.В. Рогова // Научный потенциал XXI века. Естественные и технические науки:

материалы VI междунар. науч. конф. – Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ, 2011. – Т.1. – С. 169-173.

24. Рогова, О.В. Анализ целесообразности применения линейных электромагнитных компрессоров в холодильном оборудовании в целях снижения энергозатрат / О.В. Рогова, Е.Н. Бурш // Энергоэффективность: матер. междунар. науч.-практ. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 124-128.

25. А.с. 138626 СССР, МПК F04B35/04, F25D11/00 Электрокомпрессор / К.И. Савков – № 649289/28, Заявл. 03.01.60; Оpubл. 01.01.61, Бюл. № 11 – 2с.: ил.

26. А.с. 953262 СССР, МПК F04B35/04, Компрессор / В.Н. Замошников – № 2952345/25-06, Заявл. 07.07.80; Оpubл. 23.08.82, Бюл. № 31 – 2с.: ил.

27. Ряшенцев, Н.П. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н., Федонин, А.Т. Малов // Электропривод с линейными электромагнитными двигателями. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.

28. Транковский, С. Экономьте электроэнергию / С. Транковский // Наука и жизнь – М.: Изд-во Правда, 1996. – № 3. – С. 66-67.

29. ГОСТ Р 51541-99 Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения. – М.: МНТКС, 1999. – 34 с.

30. ГОСТ Р 51388-99 Энергосбережение. Информирование потребителей об энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения. Общие требования. – М.: МНТКС, 1999.– 12 с.

31. ГОСТ Р 51565-2000 Энергосбережение. Приборы холодильные электрические бытовые. Эффективность энергопотребления. Методы определения. – М.: МНТКС, 2001. – 6 с.

32. Рогова, О.В. Тенденции развития и перспективы использования линейных электромагнитных компрессоров / О. В. Рогова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 17 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – Т. 2. – С. 82-83.

33. Рогова, О.В. Маломощное компрессорное оборудование с альтернативным электроприводом / О.В. Рогова, В.Ю. Нейман // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : 17 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Томск: Изд. ТПУ, 2011. – Т. 1. – С. 106-109.
34. Нейман, В.Ю. О повышении энергоэффективности маломощного компрессорного оборудования / В.Ю. Нейман, О.В. Рогова // Актуальные проблемы энергетика. АПК: материалы 2 междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: СГАУ, 2011. – С. 278-282.
35. А.с. 1151711 СССР, МПК F04B35/04, F04B17/04, Электромагнитный компрессор / Н.П. Ряшенцев, А.Д. Русаков – № 3605929, Заявл. 15.06.83; Оpubл. 23.04.85, Бюл. № 15 – 2с.: ил.
36. А.с. 1668721 СССР, МПК F04B35/04, Электромагнитная поршневая машина, преимущественно микрокомпрессор / Э.Д. Кибиркштис, М.А. Рузгис, К.П. Вайтасюс, Р.Й. Ляудинскас – № 4724501, Заявл. 26.07.89; Оpubл. 07.08.91, Бюл. № 29 – 2с.: ил.
37. А.с. 1395615 СССР, МПК F04B35/04, F04B17/04, Электромагнитный компрессор / Н.П. Ряшенцев, А.И. Смелягин, В.И. Лиманюк, А. Д. Русаков, В.В. Шорохов – № 1632069/24-6, Заявл. 01.03.71; Оpubл. 22.08.73, Бюл. № 35 – 2с.: ил.
38. А.с. 857542 СССР, МПК F04B35/04, Компрессор / Н.И. Финченко, А.Н. Мирошниченко – № 2781599/25-06, Заявл. 19.06.79; Оpubл. 23.08.81, Бюл. № 31 – 2с.: ил.
39. United States Patent 5222878, International Classes F04B17/04; F04B35/04; F04B53/08; F04B17/03; F04B35/00; F04B53/00, Electromagnetic reciprocating pump / T. Osada, T. Mori.,M. Tanabe M., T. Mikiya – № 07/827712; Filing Date 01/29/1992; Publication Date 06/29/1993 – 10p.: il.
40. United States Patent 4090816, International Classes F04B35/04; F04B35/00, Electromagnetic fluid operating apparatus / S. Takahashi – № 05/730655, Filing Date 10/07/1976, Publication Date 05/23/1978 – 13p.: il.

41. United States Patent 6652252, International Classes F04B35/04; H02K33/04; H01F7/08; F04B35/00; H02K33/00; H01F7/08, Electromagnetic device particularly useful as a vibrator for a fluid pump / N. Zabar – № 10/108518, Filing Date 03/29/2002, Publication Date 11/25/2003 – 16p.: il.
42. United States Patent 4179630, International Classes F04B35/04; H02K1/14; H02K33/04; F04B35/00; H02K1/14; H02K33/00, Linear compressor / A.R. Stuber – № 05/893873, Filing Date 04/06/1978, Publication Date 12/18/1979 – 16p.: il.
43. United States Patent 6575716, International Classes F04B35/04; F25B1/00; F25B1/02; F04B35/00; F25B1/00; F25B1/02, Linear compressor / I. Morita, M. Kobayashi, K. Inagaki, M. Katayama, A. Hayashi – № 09/857027, Filing Date 07/16/2001, Publication Date 06/10/2003 – 10p.: il.
44. Пат. 2376497 RU, МПК F04B35/04. Линейный компрессор и привод для такого компрессора / А. Шаде, Я.Г. Шуберт – № 2007121771/06; Заявл. 30.11.05; Оpubл. 20.12.09, Бюл. № 35. – 11с.: ил.
45. Смелягин, А.И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом / А.И. Смелягин. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1991. – 248 с.
46. United States Patent Application 20100196173, International Classes F04B35/04; F16J9/00; F04B35/00; F16J9/00, LINEAR COMPRESSOR / B. Gromoll – № 12/668434, Filing Date 07/03/2008, Publication Date 08/05/2010 – 4p.: il.
47. Пат. РФ 2051461 RU, МПК H02K33/12, F04B35/04. Электродвигатель-компрессор / Ф.Ш. Муфазалов, И.А. Тычкин, В.А. Лиховских – № 5048412/07; Заявл. 17.06.92; Оpubл. 27.12.95, Бюл. № 35. – 5 с.: ил.
48. А.с. 1723353 А1 СССР, МПК F04B35/04, 43/04 Электромагнитный компрессор / Г.К. Плущяускас, Ю.Ю. Гящявичюс, Г.Ю. Вербицкс, Д.В. Даукшис – № 4668657/29; Заявл. 09.02.89; Оpubл. 30.03.92, Бюл. № 12 – 2 с.: ил.
49. United States Patent 5395218, International Classes F04B27/00; F04B35/04; F04B27/00; F04B35/00, Fluid pump apparatus/ L.H. Thompson – № 08/183498, Filing Date 01/19/1994, Publication Date 03/07/1995 – 7p.:il.

50. А.с. 754107 СССР, МПК F04B35/04, Электромагнитный компрессор двойного действия / А.А. Ставинский – № 2536190/25-06, Заявл. 25.10.77; Оpubл. 07.08.80, Бюл. № 29 – 2с.: ил.
51. 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.
52. Нейман, В.Ю. Принципы построения конструктивных схем электромагнитных приводов для бытового компрессорного оборудования/ В.Ю. Нейман, О.В. Рогова// сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: Изд-во Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2011. – С. 106-112.
53. Силовые устройства электромеханики для технологических виброимпульсных систем с электромагнитным возбуждением: отчет о НИР / Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Скотников А.А., Петрова А.А., Рогова О.В. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012. – 114 с.
54. А.с. №937763 СССР, МПК F04B35/04. Электромагнитный компрессор / А.Д. Мягков, А.В. Пасишниченко. – № 2986885/25-06; Заявл. 01.10.80; Оpubл. 23.06.82, Бюл. №23 – 2 с.: ил.
55. А.с. 1078123 СССР, МПК F04B35/04 Электромагнитный компрессор / Н.Р. Муратов, В.А. Репин, Н.П. Ряшенцев, А.И. Смелягин – №3516604/25-06; Заявл. 26.11.82; Оpubл. 07.03.84, Бюл. №9 – 2 с.: ил.
56. А.с. 1177535 СССР, МПК F04B35/04 Электромагнитный компрессор / Н.Р. Муратов, Р.А. Муратов, Н.П. Ряшенцев, А.И. Смелягин – №3720662/25-06; Заявл. 03.02.84; Оpubл. 07.09.85, Бюл. №33 – 2 с.: ил.
57. А.с. 834362 СССР, МПК F04B35/04 Электромагнитный компрессор / Н.П. Ряшенцев, А.И. Смелягин, Н.П. Кашляев – №1713028/25-06; Заявл. 11.11.71; Оpubл. 30.05.81, Бюл. №20 – 3 с.: ил.
58. А.с. 122835 СССР, МПК 27В, 3 Электромагнитный синхронный непрямоточный компрессор / Н.Д. Холоденко – №619076/25; Заявл. 10.02.59; Оpubл. 1959, Бюл. №19 – 2 с.: ил.

59. А.с. 350103 СССР, МПК H02K33/02 Электрический двигатель возвратно-поступательного движения / А.Н. Мирошниченко, Н.И. Финченко – №1486949/24-7; Заявл. 21.10.70; Оpubл. 04.09.72, Бюл. №26 – 2 с.: ил.
60. А.с. 403875 СССР, МПК F04B31/00 Поршневая машина В.Г. Деньгин, Л.Г. Абакумов, А.К. Грезин и др. – №1603264/24-6; Заявл. 23.11.70; Оpubл. 26.10.73, Бюл. №43 – 2 с.: ил.
61. А.с. 1000595 СССР, МПК F04B45.04 Электромагнитный мембранный компрессор / Ю.П. Самохвалов, Ю.И. Тамбовцев – №3227276/25-06; Заявл. 29.12.80; Оpubл. 28.02.83, Бюл. №8 – 2 с.: ил.
62. Нейман, В.Ю. Тенденции в развитии конструкций синхронных двухобмоточных электромагнитных машин для импульсных технологий / В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы II междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Изд-во Саратовского ГАУ. – 2011. – С. 209-211.
63. Нейман, В.Ю. Структурный анализ синхронных электромагнитных машин ударного действия/ В.Ю. Нейман, А.А. Скотников, Л.А. Нейман// Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 106–120.
64. Нейман, Л.А. Линейные синхронные электромагнитные машины для низкочастотных ударных технологий / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 45-49.
65. Нейман, Л.А. Низкочастотные ударные электромагнитные машины и технологии / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман// Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – №1 – С. 256-259.
66. Певчев, В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий / В.В. Ивашин, А.К. Кудинов, В. П. Певчев // Известия вузов. Электромеханика. – 2012.– № 1.– С. 72-75.
67. Усанов, К.М. Совершенствование технических средств и технологий АПК системами с электромагнитными импульсными машинами: автореф.

дис. ... докт. техн. наук: 05.20.02 / Усанов Константин Михайлович. – Саратов, 2009. – 33 с.

68. Усанов, К.М. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием: монография / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. – 283 с.

69. Каргин, В.А. Импульсные электромагнитные двигатели в приводе в приводе оборудования пищевого производства/ В.А. Каргин, К.М. Усанов, С.М. Зубарев, А.В. Ивченко // Научное обеспечение агропромышленного производства: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Изд-во Курского гос. с.-х. ак., 2010. – С. 228-231.

70. Каргин, В.А. Импульсный электромагнитный привод машин с однонаправленным поступательным движением рабочего органа / В.А. Каргин, К.М. Усанов, А.П. Моисеев // Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: Изд-во «КУБиК», 2011. – С. 329-241.

71. Каргин, В.А. Использование линейного электромагнитного двигателя для упаковки сельскохозяйственной продукции / В.А. Каргин, К.М. Усанов, А.В. Ивченко, С.А. Ивженко // Механизация и электрификация сельского хозяйства– 2012. – № 1.– С. 22-23.

72. Пат. 2046540 RU, МПК H02P7/62. Электромагнитный привод возвратно-поступательного движения / В.В. Ивашин, В.А. Медведев – № 4930001/07; Заявл. 22.04.1991; Оpubл. 20.10.1995, Бюл. № 17. – 6 с.: ил.

73. Нейман, В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах / В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 30-36.

74. Нейман, Л.А. Анализ процессов энергопреобразования в однокатушечной синхронной электромагнитной машине с двухсторонним выбегом бойка / Л.А. Нейман // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – № 4. – С. 112-116.

75. Нейман, Л.А. Рабочий цикл двухкатушечной синхронной электромагнитной машины со свободным выбегом бойка / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – 48-52.
76. Нейман, В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий / В.Ю. Нейман // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25-30.
77. Нейман, В.Ю. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: Наука, техника, управление: Научный информационный сборник. – М.: Изд-во ВИНТИ. – 2010. – № 8. – С. 29-31.
78. Нейман, Л.А. Оценка перегрузочной способности ударного электромагнитного привода по средней температуре перегрева в переходных режимах / Л.А. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 58–61.
79. Нейман, Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия/ Нейман Л.А.// Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 177-183.
80. Угаров, Г.Г. Перспективы развития силовых электромагнитных импульсных систем / Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. – 2013. – № 29. – С. 88-90.
81. Угаров, Г.Г. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии / Г.Г. Угаров, В.Ю.Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37-43.
82. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели: монография / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – 220 с.
83. 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.

84. 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.
85. 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.
86. SIMOTICS L-1FN3 Linear Motors. Operating Instructions – Siemens AG: Erlangen, 2012. – 112 s.
87. ОСТ 1010. Допуски большие. Классы точности 7-й, 8-й, 9-й и 10-й. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 16 с.
88. 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.
89. Рогова, О.В. К вопросу о гашении вибраций, возникающих при работе маломощного компрессорного оборудования / О.В. Рогова, В.Ю. Нейман // Современные проблемы машиностроения: тр. VI междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 107-108.
90. Соловейчик, Ю.Г. Оптимизация геометрии линейных электромагнитных двигателей с использованием конечно-элементного моделирования магнитного поля / Ю.Г. Соловейчик, В.Ю. Нейман, М.Г. Персова, М.Э. Рояк, Ю.Б. Смирнова, Р.В. Петров // Известия вузов. Электромеханика. – 2005. – № 2. – С. 24-28.
91. Петрова, А.А. Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока / А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 2. – С. 101-108.
92. Мошкин, В.И. Моделирование тяговых характеристик линейного электромагнитного двигателя с различным материалом магнитопровода / В.И.

- Мошкин, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Вестник Курганского государственного университета. – 2014. – № 2 – С. 85-87.
93. Нейман, В.Ю. К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, О.В. Рогова, А.А. Скотников // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50-53.
94. 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.
95. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. Пособие / О.Б. Буль. – М.: Академия, 2006. – 284 с.
96. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual / D. Meeker. – Режим доступа: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения 30.06.2016).
97. Приступ, А.Г., Червяков, А.В. Моделирование магнитных полей в программе FEMM: учеб.-метод. пособие / А.Г. Приступ, А.В. Червяков. – Новосибирск: НГТУ, 2012. – 92 с.
98. Емельянов, И.Я. Основы конструирования исполнительных механизмов управления ядерных реакторов / И.Я. Емельянов, В.В. Воскобойников, Б.А. Масленок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 232 с.
99. Буль, О.Б. Простейшие методы расчета магнитных проводимостей / О.Б. Буль // Электротехника. – 2007. – № 1. – С. 17-24.
100. Нейман, Л.А. Применение метода проводимостей для учета силы одностороннего магнитного притяжения асимметричного электромагнита / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 2 – С. 214-218.
101. Дмитриенко, А.В. Расчёт статических тяговых характеристик цилиндрического ЛЭМД с поперечным магнитным полем и кольцеобразным якорем/

- А.В. Дмитриенко, Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин // Вестник Курганского государственного университета. – 2005. – № 2. – С. 236-238.
102. Буль, Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей / Б. К. Буль. – М.: Энергия, 1964. – 672 с.
103. Гордон, А. В. Электромагниты постоянного тока / А. В. Гордон, А. Г. Сливинская. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 446 с.
104. Ротерс, Г.К. Электромагнитные механизмы / Г.К. Ротерс. – М.: Госэнергоиздат, 1949. – 412с.
105. Буль О.Б. Расчет магнитных проводимостей плоскопараллельных и плоскомеридианных полей с помощью простых фигур / О.Б. Буль // Электромеханика. – 1969. – № 1. – С. 3-10.
106. Буль, Б.К. К расчету магнитных проводимостей поля вблизи воздушного зазора / Б.К. Буль // Электричество. – 1952. – № 7. – С. 52-55.
107. Буль, Б.К. К расчету магнитных проводимостей воздушного зазора для прямоугольных и круглых полюсов / Б.К. Буль // Электричество. – 1978. – № 4. – С. 73-74.
108. Буль, Б.К. Исследование поля вблизи воздушного зазора и расчет магнитной проводимости / Б.К. Буль // Вестник электропромышленности. – 1959. – № 9. – С. 66-72.
109. Иоффе, А.И. Аналитический метод расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров для прямоугольных полюсов / А.И. Иоффе // Электричество. – 1977. – № 3 – С. 67-70.
110. Зекцер, Д.М. Расчет магнитных проводимостей электромагнитных механизмов / Д.М. Зекцер, М.Д. Зекцер // Электричество. – 1984. – № 8. – С. 59-61.
111. Бахвалов, Ю.А. К определению магнитных проводимостей электромагнитных систем / Ю.А. Бахвалов, В.П. А.Г. Гринченков, Никитенко, В.В. Пахомов, А.В. Шипулин, Е. Калленбах // Электромеханика. – 1997. – №3. – С. 29-32.

112. Русин, Ю.С. Расчет магнитной проводимости / Ю.С. Русин // Электротехника. – 1963. – № 12. – С. 1304-1308.
113. Русин, Ю.С. Определение магнитной проводимости зубчатых магнитных систем / Ю.С. Русин // Электричество. – 1961. – № 7. – С. 59-67.
114. Русин, С.Ю. Расчет электромагнитных систем / С.Ю. Русин. – Ленинград.: Энергия, 1968. – 133 с.
115. Александров, Г. Н. Теория электрических аппаратов: учебник / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. – 540 с.
116. Ряшенцев, Н.П., Русаков А.Д. Магнитные проводимости простых фигур / Н.П. Ряшенцев, А.Д. Русаков // Электротехника. –1976. – № 1. – С. 52-55.
117. Коц, Б.Э. Определение проводимости воздушного зазора зубчатых магнитных систем / Б.Э. Коц // Электротехника. – 1964. – № 9. – С. 18-19.
118. Свинцов Г.П. Модернизированный метод вероятных путей потока Ротерса / Г.П. Свинцов // Электромеханика. – 1995. – № 5-6. – С. 47-56.
119. Свинцов, Г.П. Расчет проводимости плоскопараллельных магнитных полей в воздушных зазорах модифицированным методом Ротерса/ Г.П. Свинцов// Электромеханика. 1996. – № 1-2. – С. 38-47.
120. Свинцов, Г.П. Моделирование и оптимизация электромагнитных приводов электрических аппаратов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01 / Свинцов Геннадий Петрович. – Чебаксары, 2001. – 39 с.
121. Основич, Л.Д. Метод расчета магнитных проводимостей воздушных зазоров / Л. Д. Основич // Электричество. – 1967. – № 3 – С. 31-35.
122. Русаков, А.Д. Расчет проводимостей выпучивания электромагнитного двигателя возвратно-поступательного движения / А.Д. Русаков // Электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 46-50.
123. Ряшенцев, Н.П., Швец С.А. К расчету магнитной проводимости воздушного зазора методом конформных отображений / Н.П. Ряшенцев, С.А.

Швец // Электромагнитные машины ударного действия. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1978. – С. 3-8.

124. Рогова О. В. Сравнительный анализ методик расчета магнитной проводимости / О. В. Рогова // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. 1 междунар. науч. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 3. – С. 148-151.

125. Рогова, О.В. К вопросу проектирования линейных магнитных систем с зубчатой структурой магнитопровода / О.В. Рогова, В. Ю. Нейман // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7 междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 57-60.

126. Певчев, В.П. Составление схем замещения электромагнитных систем / А.К. Кудинов, В.П. Певчев // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32-36.

127. 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.

128. 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.

129. 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.

130. Казаков, Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: справочник/ Л.А. Казаков – М.: Радио и связь, 1991. – 352 с.

131. Сливинская, А.Г. Электромагниты и постоянные магниты: учебное пособие для студентов вузов/ А.Г. Сливинская. – М.: Энергия, 1972. – 248с.

132. Певчев, В.П. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: монография / В.П. Певчев, В.В. Ивашин. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. – 141 с.
133. Угаров, Г.Г. Анализ показателей электромагнитных ударных машин / Г.Г. Угаров, В.Ю.Нейман // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72-80.
134. Малинин, Л.И. Определение напряжения преобразования энергии и электромагнитных сил в электромеханических системах / Л.И. Малинин, В.Ю. Нейман // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 57-62.
135. Нейман, В.Ю. Режимы форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях / В.Ю. Нейман // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105-112.
136. Нейман, В.Ю. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.Ю. Нейман, А.А. Петрова // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47-50.
137. Мошкин, В.И. К расчету усилия удержания интегрированного линейного электромагнитного двигателя / В.И. Мошкин // Электротехника. – 2013. – № 8. – С. 60-64.
138. Мошкин, В.И. Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке / В.И. Мошкин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 4. – С. 93-96.
139. Татевосян, А.С. Анализ процессов энергопреобразования в электромагнитном приводе колебательного движения / А.С. Татевосян, Н.В. Захарова, С.В. Шелковников // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2015. – № 1. – С. 270-275.
140. Татевосян, А.А. Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения / А.А. Татевосян, А.С. Татевосян // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – № 4. – С. 121-132.

141. Певчев, В.П. Разработка методов анализа и синтеза мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01: Певчев Владимир Павлович. – Самара, 2012. – 34 с.
142. Ряшенцев, Н.П. Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
143. Афонин, А.А. Электромеханические преобразователи непосредственного привода / А.А. Афонин // Электромеханика. – 1990. – № 9. – С. 96-102.
144. Мошкин, В.И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с укороченной магнитной системой / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, Д.Н. Шестаков, С.Ю. Помялов // Научное обозрение. – 2015. – № 4. – С. 22-28.
145. Андреева, Е.Г. Исследование осесимметричной модели магнитной системы открытого типа / Е.Г. Андреева, А.А. Татевосян, И.А. Семина // Омский научный вестник. – 2010. – № 1. – С. 110-113.
146. Нейман, Л.А. К оценке выбора типа электромагнита по значению конструктивного фактора / Л.А. Нейман, А.А. Петрова, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 62-64.
147. Нейман, В.Ю. О методике к выбору типа электромагнита по значениям конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. – № 2. – С. 310-313.
148. 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.
149. 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.
150. Neyman V. New Construction Types of a Linear Electromagnetic Motor with the Active Teeth-Slot Zone/V. Neyman, O. Rogova // IFOST 2016: Proceed-

ings of the 11d International Forum on Strategic Technology. – 2016. – Vol. 22 – P.28-32.

151. Кадышев, А.И. Исследование статических параметров длинноходовых электромагнитов для молотов / А.И. Кадышев, В.Ю. Нейман, Б.Ф. Симонов // Транспорт. Наука, техника, управление. – 2011. – № 12. – С. 30-32.

152. 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.

153. Нейман, Л.А. Упрощенный расчет электромагнитного ударного привода в повторно-кратковременном режиме работы / Л.А. Нейман, В.Ю. Нейман, А.С. Шабанов // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 50-53.

154. Нейман, Л.А. К решению задачи рационального выбора электромагнитного двигателя заданного габарита и веса на основе численного эксперимента / Л.А. Нейман // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2013. – № 4. – С. 184-190.

155. Мошкин, В.И. Определение основных геометрических параметров импульсного линейного электромагнитного двигателя по значению максимального тягового усилия / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Научное обозрение. – 2015. – № 3. – С. 18-24 .

156. Мошкин, В.И. К выбору основных базисных размеров линейных электромагнитных двигателей / Мошкин В.И., Угаров Г.Г. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. – Т. 3. – № 8 – С. 108-111.

157. Нейман, В.Ю. Способы повышения энергетических показателей однообмоточных импульсных устройств с электромагнитным возбуждением / В.Ю. Нейман, Д.М. Евреинов, Л.А. Нейман, А.А. Скотников, Ю.Б. Смирнова // Транспорт: Наука, техника, управление: Научный информационный сборник. – М.: Изд-во ВИНТИ. – 2010. – №8. – С. 29-31.

158. Мошкин, В.И. Энергетическая и динамическая эффективность однообмоточных линейных электромагнитных двигателей с возвратной пружиной /

В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 130-135.

159. 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.

160. Малинин, Л.И., Нейман В.Ю. Предельные силовые характеристики электромагнитных двигателей постоянного тока // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 61-67.

161. Нейман, В.Ю. Проектный расчет электромагнитного двигателя с аксиальным продольно-поперечным потоком / В.Ю. Нейман // Импульсные линейные электрические двигатели. – Новосибирск: ИГДСО АН СССР, 1991. – С. 3-9.

162. Афонин, А. А. Электромагнитный привод робототехнических систем / А.А. Афонин. – Киев: Наукова думка. 1986. – 266 с.

163. Рогова, О.В. К вопросу выбора оптимальных геометрических размеров электромагнитного двигателя с зубчатой структурой магнитопровода / О.В. Рогова, И.С. Сергиенко // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Ч.5 – С. 313-315.

164. 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.

165. Нейман, В.Ю. Расчет показателя экономичности силового электромагнита постоянного тока с помощью моделирования магнитного поля/ В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Транспорт: Наука, техника, управление: Научный информационный сборник. – М.: Изд-во ВИНТИ. – 2008. – № 6. – С. 21-24.

166. Нейман, Л.А. Приближенный расчет циклического электромагнитного привода с учтенным начальным превышением температуры в переходном тепловом процессе нагрева / Л.А. Нейман // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1 – С. 113-122.
167. Нейман, В.Ю. Сравнение геометрически подобных систем электромагнитов по условию постоянства теплового критерия / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова // Электротехника. – 2011. – № 12. – С. 14-16.
168. Нейман, Л.А. Исследование перегрузочной способности циклического электромагнитного привода в зависимости от начального превышения температуры в переходных тепловых режимах / Л.А. Нейман // Электротехника. – 2014. – № 7. – С. 7-12.
169. Нейман, Л.А. Анализ процесса нагрева электромагнитного двигателя работающего в импульсном режиме / Л.А. Нейман, А.А. Скотников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 2. – С. 319-322.
170. Нейман, Л.А. Исследование нагрева электромагнитного двигателя в переходных режимах / Л.А. Нейман, А.А. Скотников, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 6. – С. 50-54.
171. 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.
172. Рогова, О.В. Оптимизационный расчет электромагнитного двигателя с активной зубцово-пазовой зоной / О.В. Рогова // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. – С. 56-59.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ
 Первый проректор НГТУ
 д.т.н., профессор
 Г.И. Расторгуев
 « 8 » сентября 2016 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
 на соискание ученой степени кандидата технических наук
 Роговой Ольги Валерьевны

Комиссия в составе:

Председатель – Штанг А.А., к.т.н., декан ФМА;

Члены комиссии – Горева Л.П., к.т.н., доц., председатель методической
 комиссии ФМА;

– Рождественская Л.Н., к.э.н., доц., зав. каф. ТОПП,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
 «Линейный электромагнитный двигатель с улучшенными тяговыми
 характеристиками для виброкомпрессора», представленной на соискание
 ученой степени кандидата технических наук, использованы в учебном
 процессе факультета мехатроники и автоматизации Новосибирского
 государственного технического университета при подготовке бакалавров по
 направлению 38.03.07 «Товароведение»:

1. При проведении лекционных занятий по дисциплинам «Товароведение
 однородных групп непродовольственных товаров» и «Товароведение и
 экспертиза бытовой техники».
2. В качестве направления исследований при выполнении научно-
 исследовательских, курсовых и выпускных квалификационных работ
 студентов факультета мехатроники и автоматизации.

Использование теоретических положений, представленных в
 диссертационной работе, позволяет повысить качество подготовки
 студентов.

Председатель:

к.т.н., Штанг А.А.

Члены комиссии

к.т.н., доц. Горева Л.П.

к.э.н., доц. Рождественская Л.Н.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 526 852** ⁽¹³⁾ **C2**(51) МПК
H02K 33/02 (2006.01)
H02K 1/06 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2012146808/07, 01.11.2012

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
01.11.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 01.11.2012

(43) Дата публикации заявки: 10.05.2014 Бюл. № 13

(45) Опубликовано: 27.08.2014 Бюл. № 24

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2089995 C1, 10.09.1997 . SU 855888
A1, 15.08.1081. RU 2159984 C1, 27.11.2000 . RU
22727 U1, 20.04.2002. RU 2065659 C1,
20.08.1996 . US 8013480 B2, 06.09.2011 . FR
2687502 A1, 20.08.1993 . US 3670188
A1,13.06.1972

Адрес для переписки:
630073, г.Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
НГТУ

(72) Автор(ы):
Нейман Людмила Андреевна (RU),
Рогова Ольга Валерьевна (RU),
Нейман Владимир Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Новосибирский государственный
технический университет" (RU)

(54) ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:
Изобретение относится к области электротехники, в частности к электромагнитным двигателям, и может быть использовано для импульсных устройств с возвратно-поступательным движением рабочих органов. Предлагаемый электромагнитный двигатель содержит цилиндрический магнитопровод, состоящий из корпуса, сердечника и соединяющего их фланца, расположенную на сердечнике обмотку и плоский внешний прямоходовый якорь с кольцеобразным ферромагнитным шунтом. В указанном продольном канале сердечника расположена пружина, внутри которой с возможностью осевого перемещения размещен направляющий стержень, жестко связанный с плоским прямоходовым якорем. Согласно первому варианту осуществления данного изобретения, по длине наружного и внутреннего диаметра кольцеобразного ферромагнитного шунта

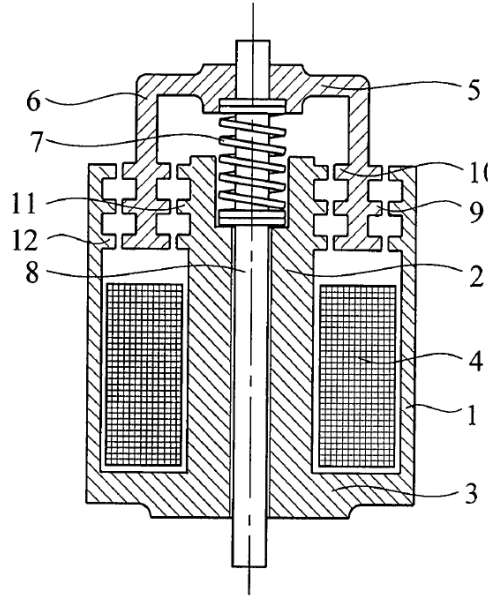
выполнены кольцевые выступы с шагом, равным шагу сопряженных по диаметру ответных кольцевых выступов, образованных по наружному диаметру сердечника и по внутреннему диаметру корпуса, соответственно. Согласно второму варианту, в предлагаемом электромагнитном двигателе кольцевые выступы выполнены по длине внутреннего диаметра кольцеобразного ферромагнитного шунта и сопряжены по диаметру ответных кольцевых выступов, образованных по наружному диаметру сердечника. Согласно третьему варианту, в предлагаемом электромагнитном двигателе кольцевые выступы выполнены по длине наружного диаметра кольцеобразного ферромагнитного шунта и сопряжены по диаметру ответных кольцевых выступов, образованных по внутреннему диаметру корпуса. В электромагнитном двигателе по любому из вариантов указанные кольцевые выступы

RU 2 5 2 6 8 5 2 C 2

RU 2 5 2 6 8 5 2 C 2

образуют зубцовую зону магнитной системы. Технический результат, достигаемый при использовании данных изобретений, состоит в повышении их надежности, что обеспечивается путем устранения соударений в конце рабочего

хода между плоским прямоходовым якорем и корпусом магнитопровода, независимо от длительности подачи импульса напряжения на обмотку и времени движения якоря. 3 н.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 1

RU 2 5 2 6 8 5 2 C 2

RU 2 5 2 6 8 5 2 C 2

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **149 508** (13) **U1**(51) МПК
H02K 33/02 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014106191/07, 19.02.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
19.02.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 19.02.2014

(45) Опубликовано: 10.01.2015 Бюл. № 1

Адрес для переписки:

630073, г. Новосибирск 73, пр. К. Маркса, 20,
НГТУ

(72) Автор(ы):

Нейман Владимир Юрьевич (RU),
Нейман Людмила Андреевна (RU),
Рогова Ольга Валерьевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Новосибирский государственный
технический университет" (RU)

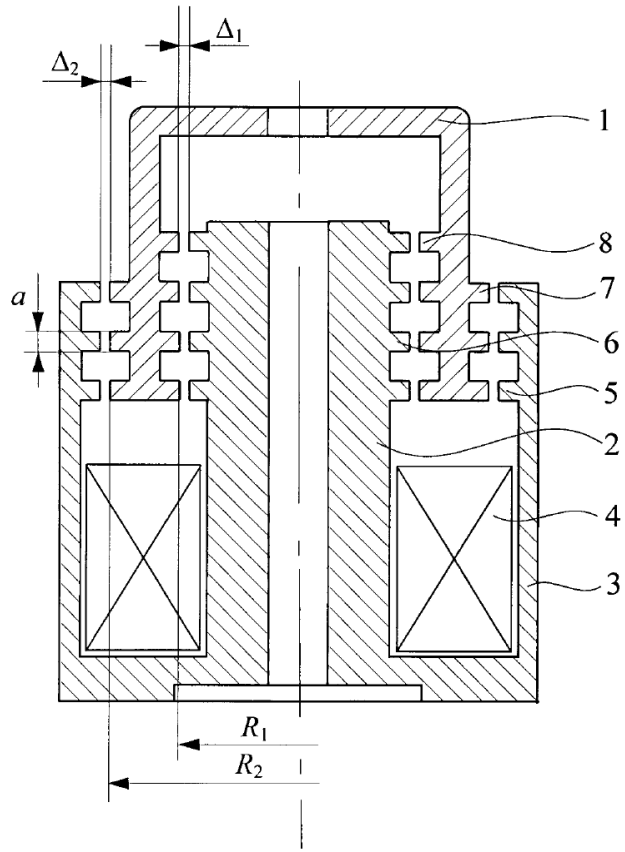
(54) ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

(57) Формула полезной модели

Электромагнитный двигатель, содержащий цилиндрический магнитопровод, состоящий из внешнего втяжного якоря, статора, в состав которого входят сердечник и внешняя стенка, с выступами на их поверхностях, обмотка, уложенная в цилиндрической части сердечника, отличающийся тем, что выступы выполнены по наружной и внутренней боковой поверхности якоря с шагом, равным шагу сопряженных по диаметру выступов, образованных по наружной боковой поверхности сердечника и внешней боковой поверхности внешней стенки статора, причем число выступов по внутренней поверхности якоря и ответных выступов по наружной поверхности сердечника по меньшей мере на один больше числа выступов по внешней поверхности якоря и ответных выступов по внутренней поверхности внешней стенки статора.

RU 149508 U1

RU 149508 U1



RU 149508 U 1

RU 149508 U 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 116916

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОМПРЕССОР

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011151028

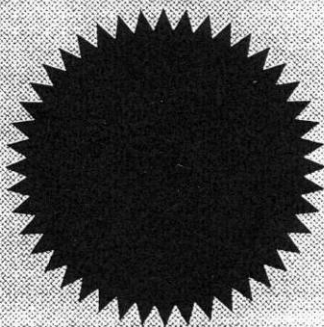
Приоритет полезной модели 14 декабря 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 июня 2012 г.

Срок действия патента истекает 14 декабря 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 112722

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КОМПРЕССОР

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011133626

Приоритет полезной модели 10 августа 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 января 2012 г.

Срок действия патента истекает 10 августа 2021 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов