

На правах рукописи



Соломин Андрей Владимирович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ ТЯГОВЫХ УСТРОЙСТВ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО
ТРАНСПОРТА**

Специальности: 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация»
05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный консультант:

Зарифьян Александр Александрович

доктор технических наук, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты:

Евстафьев Андрей Михайлович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Коняев Андрей Юрьевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Сапсалева Анатолий Васильевич

доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ-НЭТИ)

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ)

Защита диссертации состоится 19 октября 2020 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 218.010.01 при ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>

Автореферат разослан «___» «_____» 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 218.010.01



В.А. Соломин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Железнодорожный транспорт является важнейшей отраслью народного хозяйства, без которой невозможно функционирование и развитие экономики Российской Федерации. Он обеспечивает в настоящее время порядка 70 % грузовых и около половины пассажирских перевозок.

Для повышения эффективности работы транспортной отрасли следует повышать скорости движения поездов. Министерство транспорта РФ и ОАО «РЖД» придают большое значение повышению скоростей движения пассажирских поездов до 200-300 км/ч. Создание новых высокоскоростных магистралей позволит быстро и с высоким уровнем комфорта перевозить пассажиров из Москвы в Санкт-Петербург, Казань и на Юг, что позволит ОАО «РЖД» выигрывать в конкурентной борьбе с авиацией.

Высокоскоростное движение требует существенного технического перевооружения железнодорожного транспорта, в том числе создания принципиально новых видов транспорта. Об этом говорится в «Белой книге» ОАО «РЖД». После 2000 года возобновились на новом уровне работы по созданию высокоскоростного магнитолевитационного транспорта (МЛТ), способного перемещаться со скоростями 350-500 км/ч. В 2016 году в Санкт-Петербурге образован инженерный кластер «Российский Маглев» на базе ПГУПС. Прогресс в области МЛТ должен базироваться на высоких технологиях, новых технических решениях и применении новых материалов. Высокие скорости движения требуют решать по-новому научно-технические проблемы повышения эффективности тягового электропривода, вопросов торможения и увеличения безопасности движения за счет улучшения динамических характеристик транспортных экипажей. Решение данных научных проблем весьма актуально для высокоскоростного МЛТ. Один из путей решения этих научных проблем - в улучшении тяговых характеристик высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с линейными асинхронными двигателями (ЛАД) путем развития их теории, в создании новых конструкций ЛАД, обеспечивающих повышение безопасности движения высокоскоростного МЛТ за счет боковой стабилизации транспортного экипажа.

Цель диссертационной работы – улучшение тяговых характеристик и повышение безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта путем развития теории тяговых устройств с ЛАД и создание их новых конструкций, улучшающих поперечную динамику МЛТ за счет демпфирования боковых колебаний транспортного экипажа.

Задачи диссертационной работы, поставленные и решенные для достижения сформулированной выше цели:

- определить наиболее перспективные системы высокоскоростного транспорта на современном этапе развития российского общества;
- решить научную проблему повышения эффективности использования тяговых ЛАД на высокоскоростном магнитолевитационном транспорте путем развития их теории и создания новых конструкций;

– решить важную научно-техническую проблему создания и разработки устройств с ЛАД, повышающих эффективность работы и безопасность движения высокоскоростного МЛТ путем улучшения их боковой динамики за счет создания усилий поперечной самостабилизации экипажа относительно путевой структуры;

– разработать основы теории регулируемых тяговых ЛАД с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки;

– развить теорию тяговых ЛАД с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком на базе решения краевых полевых задач.

Методы исследований. Основные результаты диссертации получены путем аналитических исследований, которые осуществлялись на основе законов электродинамики путем математических преобразований. Используются теория электромагнитного поля, закон Ампера, теория электромеханического преобразования энергии. Математический аппарат диссертации включает дифференциальное и интегральное исчисление функций одной или нескольких переменных, векторный анализ, комплексные числа, принцип нахождения экстремума функции, ряды Фурье. Решение задач потребовало широкого применения ЭВМ.

Экспериментальные исследования на лабораторных и макетных образцах проводились для подтверждения корректности теоретических результатов.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Способ улучшения поперечной динамики и повышения безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта за счет использования нового принципа работы, основанного на применении встречно бегущих магнитных полей.

2. Математические модели тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, работающих на новом принципе действия, позволяющие определять соотношения для расчета интегральных характеристик ЛАД при учете взаимного влияния распределения магнитного поля в воздушном зазоре, геометрических размеров двигателя и скорости движения экипажа магнитолевитационного транспорта.

3. Разработанная оригинальная математическая модель, позволившая получить соотношения для расчета динамических усилий поперечной стабилизации при боковых смещениях высокоскоростного экипажа МЛТ с тяговыми ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком относительно путевой структуры, повышающих безопасность движения и учитывающих взаимосвязи между геометрическими размерами индуктора двигателя, его вторичного элемента и величиной бокового смещения.

4. Результаты решения оптимизационной задачи, позволившие определить зоны наиболее выгодного использования ЛАД с поперечным магнитным потоком, что необходимо для проектирования линейных двигателей для высокоскоростного МЛТ. Оценка коэффициента ослабления электромагнитной силы (тягового усилия) на работу ЛАД для магнитолевитационного транспорта и способы его снижения.

5. Аналитические соотношения для расчета коэффициента ослабления электромагнитной силы тягового ЛАД с поперечным магнитным потоком, учитывающие распределение токов во вторичном элементе, величину воздушного зазора между экипажем МЛТ и путевой структурой и влияние поперечного краевого эффекта.

6. Соотношения для расчета оптимальной плотности тока во вторичном элементе тяговых ЛАД с поперечным магнитным потоком для МЛТ, полученные с учетом взаимосвязей между скоростью движения и геометрическими размерами двигателя.

7. Определение плотности тока индукторов тяговых ЛАД с продольным магнитным потоком с учетом геометрических размеров индукторов и вторичных элементов и их взаимного влияния на распределение плотности тока в лобовых частях обмоток, что повышает точность расчета тягового усилия.

8. Решение краевой задачи, на основе которого установлены соотношения для расчета плотности тока во вторичном элементе ЛАД для МЛТ с продольным магнитным потоком с учетом фазовых сдвигов между токами индуктора и вторичного элемента, что позволяет повысить точность расчета тягового усилия.

9. Результаты аналитического исследования, позволившие определить соотношения для расчета плотности тока в тяговом ЛАД с поперечным магнитным потоком с учетом взаимосвязей между геометрическими размерами двигателя и влияния поперечного краевого эффекта.

10. Исследование окрестностей экстремума (максимума) плотности тока во вторичном элементе тягового ЛАД для магнитолевитационного транспорта.

11. Особенности регулирования ЛАД при изменении сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Установленные закономерности изменения коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента тягового ЛАД в режимах трогания экипажа МЛТ с места, разгона и торможения.

12. Комплекс инновационных конструкций линейных асинхронных двигателей для тяговых устройств высокоскоростного МЛТ, защищенных 2 авторскими свидетельствами СССР и 25 патентами РФ на изобретения.

Научная новизна результатов исследований

По специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация:

1. Предложен новый принцип боковой стабилизации экипажа высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, улучшающий его поперечную динамику и повышающий безопасность движения. Разработаны математические модели тяговых ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, работающих на новом принципе действия, при помощи которых определены соотношения для расчета интегральных характеристик линейного двигателя при учете взаимного влияния магнитодвижущих сил (МДС) в воздушном зазоре, токов во вторичном элементе и скорости движения высокоскоростного транспортного экипажа.

2. Разработана математическая модель, позволившая получить соотношения для расчета усилий поперечной самостабилизации при боковых смещениях экипажа высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с тяговым ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком относительно путевой структуры, повышающих безопасность движения, и учитывающие взаимосвязи между геометрическими размерами индуктора двигателя, вторичного элемента и величиной бокового смещения.

3. Решением оптимизационной задачи определены зоны наиболее выгодного использования тягового ЛАД с поперечным магнитным потоком, что необходимо при проектировании линейных двигателей для МЛТ. Показано, что коэффициент ослабления электромагнитной силы (тягового усилия) зависит от распределения плотности тока во вторичном элементе тягового ЛАД, величины воздушного зазора и влияния поперечного краевого эффекта, определены способы его снижения путем направленного изменения геометрических размеров двигателя.

По специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты:

1. Установлены оптимальные значения плотности тока вторичного элемента тяговых ЛАД с поперечным и с продольным магнитным потоком для МЛТ, учитывающие взаимосвязи между скоростью движения транспортного экипажа и геометрическими размерами двигателя и влияние поперечного краевого эффекта, что повышает точность расчета тягового усилия. Доказано, что приращение плотности тока вторичного элемента при его поперечном смещении в любую сторону от оси симметрии всегда будет отрицательным.

2. Исследование окрестностей экстремума (максимума) средней плотности тока вторичного элемента тягового ЛАД для МЛТ показало, что максимум функции занимает очень узкую область. Это приводит к тому, что даже незначительные отклонения от оптимума приведут к существенному снижению плотности тока и тягового усилия, что особенно резко проявляется при малых значениях полюсного деления.

3. Исследованы особенности регулирования линейного асинхронного двигателя при изменении сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Установлены закономерности увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого тягового ЛАД для МЛТ в режимах трогания транспортного экипажа с места, торможения и регулирования скорости движения. Показано, что влияние вытеснения тока особенно резко проявляется при замыкании части проводников в пазу вторичного элемента, занимающих более 50 % высоты паза.

Практическая ценность работы

1. Предложенный новый принцип боковой стабилизации экипажа высокоскоростного МЛТ, улучшающий его поперечную динамику и повышающий безопасность движения, позволит разрабатывать линейные двигатели для магнитолевитационного транспорта, которые развивают помимо тяговых дополнительные усилия поперечной стабилизации.

2. Разработанные математические модели тяговых ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, работающих на новом принципе действия, при помощи которых определены соотношения для расчета интегральных характеристик линейного двигателя при учете взаимного влияния МДС в воздушном зазоре, токов во вторичном элементе и скорости движения высокоскоростного транспортного экипажа, повышают точность расчета.

3. Математическая модель, позволившая получить соотношения для расчета динамических усилий поперечной самостабилизации при боковых смещениях экипажа тягового ЛАД с поперечным магнитным потоком для высокоскоростного МЛТ с тяговым ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком относительно путевой структуры, повышающих безопасность движения, и учитывающие взаимосвязи между геометрическими размерами индуктора, вторичного элемента и величиной бокового смещения, позволяет проектировать новые системы транспорта с повышенной безопасностью.

4. Результаты исследования распределения плотности тока индукторов ЛАД с продольным и поперечным магнитным потоком позволяют принимать рациональные технические решения, обеспечивающие наибольшую эффективность использования линейных машин в тяговых приводах высокоскоростного магнитолевитационного транспорта на стадии проектирования.

5. Алгоритмы расчета распределения токов во вторичных элементах тяговых линейных асинхронных двигателей с продольным и поперечным магнитным потоком позволяют повысить точность расчета тяговых усилий.

6. Достигнута возможность определения максимума средней плотности тока во вторичном элементе ЛАД при заданных значениях геометрических размеров двигателя и скорости движения высокоскоростного экипажа МЛТ, что позволяет повысить величину тягового усилия.

7. Новый способ регулирования линейных асинхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента может получить применение в системах МЛТ. Установленные закономерности изменения коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки регулируемого тягового ЛАД за счет вытеснения тока в пазу обеспечили повышение точности расчетов параметров и энергетических характеристик линейных двигателей для магнитолевитационного транспорта в режимах трогания экипажа с места, разгона и торможения.

8. Разработаны на уровне изобретений конструкции тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком с автоматической поперечной самостабилизацией, позволяющие улучшить боковую динамику и повысить безопасность движения магнитолевитационного транспорта и новые ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента,

Реализация результатов работы. Основные научные результаты диссертации использованы при выполнении исследований по новым видам транспорта в рамках гранта РФФИ РЖД № 17-20-04236 «Магнитное охлаждение перспективных транспортных и энергетических систем» в ФГБУН «Институт

радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» РАН; они внедрены в АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» (г. Санкт-Петербург), входящем в Госкорпорацию «Росатом», при разработке стенда по исследованию равновесия, устойчивости и движения высокоскоростного МЛТ. Результаты исследований автора приняты к внедрению на ряде промышленных предприятиях и на транспорте. Результаты по исследованию распределения плотности тока во вторичном элементе, методики учета вытеснения тока в обмотках регулируемых ЛАД и расчета усилий самостабилизации, улучшающих поперечную динамику транспортных экипажей и безопасность движения, рекомендуется использовать в проектно-конструкторских организациях, занимающихся разработкой высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

Результаты работы отражены в учебных пособиях, используемых в учебном процессе РГУПС при подготовке бакалавров, специалистов и магистров.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях «Исследования и разработки ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» (г. Самара, СамГАПС, 2001 – 2003 гг.), «Транспорт – 2000-2020 гг.» (г. Ростов н/Д, РГУПС), на 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Красноярск, СибФГУ, 2007), на национальных научно-практических конференциях «Транспромэк» – 2015 – 2019 гг. (г. Ростов н/Д, РГУПС), на международных научно-технических конференциях «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» – 2015 – 2019 гг. (г. Санкт-Петербург, ПГУПС), на 24 Международной конференции «MAGLEV 2018» (г. Санкт-Петербург), на научных семинарах в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН в 2017 – 2018 гг. (г. Москва).

Публикации. Основные научные результаты диссертации представлены в 62 работах, в числе которых 4 монографии, 28 статей в журналах из списка, рекомендованного ВАК, 3 статьи из списка SCOPUS, 27 изобретений, защищенных 2 авторскими свидетельствами СССР и 25 патентами РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации – 398 страницы, включая 378 страницы основного текста с 105 рисунками, 31 таблицей, 262 использованных источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, отражены научные проблемы работы и ее задачи. Приведены сведения о структуре и содержании диссертации.

Первая глава диссертации посвящена анализу высокоскоростных наземных транспортных систем (ВСНТ) с линейными асинхронными двигателями, которые в близком будущем будут применяться для пассажирских перевозок. Рассматриваются системы подвижного состава нового поколения – МЛТ в двух ва-

риантах исполнения. В первом варианте индукторы ЛАД образуют путевую структуру, во втором – они располагаются на скоростном транспортном экипаже. Анализ публикаций в области ВСНТ и МЛТ показал, что до тех пор, пока стоимость криогенных технологий и сверхпроводящих материалов не снизятся до приемлемых для промышленно развитых стран значений, наиболее перспективными будут системы высокоскоростного транспорта с тяговыми ЛАД. Это подтверждает и первая, до сих пор единственная коммерческая линия высокоскоростного МЛТ с линейными тяговыми двигателями, построенная в 2003 году специалистами ФРГ в Китайской Народной Республике. Значительных результатов в области МЛТ достигли ученые и инженеры в г. Санкт-Петербурге, где на базе ПГУПС в 2016 году создан инженерный кластер «Российский Маглев».

Преимущественно рассматриваются тяговые системы высокоскоростного МЛТ с ЛАД, конструкции которых разработаны в РГУПС. Если путевая структура ВСНТ выполнена в виде отдельных индукторов ЛАД, то нет необходимости подвода электроэнергии при помощи пантографа и контактного провода. Предусмотрено поочередное включение индукторов к источнику напряжения, что позволит повысить коэффициенты полезного действия и мощности и уменьшить влияние продольного краевого эффекта. Рассматриваются варианты различных конструктивных исполнений перегонов между двумя станциями. Предлагаются и разные конструкции вторичных элементов (ВЭ) ЛАД, размещаемых в днище экипажа, например, ВЭ может иметь короткозамкнутую обмотку с регулируемым сопротивлением.

При размещении индукторов ЛАД на экипажах МЛТ достигается значительная экономия дорогостоящих активных материалов, но усложняется система электроснабжения. В тяговых устройствах высокоскоростных экипажей могут использоваться ЛАД с продольным и поперечным магнитным потоком, причем последние способны обеспечивать скорости движения 350-500 км/ч при промышленной частоте тока и создавать значительные усилия магнитной левитации. В РГУПС для МЛТ разработаны ЛАД гибридного типа с продольно-поперечным магнитным потоком, способные дополнительно развивать усилия поперечной самостабилизации и улучшать боковую динамику скоростных экипажей, что повышает безопасность движения. Соискателем разработан новый тип ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростных поездов с магнитной подвеской и с улучшенной боковой динамикой, что достигается повышенными боковыми усилиями, достигаемыми за счет двойной поперечной самостабилизации.

Несмотря на безусловные преимущества систем ВСНТ с магнитной подвеской, еще длительное время основу высокоскоростного подвижного состава будут составлять поезда традиционного типа, имеющие значительные резервы для повышения скоростей движения. Для повышения скорости и безопасности движения необходимо совершенствовать тяговый привод и тормозную систему. Здесь свою роль могут сыграть индукторы ЛАД, дополняющие основные тягово-тормозные устройства скоростного поезда. Индукторы ЛАД при установке их на локомотивах и вагонах способны выполнять несколько функций: рабо-

тать в режимах тяговых машин, вихретоковых и электромагнитных рельсовых тормозов (ЭМРТ), догружающих устройств и стояночных тормозов. Новый ЭМРТ является многофункциональным и, взаимодействуя непосредственно с рельсом, может работать в качестве двигателя, вихретокового тормоза, а при экстренном торможении – в режиме электромагнитного рельсового тормоза.

В главе описаны разработанные классификации транспортных систем для высокоскоростного движения как рельсовых, так и с магнитной левитацией.

Во второй главе диссертации исследовано влияние распределения плотности тока индукторов тяговых ЛАД с продольным и поперечным магнитным потоком для высокоскоростного МЛТ путем разработки и анализа математических моделей. Схема расположения токовых зон индуктора ЛАД с продольным магнитным потоком представлена на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в срединной части индуктора его плотность тока имеет лишь одну составляющую, перпендикулярную направлению движения, а плотность тока в лобовых частях обмотки – две составляющие δ_{x2} и δ_{y2} . При составлении математических моделей учтена необходимость выполнения условия непрерывности линий тока. Y-составляющая плотности тока в лобовых частях изменяется синусоидально, а X-составляющая – по закону косинуса.

Представим δ_x в виде

$$\delta_x = (C_1 \cdot sh\alpha y + C_2 \cdot ch\alpha y) \cdot \cos(\alpha x - \omega t), \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{\tau}$; C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Y-составляющая плотности тока лобовых частей индуктора ЛАД получена в виде

$$\delta_y = (C_1 \cdot sh\alpha y + C_2 \cdot ch\alpha y + C_3) \cdot \sin(\alpha x - \omega t), \quad (2)$$

где C_3 – постоянная интегрирования.

Постоянные C_1, C_2 и C_3 определены из граничных условий, а значения δ_{x2} и δ_{y2} получены в виде

$$\delta_{x2} = -\frac{\delta_{1M} \cdot sh\alpha(y-b)}{ch\alpha(b_1-b)-1} \cos(\alpha x - \omega t); \quad (3)$$

$$\delta_{y2} = \frac{\delta_{1M} \cdot [ch\alpha(b_1-b) - sh\alpha(y-b)]}{ch\alpha(b_1-b)-1} \cdot \sin(\alpha x - \omega t) \quad (4)$$

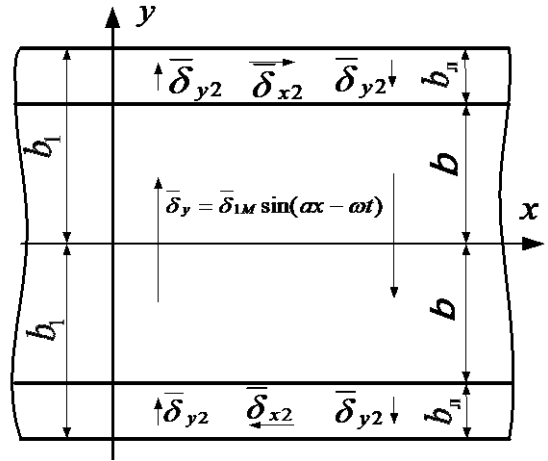


Рис. 1. Схема расположения токовых зон индуктора линейного асинхронного двигателя с продольным магнитным потоком: $2b$ – ширина средней части индуктора; $2b_1$ – общая ширина индуктора; $2b_l$ – ширина лобовой части обмотки

Соотношения (3) и (4) позволяют рассчитывать дополнительные тяговые усилия, создаваемые при участии токов в лобовых частях обмотки индуктора ЛАД с продольным магнитным потоком, что повышает точность расчета интегральных характеристик линейной машины.

Для высокоскоростного транспорта с магнитным подвесом более перспективны ЛАД с поперечным магнитным потоком. Схема расположения токовых зон двигателя показана на рис. 2. При математическом моделировании рассмотрен общий случай, при котором (рис. 2) $b_{1и} = b_{3и} - b_{2и}$. Наибольший интерес представляют значения плотностей тока в срединной и внешней зонах лобовых частей.

Для срединной части лобовых частей ЛАД с поперечным магнитным потоком плотность тока

$$\delta_{x_c} = -\frac{\delta_{1M} \cdot \text{sh}\alpha(y - b_{1и})}{\text{ch}\alpha b_u - 1} \cos(\alpha x - \omega t); \quad (5)$$

$$\delta_{y_2} = \frac{\delta_{1M} \cdot [\text{ch}\alpha b_{1и} - \text{sh}\alpha(b_{1и} - y)]}{\text{ch}\alpha b_{1и} - 1} \cdot \sin(\alpha x - \omega t). \quad (6)$$

Для внешней части лобовых вылетов выражения для расчета составляющих плотности тока индуктора получены в виде

$$\delta_{x_e} = -\frac{\delta_{1M} \cdot \text{sh}\alpha(y - b_{2и})}{\text{ch}\alpha(b_{3и} - b_{2и}) - 1} \cdot \cos(\alpha x - \omega t); \quad (7)$$

$$\delta_{y_e} = \frac{\delta_{1M} \cdot [\text{ch}\alpha(b_{3и} - b_{2и}) - \text{ch}\alpha(y - b_{2и})]}{\text{ch}\alpha(b_{3и} - b_{2и}) - 1} \cdot \sin(\alpha x - \omega t). \quad (8)$$

Математическая модель для плотности тока индуктора ЛАД с поперечным магнитным потоком составлена так, что, задавая размер индуктора, например, полюсное деление, можно получить обобщенную модель распределения плотности тока в лобовых частях и повысить точность расчета тягового усилия МЛТ.

Третья глава диссертации посвящена математическому моделированию токов во вторичном элементе ЛАД с продольным магнитным потоком для дополнительных тяговых устройств высокоскоростного МЛТ. С учетом продольной симметрии вторичный элемент представлен в виде двух зон (рис. 3).

Магнитная индукция в воздушном зазоре под индуктором представлена в виде $B_{z1} = -B_m \cos(\alpha x - \omega t)$, а в зоне 2:

$$B_{z1} = -B_m \cdot l \cdot \frac{b - y}{\Delta} \cdot \cos(\alpha x - \omega t),$$

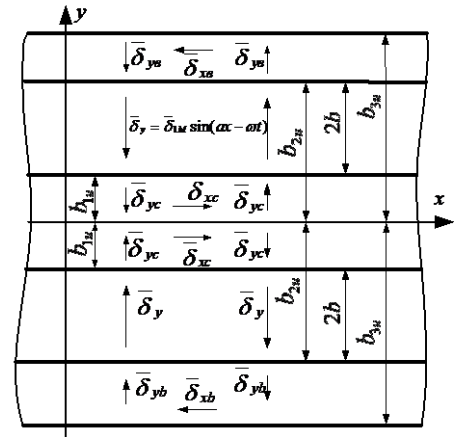


Рис. 2. Схема расположения токовых зон индуктора линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком:
 $2b$ – ширина рабочей зоны индуктора; $2b_{3и}$ – ширина индуктора;

где Δ – величина немагнитного зазора ЛАД. Математическая модель распределения плотности тока составлена в предположении, что магнитная индукция имеет только z -составляющую, на основании уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} \bar{\delta} = -\gamma \cdot \frac{\partial B}{\partial t}; \quad \operatorname{div} \bar{\delta} = 0. \quad (9)$$

где γ – электропроводность вторичного элемента.

Для области 1 после выполнения операций «rot» и «div» в осях двумерной системы координат получено

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta_{y1}}{\partial x} - \frac{\partial \delta_{x1}}{\partial y} &= -\gamma \cdot \omega \cdot B_M \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \frac{\partial \delta_{x1}}{\partial x} + \frac{\partial \delta_{y1}}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Преобразованные уравнения для области 1

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \delta_{x1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{x1}}{\partial y^2} &= 0; \\ \frac{\partial^2 \delta_{y1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{y1}}{\partial y^2} &= \alpha \cdot \omega \cdot \gamma \cdot B_M \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогично определены составляющие плотности тока для области 2 (рис. 3)

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \delta_{x2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{x2}}{\partial y^2} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\Delta} \cdot l^{\frac{b-y}{\Delta}} \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \frac{\partial^2 \delta_{y2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{y2}}{\partial y^2} &= \alpha \cdot \omega \cdot \gamma \cdot B_M \cdot l^{\frac{b-y}{\Delta}} \cdot \cos(\alpha x - \omega t). \end{aligned} \quad (12)$$

Решение уравнений (11) и (12) выполнено методом разделения переменных с учетом краевых условий, после чего получена система уравнений для плотности тока во вторичном элементе ЛАД, позволяющая учитывать взаимосвязи между геометрическими размерами линейной тяговой машины

$$\delta_{x1} = -\frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{1 - \alpha_2 \cdot \Delta_2} \cdot \left[\Delta \cdot \operatorname{sh} \alpha \cdot b + \frac{1}{\alpha} \cdot \operatorname{ch} \alpha \cdot b + \left(\Delta \cdot \operatorname{ch} \alpha \cdot b + \frac{1}{\alpha} \operatorname{sh} \alpha \cdot b \right) \cdot \operatorname{th} \alpha \cdot \beta \right] \cdot$$

$$\cdot \operatorname{sh} \alpha y \cdot \sin(\alpha x - \omega t);$$

$$\begin{aligned} \delta_{y1} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{1 - \alpha_2 \cdot \Delta_2} \cdot \left(\left[\Delta \cdot \operatorname{sh} \alpha \cdot b + \frac{1}{\alpha} \cdot \operatorname{ch} \alpha \cdot b + \left(\Delta \cdot \operatorname{ch} \alpha \cdot b + \frac{1}{\alpha} \operatorname{sh} \alpha \cdot b \right) \cdot \operatorname{th} \alpha \cdot \beta \right] \cdot \operatorname{ch} \alpha y - \right. \\ &\left. - \frac{1 - \alpha_2 \Delta_2}{\alpha} \right) \cdot \cos(\alpha x - \omega t); \end{aligned}$$

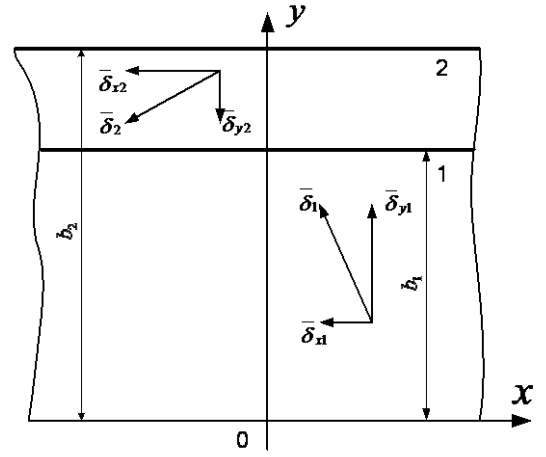


Рис. 3. Векторы плотностей токов во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с продольным потоком: b – полуширина индуктора; b_2 – полуширина вторичного элемента

$$\begin{aligned}\delta_{x2} &= -\frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{1 - \alpha_2 \cdot \Delta_2} \cdot \left[\left(\Delta \cdot ch\alpha \cdot b + \frac{1}{\alpha} sh\alpha \cdot b \right) \cdot \frac{ch\alpha(y + \beta)}{ch\alpha \cdot b} - \Delta \cdot l^{\frac{b-y}{\Delta}} \right] \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\ \delta_{y2} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{1 - \alpha_2 \cdot \Delta_2} \cdot \left[\left(\Delta \cdot ch\alpha \cdot b + \frac{1}{\alpha} sh\alpha \cdot b \right) \cdot \frac{sh\alpha(y + \beta)}{ch\alpha \cdot b} - \alpha \cdot \Delta_2 \cdot l^{\frac{b-y}{\Delta}} \right] \cdot \cos(\alpha x - \omega t).\end{aligned}\quad (13)$$

Математическая модель плотности тока учитывает распределение магнитной индукции в поперечном направлении за пределами индуктора и обеспечивает повышение точности при расчете тягового усилия ЛАД. Определены соотношения для расчета распределения линий тока во ВЭ, позволяющие уже на стадии проектирования выбирать рациональные размеры ЛАД для высокоскоростного МЛТ. Данная математическая модель позволяет оценить эффективность взаимодействия токов индуктора и вторичного элемента ЛАД с продольным магнитным потоком. В диссертации плотность тока выражена через первые производные напряженности магнитного поля во вторичном элементе, и ее составляющие представлены в комплексной форме

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{x1} &= j \cdot \frac{\gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot B_{1M}}{\lambda} \cdot \frac{ch\lambda \cdot (b_1 - b_2)}{ch\lambda b_2} \cdot sh\lambda \cdot y \cdot e^{-j\alpha \cdot x}; \\ \dot{\delta}_{y1} &= -\frac{\alpha \cdot \gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot B_{1M}}{\lambda} \cdot \left[\frac{ch\lambda \cdot (b_1 - b_2)}{ch\lambda \cdot b_2} \cdot sh\lambda \cdot y - 1 \right] \cdot e^{-j\alpha \cdot x}; \\ \dot{\delta}_{x2} &= j \cdot \frac{\gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot B_{1M}}{\lambda} \cdot \frac{sh\lambda \cdot b_1}{ch\lambda \cdot b_2} \cdot ch\lambda(y - b_2) \cdot e^{-j\alpha \cdot x}; \\ \dot{\delta}_{y2} &= -\frac{\alpha \cdot \gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot B_{1M}}{\lambda} \cdot \frac{sh\lambda \cdot b_1}{ch\lambda \cdot b_2} \cdot sh\lambda(y - b_2) \cdot e^{-j\alpha \cdot x},\end{aligned}\quad (14)$$

где γ_2 – электропроводность материала вторичного элемента;

s – скольжение;

$\lambda = \sqrt{\alpha^2(1 + j\xi)}$ – коэффициент;

$\xi = \frac{\mu_0 \gamma_2 s \omega}{\alpha^2}$ – величина, характеризующая степень нагрузки ЛАД.

Уравнения для плотности тока ВЭ выражены через ток индуктора

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{x1} &= \frac{\mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot \delta_{1M}}{\alpha \cdot \lambda} \cdot \frac{ch\lambda \cdot (b_1 - b_2)}{ch\lambda b_2} \cdot sh\lambda \cdot y \cdot e^{-j\alpha \cdot x}; \\ \dot{\delta}_{y1} &= j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot \delta_{1M}}{\lambda^2} \cdot \left[\frac{ch\lambda \cdot (b_1 - b_2)}{ch\lambda \cdot b_2} \cdot ch\lambda \cdot y - 1 \right] \cdot e^{-j\alpha \cdot x}; \\ \dot{\delta}_{x2} &= \frac{\mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot \delta_{1M}}{\alpha \cdot \lambda} \cdot \frac{sh\lambda \cdot b_1}{ch\lambda \cdot b_2} \cdot ch\lambda(y - b_2) \cdot e^{-j\alpha \cdot x}; \\ \dot{\delta}_{y2} &= j \cdot \frac{\mu_0 \cdot \gamma_2 \cdot S \cdot \omega \cdot \delta_{1M}}{\lambda^2} \cdot \frac{sh\lambda \cdot b_1}{ch\lambda \cdot b_2} \cdot sh\lambda(y - b_2) \cdot e^{-j\alpha \cdot x}.\end{aligned}\quad (15)$$

Анализ уравнений (15) показал, что имеет место сдвиг по фазе между токами индуктора и вторичного элемента, изменяющийся в функции координат x и y . Некоторые результаты расчетов, выполненных в диссертации, представлены в виде векторной диаграммы (рис. 4) для магнитного числа Рейнольдса $\varepsilon = 1$.

Видно, что фазовый сдвиг между плотностями тока в индукторе и ВЭ увеличивается при уменьшении полюсного деления или увеличении ширины индуктора при неизменном полюсном делении ЛАД.

На основе выведенных в диссертации формул после ряда преобразований и упрощений получено соотношение для расчета коэффициента ослабления электромагнитной силы за счет поперечного сжатия линий тока во вторичном элементе

$$K_{oc} = 1 - \frac{ch\alpha(b_1 - b_2) \cdot sh\lambda \cdot b}{\alpha \cdot b_1 \cdot ch\alpha \cdot b_2}. \quad (16)$$

Результаты расчета коэффициента ослабления тягового усилия ЛАД при различном отношении полуширины индуктора к полюсному делению двигателя в функции b_2/b при $\varepsilon = 0$ представлены на рис. 5.

Из кривых (рис. 5) следует, что коэффициент K_{oc} увеличивается при уменьшении полюсного деления и снижается при увеличении отношения b_2/b .

В четвертой главе выполнено математическое моделирование плотности тока во вторичном элементе тягового ЛАД с поперечным магнитным потоком (ЛАДПП) с учетом поперечного краевого эффекта. Схема относительного расположения индуктора и вторичного элемента ЛАДПП показана на рис. 6.

На основании уравнений Максвелла с учетом двумерного распределения токов во вторичном элементе ЛАДПП после преобразований дифференциальные уравнения для плотностей тока в областях 1-3, получены в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \delta_{x1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{x1}}{\partial y^2} &= 0; & \frac{\partial^2 \delta_{y1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{y1}}{\partial y^2} &= 0; & \frac{\partial^2 \delta_{x2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{x2}}{\partial y^2} &= 0; \\ \frac{\partial^2 \delta_{y2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{y2}}{\partial y^2} &= \alpha \cdot \omega \cdot \gamma \cdot B_M \cdot \cos(\alpha x - \omega t); \\ \frac{\partial^2 \delta_{x3}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{x3}}{\partial y^2} &= 0; & \frac{\partial^2 \delta_{y3}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta_{y3}}{\partial y^2} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

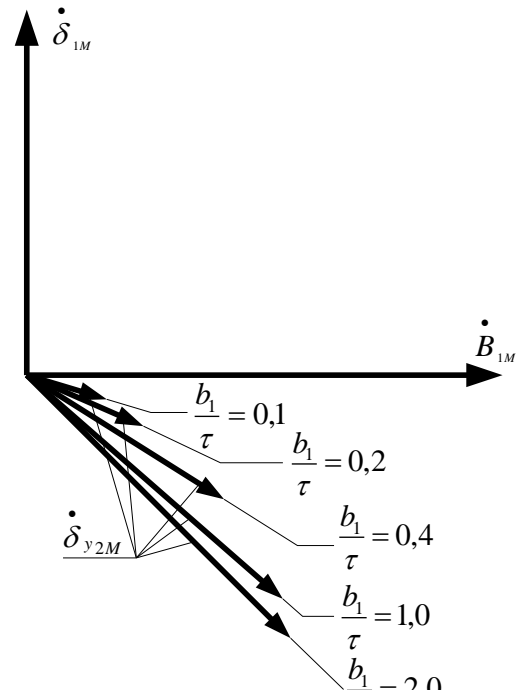


Рис. 4. Векторные диаграммы плотностей тока вторичного элемента и индуктора ЛАД при $\varepsilon = 1,0$

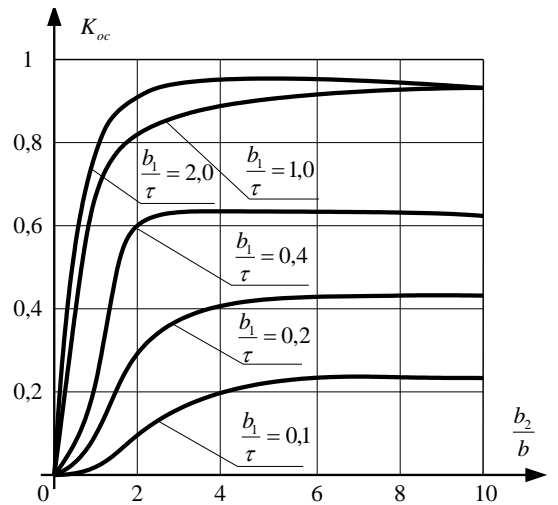


Рис. 5. Коэффициент ослабления электромагнитной силы ЛАД при $\varepsilon = 0$

Решения уравнений (17) в общем виде представлены для областей 1-3 вторичного элемента следующим образом

$$\begin{aligned}
 \delta_{x1} &= A_1 \cdot ch \alpha \cdot y \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\
 \delta_{y1} &= A_2 \cdot sh \alpha \cdot y \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\
 \delta_{x2} &= A_3 \cdot sh \alpha (\beta_1 - y) \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\
 \delta_{y2} &= \left[A_4 \cdot ch \alpha (\beta_1 - y) - \frac{\omega \cdot \alpha \cdot B_M}{\alpha} \right] \cdot \cos(\alpha x - \omega t); \\
 \delta_{y1} &= A_5 \cdot ch \alpha (\beta_3 - y) \cdot \sin(\alpha x - \omega t); \\
 \delta_{x2} &= A_6 \cdot sh \alpha (\beta_3 - y) \cdot \cos(\alpha x - \omega t),
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

где A_1 - A_6 – постоянные интегрирования;

β_1 – величина, определяющая координату y , при которой плотность тока ВЭ в направлении оси « x » равны нулю.

После определения постоянных интегрирования из граничных условий уравнения (18) принимают вид

$$\begin{aligned}
 \delta_{x1} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\alpha} \cdot \frac{sh \alpha \cdot (\beta_1 - b_1)}{ch \alpha \cdot b_1} ch \alpha \cdot y \cdot \sin(\alpha t - \omega t); \\
 \delta_{y1} &= -\frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\alpha} \cdot \frac{sh \alpha \cdot (\beta_1 - b_1)}{ch \alpha \cdot b_1} sh \alpha \cdot y \cdot \cos(\alpha t - \omega t); \\
 \delta_{x2} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\alpha} \cdot \frac{ch \alpha \cdot b_1}{ch \alpha \cdot \beta_1} sh \alpha \cdot (\beta_1 - y) \cdot \sin(\alpha t - \omega t); \\
 \delta_{y2} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\alpha} \cdot \left[\frac{ch \alpha \cdot b_1}{ch \alpha \cdot \beta_1} cha(\beta_1 - y) - 1 \right] \cos(\alpha t - \omega t); \\
 \delta_{x3} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\alpha} \cdot \frac{sh \alpha \cdot (\beta_1 - b_2)}{ch \alpha \cdot (b_3 - \beta_1)} \cdot ch \alpha \cdot (b_3 - y) \cdot \sin(\alpha t - \omega t); \\
 \delta_{y3} &= \frac{\omega \cdot \gamma \cdot B_M}{\alpha} \cdot \frac{sh \alpha \cdot (\beta_1 - b_2)}{ch \alpha \cdot (b_3 - \beta_1)} \cdot sh \alpha \cdot (b_3 - y) \cdot \cos(\alpha t - \omega t).
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Получены уравнения, описывающие распределение магнитной индукции ЛАДПП с учетом поперечного краевого эффекта с целью оценки его влияния на точки вторичного элемента. Исследовано взаимодействие токов индуктора и вторичного элемента ЛАДПП при учете их сдвига по фазе. Расчеты выполнены в комплексной форме и учитывают поперечную симметрию двигателя и граничные условия. Получено и соотношение для расчета коэффициента ослабления электромагнитной (тяговой) силы взаимодействия индуктора и ВЭ линейного двигателя с поперечным магнитным потоком, учитывающее действие поперечного краевого эффекта

$$K_{oc} = \operatorname{Re} \left(\frac{\alpha^2}{\lambda^2} \right) - \operatorname{Re} \left[\frac{-ch \lambda \cdot b_1 \cdot ch \lambda \cdot (b_3 - b_2) + ch \lambda \cdot b_1 \cdot ch \lambda \cdot (b_3 - b_1) + ch \lambda \cdot (b_3 - b_2) \cdot (ch \lambda \cdot b_2 - ch \lambda \cdot b_1)}{\frac{\lambda}{\alpha^2} \cdot 2b \cdot sh \lambda \cdot b_3} \right]. \tag{20}$$

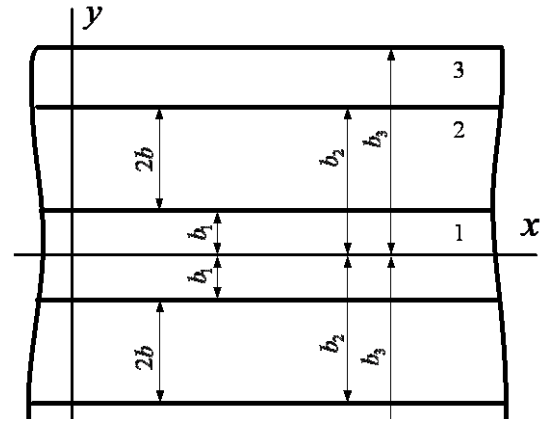


Рис. 6. Схема относительного расположения индуктора и вторичного элемента ЛАДПП

Приводится оценка влияния срединного эффекта в ЛАДПП, физический смысл которого состоит во взаимодействии токов ВЭ в области 1 (рис. 6) с магнитным полем лобовых частей обмотки индуктора. Срединный эффект проявляется в увеличении тягового усилия двигателя. Определены соотношения для расчета дополнительного тягового усилия ЛАДПП, обусловленного действием срединного эффекта и его влияния на коэффициент ослабления электромагнитной силы (рис. 7). Результаты данного исследования обеспечивают повышение точности расчета тяговых усилий ЛАДПП для магнитолевитационного транспорта.

Пятая глава диссертации посвящена вопросам определения рациональных и оптимальных соотношений в тяговых ЛАД для высокоскоростного МЛТ. Наибольшая эффективность взаимодействия индуктора и вторичного элемента ЛАД достигается при симметричном их расположении. С целью оценки эффективности работы ЛАД решена задача определения точки перегиба линий тока ВЭ и еще одной оси, проходящей через эту точку, и на которой x -составляющая плотности тока вторичного элемента изменяет свой знак. Y -координата этой оси определена в четвертой главе в виде

$$\beta_1 = \frac{1}{\alpha} \cdot \operatorname{arth} \left[\operatorname{cth} \alpha \cdot b_3 - \frac{\operatorname{ch} \alpha \cdot (b_3 - b_2)}{\operatorname{ch} \alpha \cdot b_1 \cdot \operatorname{sh} \alpha \cdot b_3} \right]. \quad (21)$$

Анализ изменения положения точки перегиба линий тока ВЭ выполнен при помощи конкретных числовых примеров при различных соотношениях геометрических размеров и полюсного деления. На рис. 8 приведен рельеф функции $\Delta\beta_1 = f\left(\frac{b}{b_2}; \frac{b_3}{\tau}\right)$.

Установлено, что с увеличением полюсного деления ЛАДПП относительное смещение оси токов его вторичного элемента уменьшается. Определено, что $\Delta\beta_1$ уменьшается при увеличении активной части индуктора. Полученные соотношения позволяют осуществить рациональный выбор размеров ЛАДПП на стадии проектирова-

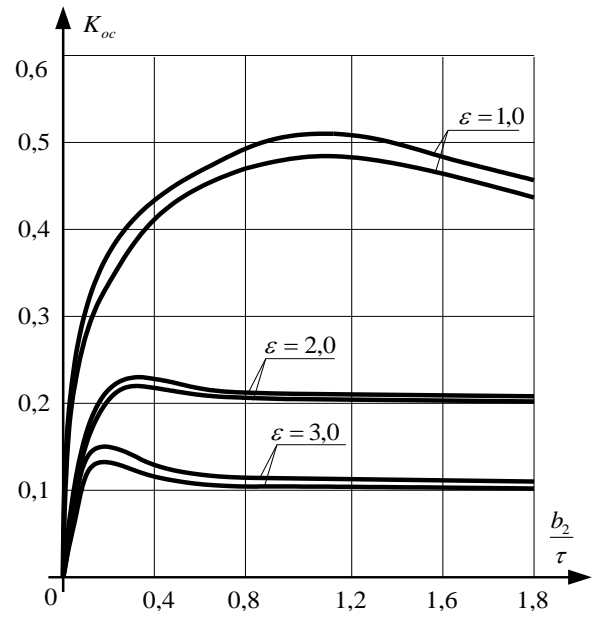


Рис. 7. Коэффициент ослабления электромагнитной силы ЛАДПП

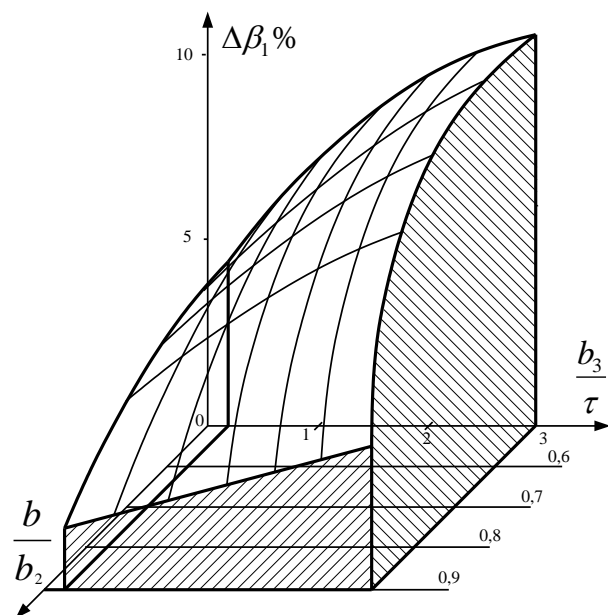


Рис. 8. Смещение оси токов во вторичном элементе ЛАДПП при смещении оси индуктора на 10 %

ния тяговых машин для магнитолевитационного транспорта. Наибольшее значение во взаимодействии с индуктором имеет y -составляющая плотности тока ВЭ, среднее значение которой для области 2 получено в виде

$$\delta_{y_{2CP}} = K \cdot \left[\frac{sh\alpha \cdot b}{\alpha \cdot b} \cdot \frac{ch\alpha \cdot b_1 \cdot sh\alpha(b_3 - b - b_1) + ch\alpha(b_3 - b_2) \cdot sh\alpha(b_1 + b)}{sh\alpha \cdot b_3} - 1 \right], \quad (21)$$

где K – константа.

Исследование на экстремум выполнено для выражения

$$Z_1 = ch\alpha \cdot b_1 \cdot sh\alpha(b_3 - b - b_1) + ch\alpha(b_3 - b_2) \cdot sh\alpha(b_1 + b). \quad (22)$$

В результате определено максимальное значение средней плотности тока индуктора ЛАДПП

$$\delta_{y_{2CP\text{МАКС}}} = K \cdot \left[\frac{sh\alpha \cdot b}{\alpha \cdot b} \cdot \left(ch\alpha \cdot b - sh\alpha \cdot b \cdot th\alpha \cdot \frac{b_3}{2} \right) - 1 \right]. \quad (23)$$

Для исследования окрестностей экстремума средней плотности тока ВЭ тягового ЛАД для МЛТ предполагалось, что при отклонении от оптимального варианта поперечный размер b_1 линейного двигателя получает приращение $\pm \Delta b_1$. Максимальное значение средней плотности тока ВЭ при этом получает приращение $\pm \Delta \delta_{y_{2CP\text{МАКС}}}$, которое в диссертации на основе соотношения (23) получено в следующем виде

$$\pm \Delta \delta_{y_{2CP}} = \frac{sh\alpha \cdot b}{\alpha \cdot b} \cdot \frac{sh\alpha \cdot \frac{b_3}{2} \cdot sh\alpha\left(\frac{b_3}{2} - b + b_1\right) \cdot sh\alpha \cdot \Delta b}{sh\alpha \cdot b_3} \cdot 2K. \quad (24)$$

Для проектирования и оценки эффективности эксплуатации перспективного высокоскоростного МЛТ большой интерес представляет относительное приращение средней амплитуды плотности тока во вторичном элементе

$$\frac{\Delta \delta_{y_{2CP\text{МАКС}}}}{\delta_{y_{2CP\text{МАКС}}}} = \frac{sh\alpha \cdot b \cdot sh\alpha\left(\frac{b_3}{2} - b + \Delta b\right) \cdot sh\alpha \cdot \Delta b}{sh\alpha \cdot b \cdot ch\alpha\left(\frac{b_3}{2} - b\right) - \alpha \cdot b \cdot ch\alpha \cdot \frac{b_3}{2}}. \quad (25)$$

Из (25) видно, что относительное приращение плотности вторичного тока не зависит от знака приращения Δb . Расчеты показали, что приращение среднего значения максимальной плотности тока ВЭ всегда будет отрицательным, что полностью согласуется с физическими процессами в ЛАД. Исследование окрестностей экстремума (максимума) плотности вторичного тока показали, что он занимает очень узкую область и имеет резко выраженный пик. Это свидетельствует о том, что даже незначительное отклонение от оптимума приведет к существенному снижению плотности тока ВЭ и тягового усилия. Видно, что это особенно резко проявляется при малых значениях полюсных делений ЛАД (рис. 9).

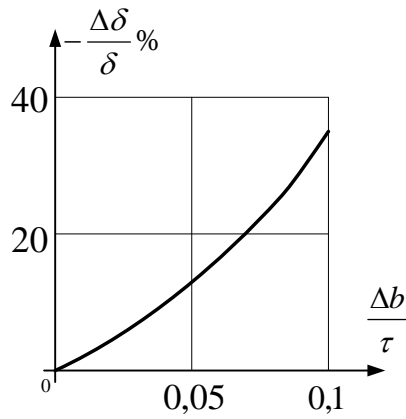


Рис. 9. Окрестности максимума усредненной амплитуды поперечной плотности тока активной зоны вторичного элемента ЛАДПП при смещении индуктора в поперечном направлении для $\frac{b_3}{\tau} = 1$

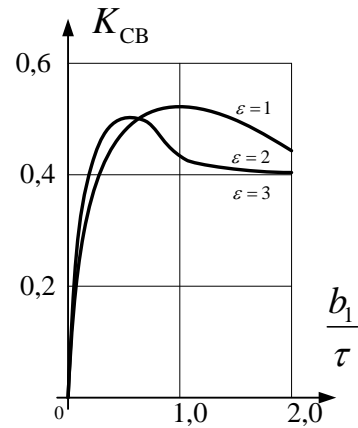


Рис. 10. Коэффициент силового электромагнитного взаимодействия ЛАДПП при $\frac{b_2}{b_1} = 1,6$

Рассмотрен вопрос об оптимизации силового взаимодействия индуктора и вторичного элемента тягового ЛАД и сформулирована вариационная задача. Найдено решение задачи оптимизации силового взаимодействия на основе исследований, изложенных в третьей и четвертой главах работы. Выполненные числовые расчеты свидетельствуют о наличии экстремумов у зависимостей коэффициентов силового взаимодействия тяговых линейных асинхронных двигателей. Для ЛАДПП эти зависимости показаны на рис. 10.

Определены зоны наиболее рационального использования ЛАДПП в тяговом приводе высокоскоростного МЛТ при различных соотношениях магнитного числа Рейнольдса и геометрических размеров линейного двигателя.

Шестая глава содержит результаты исследований регулируемых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного МЛТ, основной особенностью которых является наличие короткозамкнутых обмоток вторичных элементов с изменяемыми сопротивлениями. На основе схемы замещения короткозамкнутой обмотки получены соотношения для расчета ее параметров при регулировании. В этих ЛАД важен учет вытеснения тока в пазу ВЭ в режимах трогания экипажа МЛТ с места и его торможения.

Картина замыкания проводников в пазу вторичного элемента регулируемого ЛАД при движении замыкающего элемента снизу вверх показана на рис. 11. Для анализа приняты допущения о плоскопараллельном характере магнитного поля в пазу и о бесконечно малой толщине изоляции проводников стержня ВЭ.

При этих условиях уравнение напряженности магнитного поля имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial y^2} = j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \dot{H}. \quad (26)$$

При его решении постоянные интегрирования определены на основании закона полного тока и напряженность магнитного поля

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{shp \cdot y}{shp \cdot y \cdot h_n}, \quad (27)$$

где I – ток в пазу ВЭ;

$$p = \sqrt{j\omega\gamma\mu_0}.$$

После преобразований получены соотношения для расчета коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений проводников обмотки вторичного элемента, частично закороченных замыкающим элементом

$$\varphi(\xi) = \alpha\xi \frac{sh2\alpha\xi + \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi};$$

$$\lambda(\xi) = \frac{3}{2\alpha \cdot \xi} \cdot \frac{sh2\alpha\xi - \sin 2\alpha\xi}{ch2\alpha\xi - \cos 2\alpha\xi}, \quad (28)$$

где ξ – относительная глубина проникновения тока в паз.

Выполнены расчеты для оценки влияния вытеснения тока на величину коэффициентов $\varphi(\xi)$ и $\lambda(\xi)$, результаты которых представлены на рис. 12 и 13.

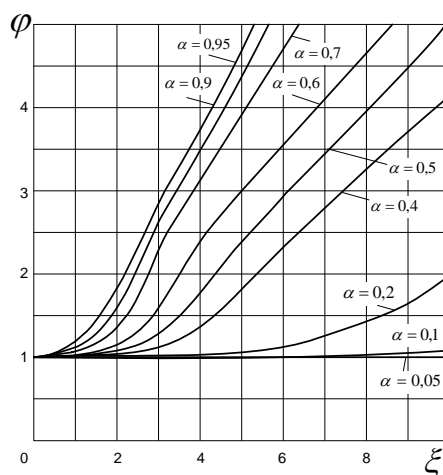


Рис. 12. Коэффициенты увеличения активного сопротивления $\varphi(\xi)$ короткозамкнутой обмотки ВЭ

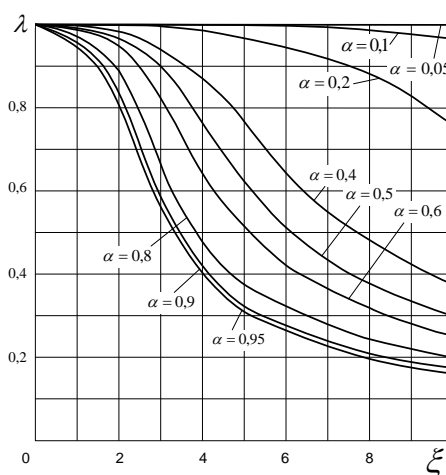


Рис. 13. Коэффициенты уменьшения индуктивного сопротивления $\lambda(\xi)$ короткозамкнутой обмотки ВЭ

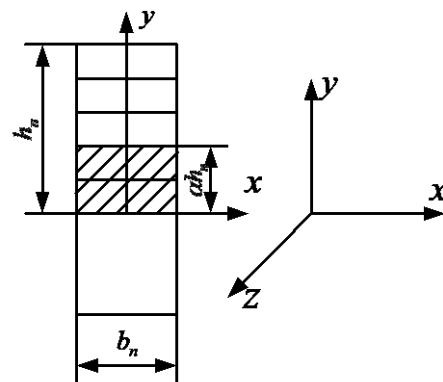
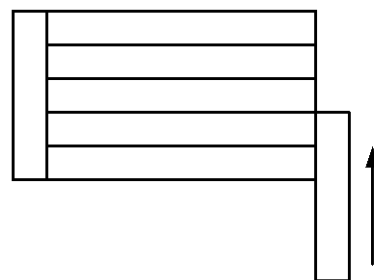


Рис. 11. Закорачивание проводников в пазу при движении замыкающего элемента снизу вверх: а – фрагмент обмотки; б – паз; 1 – проводники стержня; 2 – шина; 3 – замыкающий элемент

Если проводники стержня частично закорачиваются замыкающим элементом сверху вниз, то напряженность магнитного поля в пазу определяется соотношением

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{b_n} \cdot \frac{2shpy + e^{-py}(1 - e^{2ph_n})}{2shp(1 - \alpha)h_n + e^{-p(1-\alpha)h_n}(1 - e^{2ph_n})}. \quad (29)$$

Полученные аналитическим путем выражения для определения коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений проводников стержня вторичного элемента регулируемого ЛАД при перемещении замыкающего элемента сверху вниз при учете влияния вытеснения тока имеют громоздкий вид и полностью приводятся в приложении к диссертации.

Сформулированы и решены более общие краевые задачи учета вытеснения тока в пазу ВЭ регулируемого ЛАД на величины активного и индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки при изменении числа замкнутых проводников не только по высоте, но и по ширине паза.

Расчетная модель паза при двухкоординатном перемещении замыкающего элемента снизу вверх и слева направо изображена на рис. 14.

Напряженность магнитного поля в пазу в этом случае определяется соотношением

$$\dot{H} = \frac{\dot{I}}{\beta h_n} \cdot \frac{shpy}{shp\alpha h_n}, \quad (30)$$

а напряженность электрического поля

$$\dot{E} = -\frac{\dot{I}}{\gamma\beta h_n} \cdot \frac{pchpy}{shp\alpha h_n}, \quad (31)$$

Сформулирована и решена краевая задача расчета магнитного поля в пазу ЛАД при учете влияния вытеснения тока при произвольном по высоте и ширине паза расположении в нем проводника с током.

Выполненные теоретические и расчетные исследования показали, что эффект вытеснения тока в пазу регулируемого ЛАД проявляется особенно резко при замыкании половины и более проводников в каждом пазу. Это приводит к существенному увеличению активного и уменьшению индуктивного сопротивления обмотки вторичного элемента, что необходимо учитывать при расчете тягового усилия при трогании с места и торможении высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

В седьмой главе исследованы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного МЛТ, рассмотрен ряд конструктивных схем машин этого типа, разработанных в РГУПС. Ряд ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком способны создавать помимо тяговых и подъемных усилий усилия поперечной самостабилизации за счет использования принципа встречно бегущих магнитных полей, например, двигатель, показанный на рис. 15.

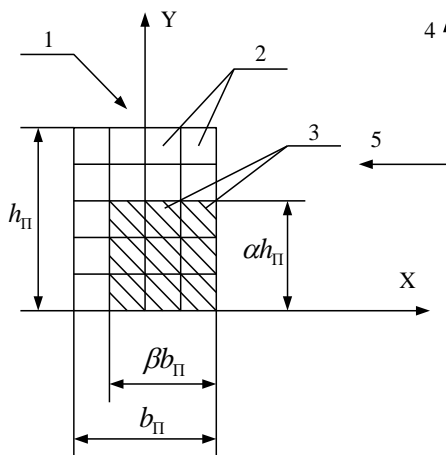


Рис. 14. Паз вторичного элемента при перемещении замыкающего элемента снизу вверх и слева направо: h_n – высота паза; b_n – ширина паза

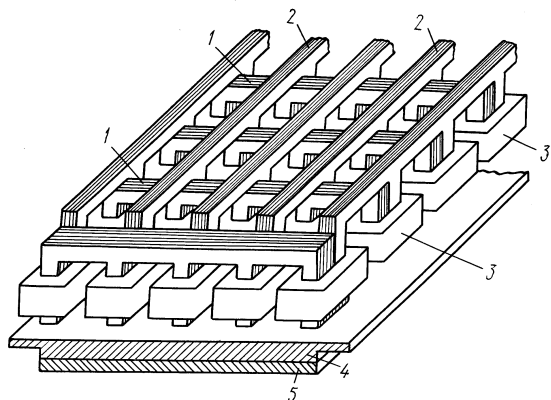


Рис. 15. Линейный асинхронный двигатель с продольно-поперечным магнитным потоком:

1 – поперечно шихтованный сердечник; 2 – продольно шихтованный сердечник; 3 – обмотка; 4 – электропроводящая полоса;

Принцип действия данного ЛАД описан в диссертации. Для электромагнитного расчета ЛАД и его интегральных характеристик созданы математические модели, определяющие распределение МДС в воздушном зазоре. Распределение МДС линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком в направлении движения и поперек его, представлены на рис. 16 и 17.

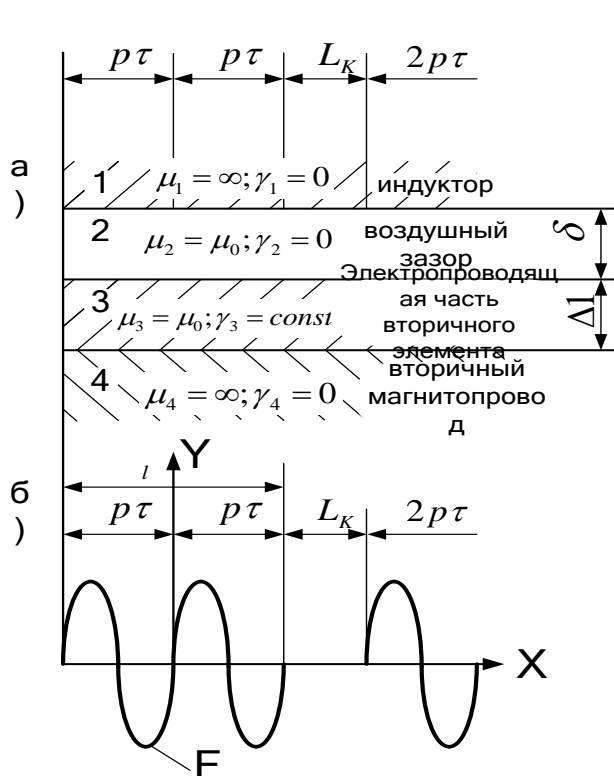


Рис. 16.

Расчетная модель и распределение МДС линейного двигателя в продольном направлении: а) основные зоны машины:

1 – индуктор; 2 – воздушный зазор; 3 – электропроводящая часть вторичного элемента; 4 – вторичный магнитопровод; б) распределение МДС в направлении движения

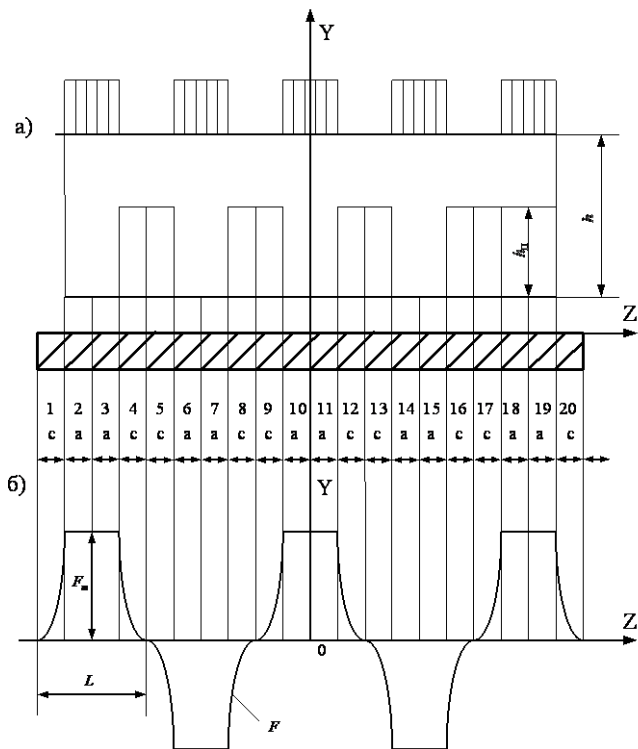


Рис. 17.

Расчетная модель и распределение МДС линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком в поперечном направлении: а) поперечное сечение ЛАД; б) распределение МДС

Учитывая периодичность и характер изменения МДС в продольном и поперечном направлениях (рис. 16 и 17) после преобразований получено общее выражение магнитодвижущей силы ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком в виде двойного ряда Фурье

$$F(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi 2l} \sum_n \sum_v n_{\pi} \cos\left(\pi n \frac{z}{L_1}\right) \cdot v \cdot l^j \left(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l}\right), \quad (32)$$

где n – порядок гармоники по оси z ;

v – порядок гармоники по оси x ;

n_{π} – коэффициент, учитывающий распределение МДС в зоне лобовых частей обмотки;

F_m – амплитуда первой гармоники МДС.

Представление МДС линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком в виде двойных рядов Фурье возможно для ЛАД с любой конструкцией индуктора и с любым числом полюсов. Для определения интегральных характеристики ЛАД определены составляющие векторного магнитного потенциала по осям x и z путем аналитического решения квазитрехмерной полевой задачи. Полученные соотношения и применение теоремы Умова-Пойнтинга позволили получить формулы для расчета усилий тяги и магнитного подвеса и интегральных характеристик машины данного типа.

Интегральные характеристики ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком определены и на основе схемы замещения, для которой в диссертации разработаны соотношения для расчета ее параметров с учетом особенности конструкции тягового двигателя. На основе схемы замещения разработана инженерная методика расчета ЛАД для МЛТ. Сопоставление результатов расчетов тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, выполненных на основе квазитрехмерной теории, по инженерной методике и данных эксперимента показало хорошее их (в пределах 5 %) совпадение.

Приведена оценка эффективности применения тяговых и тормозных устройств на основе ЛАД и многофункционального ЭМРТ, разработанных в диссертации, при использовании их на высокоскоростном рельсовом подвижном составе. Так, при использовании устройств в качестве электромагнитных рельсовых тормозов время экстренного торможения поезда, состоящего из десяти вагонов и имеющего массу 1500 тонн, при движении со скоростью 200 км/ч составляет 6 минут, что почти в два раза меньше времени торможения при помощи только колодочных пневмотормозов.

Восьмая глава содержит результаты математического моделирования динамических усилий поперечной самостабилизации ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта. Создание усилий поперечной самостабилизации достигается соединением фаз обмотки индуктора ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком в соответствии со схемой, приведенной на рис. 18.

Для определения усилий динамической поперечной самостабилизации рассмотрено распределение МДС одного элементарного ЛАД (рис. 18) в функции времени и координат x и z

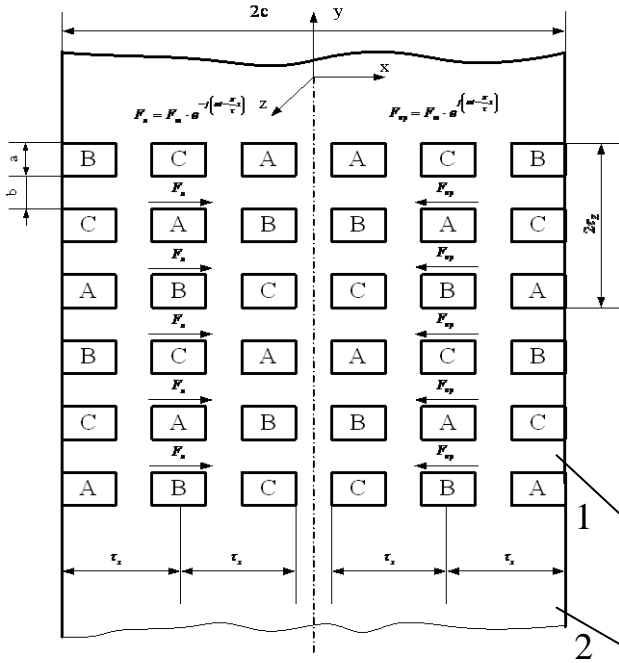


Рис. 18. Распределение катушек индуктора тягового ЛАД по фазам и МДС обмоток в поперечном направлении:

- 1 – сердечник с обмоткой;
- 2 – электропроводящий, массивный вторичный элемент (рельс)

F_l и F_{np} – встречно бегущие МДС левой и правой частей индуктора ЛАД;

τ_x – величина полюсного деления по оси x

$$F_{np}(x, z, t) = \begin{cases} F_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \\ \text{при: } -p\tau \leq x \leq p\tau; -\frac{a}{2} \leq z \leq \frac{a}{2}; \\ F_m \left[1 - \frac{\pi(z - a/2)}{b} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}; \\ \text{при: } -p\tau \leq x \leq p\tau; -\frac{a}{2} \leq z \leq \frac{a}{2} + \frac{b}{2}; \\ F_m \left[1 - \frac{\pi(z + a/2)}{b} \right] e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)}. \end{cases} \quad (33)$$

Окончательно МДС представлена в виде двойного ряда Фурье

$$F_{np}(x, z, t) = \frac{8\tau F_m}{\pi 2l} \sum_n \sum_v n_{nl} \cos\left(\frac{\pi n Z}{L_1}\right) \cdot v_{\kappa} \cdot e^{j(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l})}, \quad (34)$$

где l – период изменения МДС в продольном направлении;

L – полупериод изменения МДС в поперечном направлении.

Усилие боковой поперечной самостабилизации ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком после преобразований получено в виде

$$F_{xnp} = \frac{32\mu_0 \tau^2 l l F_m^2}{\pi^3} \cdot \sum_n \sum_v (n_{nl})^2 v \lambda (v_{\kappa})^2 \cdot \frac{J_m \frac{\xi}{\lambda} \cdot th\left(\frac{\Delta_1 \xi}{2}\right)}{\left| sh\lambda \delta + \frac{\xi}{\lambda} \cdot th\left(\frac{\Delta_1 \xi}{2}\right) \cdot ch\lambda \delta \right|}. \quad (35)$$

При симметричном расположении высокоскоростного экипажа МЛТ относительно индуктора (рис. 18) $F_{xnp} = F_{xnl}$ боковые усилия взаимно компенсируются и не оказывают влияния на движение поезда на магнитной подвеске.

Если под действием возмущающих воздействий (например, сильного бокового ветра) экипаж сместится слева направо (рис. 19), то равновесие боковых сил нарушится и под действием разности этих положений. Усилия, действующие на экипаж справа налево, создаются при взаимодействии эллиптических магнитных полей с токами, ими наведенными, во вторичном элементе. Эллиптическое поле представлено в виде двух встречно бегущих: прямо- и обратно бегущего магнитных полей.

Определим динамические усилия, действующие в поперечном направлении для случая (рис. 19). В диссертации установлено, что боковое усилие, действующее слева направо, на 25% меньше усилия, действующего навстречу ему. Величина бокового динамического усилия самостабилизации составит 25 % от усилий, которые равны друг другу при симметричном положении экипажа (рис. 18).

Усилия боковой поперечной самостабилизации определены и при помощи периодически чередующихся вдоль и поперек движения экипажа токовых контуров индуктора и векторного магнитного потенциала для ВЭ, имеющего конечную ширину $2c$ (рис. 20).

Прямоугольные токовые контуры соответствуют явно выраженным полюсам индуктора, по катушкам которых протекают трехфазные синусоидальные токи. Усилие при поперечном боковом смещении определено на основании двумерной расчетной модели (рис. 20). Решение полевой задачи выполнено в предположении бесконечной длины индуктора и ВЭ в направлении движения и поверхностном растекании тока на полюсах индуктора ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. При смещении вторичного элемента в поперечном направлении на величину ξ (рис. 20) создается динамическая сила F_y бокового смещения.

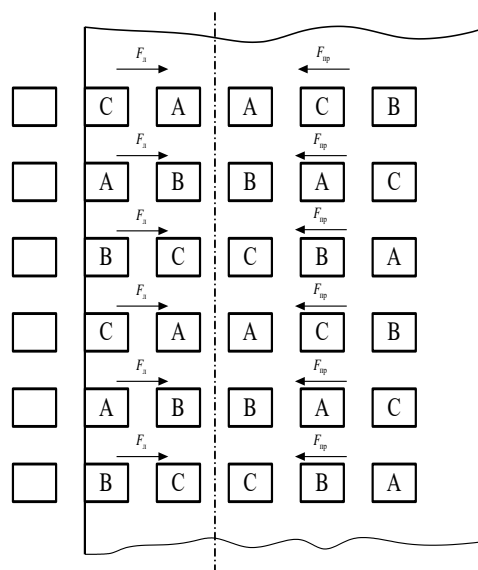


Рис. 19. Смещение вторичного элемента тягового ЛАД при боковом воздействии вправо на одно зубцовое деление

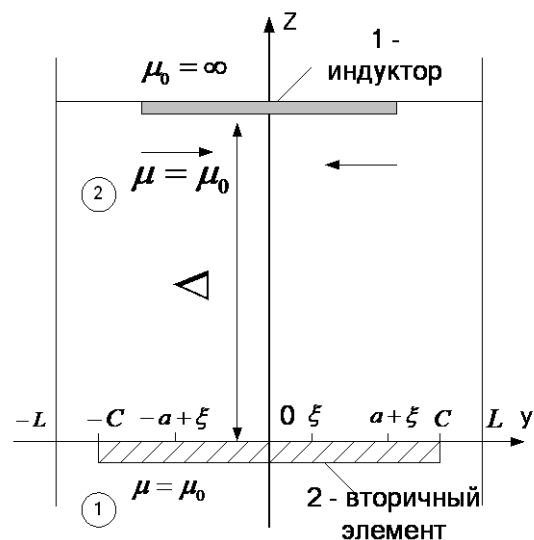


Рис. 20. К формулированию полевой задачи для расчета силы бокового смещения (самостабилизации): стрелки обозначают направление встречно бегущих магнитных полей

Токовый слой на поверхности индуктора, протекающий в плоскости $z = \Delta$ и направленный в сторону движения экипажа по оси x , представлен в виде

$$\delta = \begin{cases} 0; y \in [-L, -a + \xi) \cup (a + \xi, L]; \\ \delta_0 \cdot e^{j(\omega t - \alpha y)}; y \in [-a + \xi, \xi]; \\ \delta_0 \cdot e^{j(\omega t + \alpha y)}; y \in [\xi, a + \xi]. \end{cases} \quad (36)$$

Двумерная полевая задача решена при помощи векторного магнитного потенциала, связанного с электромагнитным полем соотношениями

$$\dot{E} = -\frac{\partial \dot{A}}{\partial t}; \quad \dot{H}_y = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \dot{A}}{\partial y}; \quad \dot{H}_z = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial \dot{A}}{\partial z}. \quad (37)$$

При плотности тока (36) векторный магнитный потенциал представлен

$$A(y, z, t) = A_0(y, z)e^{j\omega t}. \quad (38)$$

Путем преобразований получены уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 A_{1,2}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{1,2}}{\partial x^2} = 0. \quad (39)$$

Решение уравнений (39) получено в виде

$$A_1(y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^* e^{j|v_m|z} \cdot e^{j|v_m|y};$$

$$A_2(y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(A_{1m}^2 ch v_m z + A_{2m}^2 sh v_m z \right) e^{j|v_m|y}, \quad (40)$$

где \dot{A} – коэффициент Фурье для векторного магнитного потенциала;

$$v_m = \frac{m \cdot \Delta}{L}; \quad m = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3; \dots$$

Выполнив последовательно ряд математических преобразований, окончательно получим соотношение для расчета усилия поперечной стабилизации

$$F_y = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \delta_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} (\dot{A}_{1m} sh \vartheta_m \Delta + \dot{A}_{2m} ch \vartheta_m \Delta) \cdot \vartheta_m \cdot \lambda_m \right\}. \quad (41)$$

В диссертации определены соотношения для расчета бокового усилия поперечной самостабилизации ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. На основе полученного алгоритма разработана программа расчета усилий боковой стабилизации. Данные расчета отличаются от экспериментальных значений менее чем на 10 %.

В девятой главе диссертации описаны лабораторные модели и макетные образцы индукторов тяговых ЛАД, изготовленных с целью проверки их работоспособности и сравнения опытных и расчетных данных.

На действующей лабораторной модели ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком мощностью 500 Вт измерено пусковое тяговое усилие при использовании в качестве вторичного элемента пластины толщиной 5 мм

из сплава алюминия, которое составило 27 Н. При боковом смещении вторичный элемент, подвешенный в магнитном поле, сам возвращался в исходное положение.

Макетный действующий образец ЛАД мощностью 1 кВт, предназначенный для использования в качестве модели дополнительного тягового и тормозного устройства на высокоскоростном подвижном составе, показан на рис. 21.

Данный ЛАД изготовлен для выполнения экспериментальных исследований в лабораториях РГУПС.

По проекту автора изготовлен макетный образец многофункционального ЛАД мощностью 12,5 кВт, способного работать в режиме тягового двигателя, вихревого и электромагнитного рельсового тормозов, изображен на рис. 22.

Выполнены исследования нагревания элементов тягового линейного асинхронного двигателя в режиме короткого замыкания при заторможенном вторичном элементе. Температура вторичного элемента измерялась при помощи хромель-копелевых термопар. Этот режим является самым напряженным в тепловом отношении, т.к. неподвижный ВЭ пересекается бегущим магнитным полем с наиболее высокой частотой. За 30 минут вторичный элемент из сплава алюминия нагрелся до 132 °С, стальной – до 185 °С, а комбинированный – до 236 °С.



Рис. 21.

Макетный образец ЛАД для МЛТ и дополнительных тяговых и тормозных устройств для высокоскоростных поездов



Рис. 22.

Действующий лабораторный макет ЛАД для высокоскоростных поездов

Описана экспериментальная установка для исследования параметров и характеристик тяговых ЛАД. На основании опытов холостого хода и короткого замыкания определены параметры схемы замещения линейной машины. Сопоставление данных эксперимента и теоретических исследований показало, что расхождение результатов не превышает 10 %.

Выполнены исследования по изучению распределения магнитного поля как вдоль, так и поперек индуктора тягового линейного асинхронного двигателя.

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован и изготовлен опытный макетный образец тягового ЛАД для МЛТ мощностью 36 кВт на напряжение 220 В при частоте тока 50 Гц. Линейный двигатель выполнен десятиполюсным с естественным воздушным охлаждением, имеет длину 1800 мм, ширину 400 мм, высоту 120 мм и массу 258 кг. Общий вид опытного образца тягового линейного асинхронного двигателя показан на фотографии (рис. 23).

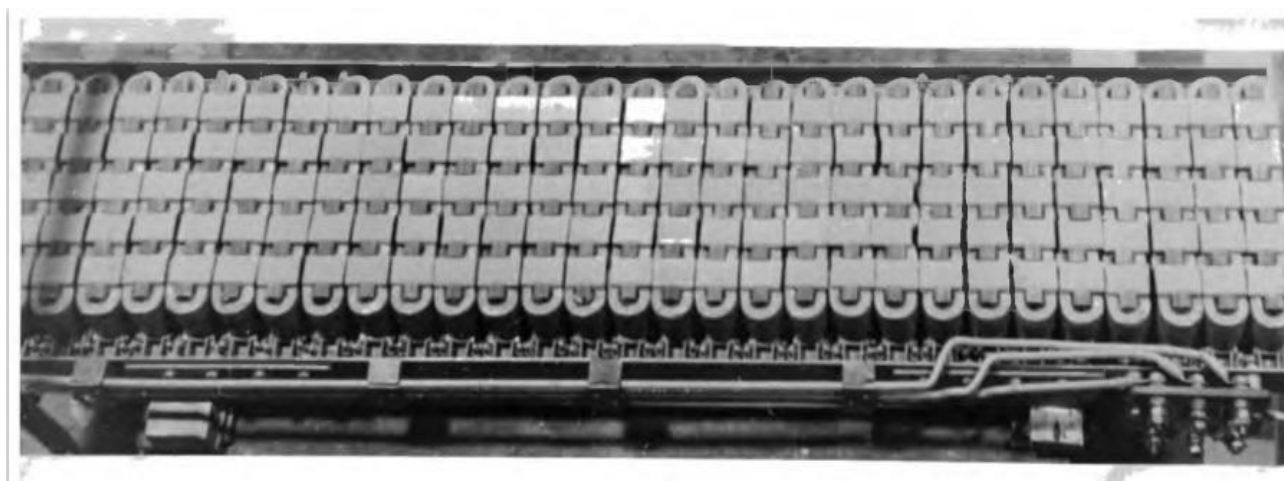


Рис. 23. Опытный образец индуктора ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком

Стендовые испытания опытного образца ЛАД для МЛТ в режимах холостого хода и короткого замыкания (при заторможенном вторичном элементе) позволили определить параметры схемы замещения двигателя, пусковое тяговое усилие и усилия боковой стабилизации. Усилия опытного образца ЛАД измерялись динамометром. Испытания проводились при пониженном напряжении, т.к. в лаборатории не имеется источника питания соответствующей мощности. При фазном токе индуктора 200 А опытного образца тягового ЛАД (номинальный ток 460 А, пусковой ток 570 А) измеренное пусковое тяговое усилие составило 200 Н. Расчетом определено пусковое тяговое усилие при пониженном напряжении без учета срединного эффекта – 218 Н, а с учетом срединного эффекта – 210 Н. Расхождение экспериментального и расчетных значений не превысило 10 %. Причем тяговое усилие, определенное по уточненной методике, имеет более близкое совпадение с измеренным. Расхождение опытных и расчетных данных по усилиям боковой стабилизации не превысило 2-6 %.

Данные расчетов и измерений сведены в таблицу 1 и представлены графически на рис. 24.

Усилия поперечной стабилизации

Смещение вторичного элемента, мм	Расчетное значение усилия стабилизации, Н	Измеренное значение усилия стабилизации, Н
10	3,4	3,6
20	6,0	5,9
30	9,1	9,2
40	12,3	12,1
50	15,0	15,3

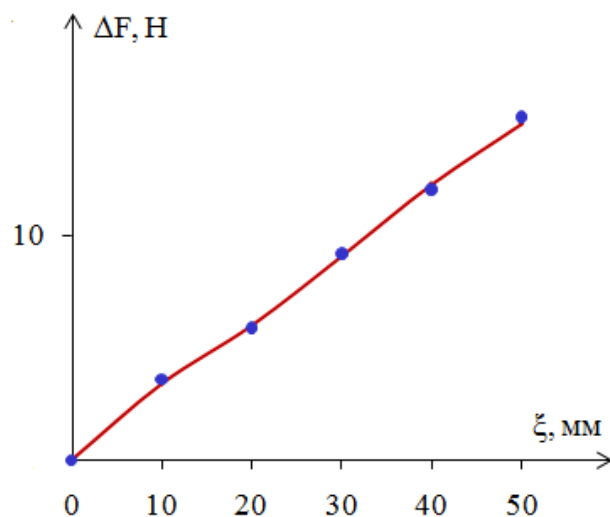


Рис. 24. Усилия поперечной стабилизации ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком:
 — — расчет; • — эксперимент

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования решена научная проблема повышения безопасности движения высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе за счет улучшения поперечной динамики при помощи новых конструкций многофункциональных тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, развивающих усилия боковой самостабилизации левитирующих экипажей относительно путевой структуры и решена научная проблема повышения эффективности использования линейных асинхронных двигателей на высокоскоростном МЛТ путем развития их теории, что позволило повысить точность расчетов, и создания новых конструкций ЛАД. Выполненные исследования позволили сформулировать ряд основных выводов.

1. Анализ публикаций, уровень техники и экономики в Российской Федерации и других промышленно развитых странах позволяют сделать вывод о том, что на первых этапах создания поездов со скоростями движения 350-500 км/ч более перспективными являются магнитолевитационные транспортные системы с тяговыми линейными асинхронными двигателями.

2. Высокие скорости МЛТ требуют значительного повышения уровня безопасности движения. Один из путей решения этой научно-технической проблемы – создание новых тяговых линейных асинхронных приводов, работающих на новом принципе действия, который предложен в диссертации, с улучшенной поперечно динамикой, развивающих не только тяговые усилия, но и усилия поперечной самостабилизации высокоскоростного магнитолевитационного экипажа относительно путевой структуры.

3. Определен способ улучшения поперечной динамики высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с тяговыми ЛАД за счет использования в линейных двигателях нового физического принципа встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей. При нарушении их симметрии (поперечное смещение экипажа) создаются боковые усилия, возвращающие экипаж МЛТ в прежнее положение. На основе решения полевых задач созданы основы теории определения поперечной самостабилизации с учетом взаимосвязей между геометрическими размерами индуктора и вторичного элемента ЛАД и величиной бокового смещения.

4. Решение оптимизационной задачи позволило установить зоны наиболее выгодного использования ЛАД с поперечным магнитным потоком, что необходимо для проектирования линейных двигателей для магнитолевитационного транспорта. Показано, что коэффициент ослабления электромагнитной силы (тягового усилия) зависит от распределения плотности тока во вторичном элементе ЛАД, определены способы его снижения путем направленного изменения соотношения его геометрических размеров.

5. Аналитическим путем получены соотношения для расчета коэффициента ослабления электромагнитной силы тягового ЛАД с поперечным магнитным потоком, учитывающие распределение плотности тока во вторич-

ном элементе, величину воздушного зазора и поперечный краевой эффект. Установлены оптимальные значения плотности тока вторичного элемента, учитывающие скорость движения МЛТ и геометрические размеры двигателя.

6. Установлены аналитические соотношения для расчета плотности тока индукторов тяговых ЛАД с продольным и поперечным магнитным потоком путем решения дифференциальных уравнений, учитывающие геометрические размеры индуктора и вторичного элемента и их взаимное влияние на распределение плотности тока в лобовых частях обмотки, что повышает точность расчета тягового усилия.

7. Сформулирована и решена краевая полевая задача, позволившая получить соотношения для расчета плотности тока во вторичном элементе тягового ЛАД с продольным магнитным потоком при учете влияния магнитного поля за пределами индуктора, что позволяет повысить точность расчета тяговых усилий. Результаты теоретических исследований позволили установить, что эффективность взаимодействия токов индуктора и вторичного элемента ЛАД с продольным магнитным потоком зависит от величины их фазового сдвига и оказывает значительное влияние на величину тягового усилия МЛТ. Аналитическим путем получены соотношения для расчета коэффициента ослабления электромагнитной силы (тягового усилия) в зависимости от распределения тока во вторичном элементе, что может быть использовано при проектировании линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

8. Разработаны математические модели для расчета токов во вторичном элементе ЛАД с поперечным магнитным потоком на основе уравнений Максвелла, позволяющие учитывать величину воздушного зазора при магнитной подвеске высокоскоростного экипажа, распределение магнитной индукции в поперечном направлении и взаимосвязи между геометрическими размерами индуктора и вторичного элемента. Предложена новая математическая модель распределения токов во вторичном элементе, учитывающая поперечный краевой эффект, что позволяет на стадии проектирования магнитолевитационной транспортной системы с ЛАД выбирать ее рациональные размеры. Получены новые соотношения для определения коэффициента ослабления электромагнитной силы ЛАДПП для высокоскоростного МЛТ с учетом срединных эффектов, что повышает точность расчетов.

9. Определены оптимальные значения средней плотности тока вторичного элемента ЛАД для МЛТ, учитывающие взаимосвязи между скоростью движения и геометрическими размерами двигателя. Доказано, что приращение плотности тока вторичного элемента тягового ЛАД при смещении его от оси симметрии в любую сторону будет отрицательным. Исследование окрестностей экстремума (максимума) средней плотности тока вторичного элемента показало, что даже незначительное отклонение от оптимума приводит к существенному снижению плотности тока и уменьшению тягового усилия. Это особенно резко проявляется при малых значениях полюсного деления двигателя.

10. Исследованы особенности регулирования линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Решен ряд полевых задач, устанавливающих взаимосвязи между параметрами паза вторичного элемента тягового регулируемого ЛАД и магнитным полем вторичного элемента при частичном замыкании проводников стержня. Установлены закономерности изменения коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений обмотки вторичного элемента в зависимости от количества и расположения замкнутых накоротко проводников. Доказано, что эффект вытеснения тока в пазу вторичного элемента проявляется особенно резко при замыкании накоротко части проводников, занимающих свыше 50 % по высоте паза. В таких случаях при расчете регулируемого тягового ЛАД в режимах трогания экипажа МЛТ с места, торможения, изменения скорости движения обязателен учет вытеснения тока в пазу.

11. Экспериментальные исследования на лабораторных и макетных образцах ЛАД для высокоскоростного магнитолевитационного подвижного состава показали, что расхождение теоретических и опытных результатов не превышает 10 %.

12. Разработаны конструкции новых тяговых ЛАД для магнитолевитационного транспорта, защищенные 2 авторскими свидетельствами СССР и 25 патентами Российской Федерации.

13. Результаты диссертационного исследования получили практическое применение в конструкции стенда для исследования равновесия, устойчивости и движения комбинированных электромагнитных и электродинамических подвесов для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта (АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» (Госкорпорация «Росатом»), используются при выполнении исследований по новым видам транспорта в рамках гранта РФФИ_РЖД № 17-20-04236 «Магнитное охлаждение перспективных транспортных и энергетических систем» в ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» РАН при разработке стендов по исследованию атмосферных и вакуумных магнитолевитационных транспортных систем, применяются в учебном процессе РГУПС, приняты к внедрению на предприятиях транспорта и промышленности.

Рекомендации по продолжению исследований по теме диссертации: продолжить разработку, моделирование и исследование многофункциональных ЛАД для высокоскоростного МЛТ на основе полномасштабных экспериментальных моделей перспективных видов транспорта.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных журналах,
рекомендованных ВАК и в международной базе Scopus*

По специальности 05.22.07

1. Соломин, А.В. Учет влияния вытеснения тока на параметры проводника обмотки тягового линейного асинхронного двигателя при его произвольном расположении по высоте паза [Текст] /А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2000. - № 1. – С. 30 – 35. (0,375 п.л.).
2. Соломин, А.В. Влияние поверхностного эффекта на параметры вторичного элемента тягового линейного асинхронного двигателя [Текст] /А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2001. - № 2. – С. 82-84. (0,187 п.л.).
3. Соломин, А.В. Тягово-тормозные устройства подвижного состава на базе индукторов линейных асинхронных двигателей и учет поверхностного эффекта [Текст]/А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. - № 2. – С. 45-48. (0,25 п.л.).
4. Соломин, А.В. Силовое взаимодействие индуктора электромагнитного модуля и рельса [Текст] / **А.В. Соломин**, А.В. Костюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2003. - № 1. – С. 31-33. (0,187 п.л. / 0,1 п.л.).
5. Соломин, А.В. Рельсовые тормоза для высокоскоростного подвижного состава/ А.В. Соломин [Текст] // Локомотив. – 2003. - № 12. С. 27. (0,063 п.л.).
6. Соломин, В.А. Тяговые и подъемные усилия линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта [Текст] / В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, **А.В. Соломин** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2004. - № 3. – С. 117-119. (0,187 п.л. / 0,08 п.л.).
7. Соломин, А.В. Линейный асинхронный двигатель для высокоскоростной транспортной системы на магнитной подвеске [Текст] /А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2004. - № 4. – С. 41-44. (0,25 п.л.).
8. Соломин, А.В. Математическое моделирование плотности тока индуктора линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта [Текст] /А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. - № 1. – С. 127-135. (0,562 п.л.).
9. Соломин, В.А. О рациональном взаимном расположении индуктора и вторичного элемента тягового линейного асинхронного двигателя для высокоскоростного транспорта [Текст] / В.А. Соломин, **А.В. Соломин**, Л.Л. Замшина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. № 2. – С. 120-123. (0,32 п.л. / 0,12 п.л.).
10. Соломин, В.А. Усилия поперечной самостабилизации тягового линейного асинхронного двигателя [Текст] В.А. Соломин, **А.В. Соломин**, Л.Л.

Замшина, А.Л. Быкадоров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. № 1. – С. 71-74. (0,25 п.л./0,08 п.л.).

11. Соломин, В.А. Математическое моделирование плотности тока в обмотке в обмотке индуктора линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком [Текст] /В.А. Соломин, **А.В. Соломин**, Н.А. Трубицина, Г.А. Савин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. № 2. – С. 67-72. (0,375 п.л./0,12 п.л.).

12. Соломин, В.А. Магнитное поле и вытеснение тока в пазу вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя при перемещении замыкающего элемента снизу вверх и слева направо [Текст] /В.А. Соломин, **А.В. Соломин**, Л.Л. Замшина, А.А. Бичилова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. № 2. – С. 102-106. (0,312 п.л./0,1 п.л.).

13. Соломин, А.В. Экспериментальные исследования опытного образца индуктора тягового линейного асинхронного двигателя для магнитнолевитационного высокоскоростного транспорта [Текст] / А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. № 2. – С. 39-44. (0,375 п.л.).

14. Соломин, В.А. Параметры регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя для магнитнолевитационного транспорта [Текст] / В.А. Соломин, **А.В. Соломин**, Н.А. Трубицина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. № 4. – С. 170-177. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

15. Соломин, А.В. Активное сопротивление вторичного элемента тягового линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком [Текст] /**А.В. Соломин**, В.А. Соломин, Л.Л. Замшина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. - № 2. – С. 143-147. (0,312 п.л./0,15 п.л.).

16. Соломин, А.В. Высокоскоростная магнитнолевитационная транспортная система с линейными двигателями [Текст] /А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. - № 1. – С. 40-46. (0,437 п.л.).

17. Соломин, А.В. Динамическое торможение линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком для магнитнолевитационного транспорта [Текст] /А.В. Соломин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. - № 2. – С. 77-83. (0,437 п.л.).

18. V.A. Solomin, A.V. Solomin and L.L. Zamchina. Mathematical Modeling of Currents in Secondary Element of Linear Induction Motor with Transverse Magnetic Flux for Magnetic-Levitation Transport. 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-6. (0,375 п.л./0,2 п.л.). Doi: 10.1109/ICIEAV.2019.8742920

По специальности 05.09.01

19. Соломин, В.А. Электромагнитное поле в пазу электрической машины при произвольном в нем расположении проводника с током [Текст] /В.А.

Соломин, **А.В. Соломин**, Л.Л. Замшина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2002. - № 2. – С. 56-59. (0,25 п.л./0,09 п.л.).

20. Соломин В.А. Векторный магнитный потенциал в воздушном зазоре линейного асинхронного двигателя [Текст]/В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, **А.В. Соломин** // Вестник Уральского государственного технического университета - УПИ – 2003. - № 5. – С. 67-70. (0,25 п.л./0,08 п.л.).

21. Соломин, А.В. Очень плавный двигатель [Текст] /А.В. Соломин // Изобретатель и рационализатор. – 2003. - № 11. С. 7-8. (0,125 п.л.)

22. Соломин, А.В. Коэффициент дифференциального рассеяния индуктора линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком [Текст] /**А.В. Соломин**, Д.Ф. Голубев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2003. - № 11-12. – С. 89-95. (0,437 п.л./0,25 п.л.).

23. Соломин, А.В. Регулируемый линейный асинхронный двигатель [Текст] /А.В. Соломин // Электротехника. – 2004. - № 12. - С. 31-34. (0,25 п.л.).

24. Соломин, А.В., Влияние вытеснения тока в пазу на параметры обмотки вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя [Текст] /**А.В. Соломин**, Л.Л. Замшина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. - № 9-10. – С. 41-46. (0,375 п.л./0,25 п.л.).

25. Соломин, А.В. Учет влияния тока в стержне вторичного элемента линейного асинхронного двигателя при его произвольном расположении по ширине и высоте паза [Текст]/**А.В. Соломин**, Л.Л. Замшина//Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2005. - № 3. – С. 34-37. (0,25 п.л./0,15 п.л.).

26. Соломин, А.В. Математическое моделирование токов во вторичном элементе тягового линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком для высокоскоростного транспорта [Текст]/ А.В. Соломин, Н.А. Трубицина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2009. - № 3. – С. 112-117. 0,375 п.л./0,25 п.л.

27. Соломин, В.А. Математическое моделирование токов во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с продольным магнитным потоком для высокоскоростного транспорта [Текст] /В.А. Соломин, **А.В. Соломин**, П.Г. Колпахчян, Н.А. Трубицина // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 40-43. (0,25 п.л./0,08 п.л.).

28. Соломин, А.В. Повышение безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта [Текст] /**А.В. Соломин**, А.А. Зарифьян // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Том 61, № 5. – С. 78-85. (0,5 п.л./0,3 п.л.). DOI: 1017213/0136-3360-2018-78-85

29. Соломин, А.В. Система магнитолевитационного транспорта со стабилизацией воздушного зазора [Текст] /А.В. Соломин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2019. – Том 62, № 5. – С. 88-93. (0,375 п.л.). DOI: 1017213/0136-3360-2019-88-93.

30. A.V. Solomin, V.A. Solomin and N.A. Trubitsina. Approaches to Modelling Current Distribution in Winding of Linear Induction Motor with Transverse Magnetic Flux. 2019. International Ural Conference on Electrical Power Engintring

(UralCon), Chelyabinsk, Russia, pp. 266-270. (0,312 п.л./0,18 п.л.).
Doi: 10.1109/URALCON, 2019.8877690

31. A.V. Solomin and A.A. Chekhova. Magnetic Field and Current Displacement in Groove of Secondary Element of Adjustable Linear Induction Motor. 2019. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Chelyabinsk, Russia, pp. 271-276. (0,375 п.л./0,25 п.л.). Doi: 10.1109/URALCON, 2019.8877608

Монографии

32. Соломин, А.В. Основы теории комбинированных тягово-тормозных устройств на базе линейных асинхронных двигателей: монография [Текст] /А.В. Соломин. – Ростов н/Д: РГУПС, 2002. – 104 с. (6,5 п.л.).

33. Соломин, В.А., Линейные асинхронные двигатели для тяговых и тормозных устройств подвижного состава: монография [Текст] /В.А. Соломин, **А.В. Соломин**. – Ростов н/Д: РГУПС, 2001. – 104 с. (6,5 п.л./3,0 п.л.).

34. Соломин, А.В. Математическое моделирование линейных асинхронных двигателей для тяговых и тормозных устройств высокоскоростного транспорта: монография [Текст] А.В. Соломин. – Ростов н/Д: РГУПС, 2008. – 204 с. (12,75 п.л.).

35. Соломин, В.А. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование: научное издание (монография) [Текст] /В.А. Соломин, Л.Л. Замшина, **А.В. Соломин**. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 164 с. (10,25 п.л./4,5 п.л.).

Изобретения

36. А.с. 1748609 СССР. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., **Соломин А.В.** № 4783723/07. Заявл. 18.01.90; опубл. 15.03.92. Бюл. № 14.

37. А.с. 1820461 СССР. МПК Н02К 41/025. Асинхронный двигатель с разомкнутым магнитопроводом [Текст]/Соломин В.А., Щурская Т.В., **Соломин А.В.** и др. № 4916691/07. Заявл. 6.03.91; опубл. 7.06.93. Бюл. № 21.

39. Патент 1823094 РФ. МПК Н02К 41/025. Асинхронный двигатель с разомкнутым магнитопроводом индуктора [Текст]/Соломин В.А., Кононенко В.В., **Соломин А.В.** и др. № 4893919/07. Заявл. 25.12.90; опубл. 23.06.93. Бюл. № 23.

39. Патент 2024168 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Щурская Т.В., **Соломин А.В.** и др. № 4922110/07. Заявл. 30.04.91; опубл. 30.11.94. Бюл. № 22.

40. Патент 2035826 РФ. МПК Н0 2К 41/025. Асинхронный двигатель с разомкнутым магнитопроводом [Текст]/Соломин В.А., Щурская Т.В. и **Соломин А.В.** № 5032823/07. Заявл. 18.03.92; опубл. 20.05.95. Бюл. № 14.

41. Патент 2046523 РФ. МПК Н02К 41/025. Асинхронный двигатель с разомкнутым магнитопроводом [Текст]/Соломин В.А., Щурская Т.В., **Соломин А.В.** и др. №5050588/07. Заявл.30.06.92; опубл. 20.10.95. Бюл. № 29.

42. Патент 2211524 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин А.В., Соломин В.А., Голубев Д.Ф. № 2001109799/09. Заявл. 14.04.01; опубл. 27.08.03. Бюл. № 24.
43. Патент 2233223 РФ. МПК В61Н 7/08. Электромагнитный рельсовый тормоз [Текст]/Соломин А.В. № 2002119791. Заявл. 22.07.02; опубл. 20.02.04. Бюл. № 5.
44. Патент 2259001 РФ. МПК Н02К 41/025, Н02Р 7/62. Линейный асинхронный электропривод [Текст]/Соломин В.А., Замшина Л.Л., Соломин А.В. №2003138093. Заявл. 30.12.03; опубл. 20.08.05. Бюл. № 23.
45. Патент 2268543 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин А.В. № 2004120797. Заявл. 7.07.04; опубл. 20.01.06. Бюл. № 2.
46. Патент 2269193 РФ. МПК 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Замшина Л.Л., Соломин А.В. № 2004127612/11. Заявл. 15.09.04; опубл. 27.01.06. Бюл. № 3.
47. Патент 2279752 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный электропривод [Текст]/Соломин В.А., Замшина Л.Л., Соломин А.В. № 2005108240/09. Заявл. 23.03.05; опубл. 10.07.06. Бюл. № 19.
48. Патент 2294047 РФ. МПК НО 2К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Трубицина Н.А., Трубицин М.А., Соломин А.В. и др. № 2005133131. Заявл. 19.12.05; опубл. 20.02.07. Бюл. № 5.
49. Патент 2301490 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Трубицина Н.А., Трубицин М.А., Соломин А.В. и др. № 2005139771. Заявл. 19.12.05; опубл. 20.06.07. Бюл. № 17.
50. Патент 2312448 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Соломин А.В., Куричев А.П. № 2006120005. Заявл. 07.06.07; опубл. 10.12.07. Бюл. № 34.
51. Патент 2321940 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный электропривод [Текст]/Соломин В.А., Замшина Л.Л., Соломин А.В. № 20066145557. Заявл. 20.12.06; опубл. 10.04.08. Бюл. № 10.
52. Патент 2336191 РФ. МПК В 61 Н 7/08. Электромагнитный рельсовый тормоз [Текст]/Соломин В.А., Курносик М.А., Соломин А.В. и др. № 2007100628. Заявл. 09.01.07; опубл. 20.10.08. Бюл. № 29.
53. Патент 2343621 РФ. МПК 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Соломин А.В., Куричев А.П. и др. № 2007142765. Заявл. 19.11.07; опубл. 10.01.09. Бюл. № 1.
54. Патент 2348099 РФ. МПК Н02К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Соломин А.В., Трубицина Н.А., Куричев А.П. № 2008104450. Заявл. 05.02.05; опубл. 27.02.09. Бюл. № 6.
55. Патент 2349018 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст]/Соломин В.А., Соломин А.В., Трубицина Н.А. и др. № 2008104745. Заявл. 07.02.08; опубл. 10.03.09. Бюл. № 7.

56. Патент 2377707 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Линейный асинхронный электропривод [Текст]/Соломин В.А., Замшина Л.Л., **Соломин А.В.** и др. № 2008146588. Заявл. 25.11.08; опубл. 27.12.09. Бюл. № 36.

57. Патент 2389125 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Линейный асинхронный электропривод [Текст]/Соломин В.А., Замшина Л.Л., **Соломин А.В.** и др. № 2009114502. Заявл. 10.04.09; опубл. 10.05.10. Бюл. 13.

58. Патент 2468492 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Вторичный элемент линейного асинхронного двигателя [Текст]/ Соломин В.А., **Соломин А.В.**, Кучинская О.С. № 2011119731. Заявл. 16.05.11; опубл. 27.11.12. Бюл. № 33.

59. Патент 2518915 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Линейный асинхронный двигатель [Текст] /Соломин В.А., **Соломин А.В.**, Бичилова А.А., Непомнящая О.В. № 2012153276. Заявл. 10.12.12; опубл. 10.06.14. Бюл. № 16.

60. Патент 2559788 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Вторичный элемент линейного асинхронного электродвигателя [Текст]/ Соломин В.А., **Соломин А.В.**, Соломина О.Е. и др. № 2014114710. Заявл. 14.04.14; опубл. 10.08.2015. Бюл. №22.

61. Патент 2559789 РФ. МПК Н 02 К 41/025. Вторичный элемент линейного асинхронного двигателя [Текст]/Соломин В.А., **Соломин А.В.**, Соломина О.Е. и др. № 2014114711. Заявл. 14.04.14; опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22.

62. Патент 2709981 РФ. МПК В 60 L 13/08. Система магнитнолевитационного транспорта [Текст] / Соломин В.А., **Соломин А.В.** и др. № 2019102862/11 Заявл. 01.02.2019; опубл. 23.12.2019. Бюл. № 36.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве. В статьях из списка ВАК и Scopus [4, 6, 9-12] – постановка задачи, выбор расчетных моделей, математические преобразования, анализ результатов; [14, 15, 18] – формулирование научной задачи, математические преобразования, анализ результатов, выводы; [19, 20, 22, 24-28] – выбор расчетных моделей, математические преобразования, анализ результатов, [30, 31] – постановка задачи, решение уравнений, формулирование и анализ результатов, В монографии [33] – п. 1.4, гл. 2 и п. 3.2; в монографии [35] – п. 1.3, п. 2.2, гл. 4, п. 5.3 и п. 5.4.. В авторских свидетельствах СССР и патентах РФ на изобретения, полученных в соавторстве, права распределены между всеми авторами в равных долях.

Кроме того, по теме диссертации опубликовано еще 76 работ, среди которых статьи в научных журналах, индексируемых в РИНЦ, межвузовских сборниках и материалы интернациональной, международных, всероссийских и региональных конференций.

Соломин Андрей Владимирович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ ТЯГОВЫХ УСТРОЙСТВ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО
ТРАНСПОРТА**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 08.07.2020 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 150 экз. Заказ № 10743.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.