

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора
Евстафьева Андрея Михайловича
на диссертационную работу Соломина Андрея Владимировича «Развитие
теории линейных тяговых устройств для высокоскоростного
магнитолевитационного транспорта», представленную на соискание ученой
степени доктора технических наук по специальностям: 05.22.07 – «Подвижной
состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» и
05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

1. Актуальность темы диссертационной работы

Транспортные коммуникации в значительной степени, определяют интенсивность и эффективность экономического развития. Перспективным этапом развития сферы транспортных услуг является создание новых видов транспортных систем, у которых при движении отсутствует непосредственный контакт между экипажем и путевой структурой. Такими свойствами обладает высокоскоростной магнитолевитационный транспорт (МЛТ). Экипаж МЛТ, при помощи линейного тягового устройства способен двигаться со скоростями 350-500 км/ч, что существенно сокращает время доставки пассажиров и грузов в пункты назначения. Создание эффективных линейных тяговых двигателей, развитие их теории, разработка новых конструкций с улучшенными характеристиками и обеспечение безопасности высокоскоростного магнитолевитационного транспорта являются актуальными научно-техническими проблемами, решению которых посвящена оппонируемая диссертация.

2. Структура работы и основное содержание ее разделов

Диссертационная работа содержит введение, девять глав основного текста, заключение, список литературы из 256 наименований. Общий объем работы составляет 392 страницы с рисунками и приложениями.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность результатов, представлена общая характеристика работы.

В первой главе диссертации рассматриваются варианты высокоскоростных транспортных систем с магнитной левитацией экипажей: с размещением индукторов линейных тяговых модулей в путевой структуре и с

размещением индукторов на высокоскоростных экипажах. На основании анализа публикаций в области высокоскоростного МЛТ сделано заключение о том, что одним из путей создания принципиально новых видов транспорта применение линейного асинхронного тягового привода.

Приводится описание конструкций линейных асинхронных двигателей для МЛТ, значительная часть которых разработана в Ростовском государственном университете путей сообщения при участии автора рассматриваемой работы. Представлены системы МЛТ с ЛАД с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком, линейные двигатели с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Линейные асинхронные двигатели с продольно-поперечным магнитным потоком позволяют повысить безопасность движения высокоскоростного МЛТ за счет создания усилий боковой стабилизации в случаях поперечного смещения экипажа относительно путевой структуры.

Автором диссертации предлагается и при повышении скорости движения рельсового подвижного состава использовать индукторы ЛАД для создания дополнительных тяговых усилий, предлагается конструкция многофункционального электромагнитного рельсового тормоза, который способен работать в режиме дополнительного тягового двигателя, вихретокового тормоза и стояночного тормоза.

Предложены классификации перспективных транспортных систем высокоскоростного подвижного состава как рельсовых, так и магнитолевитационных.

Во второй главе представлены результаты математического моделирования плотности тока в срединных и лобовых частях обмоток индукторов линейных асинхронных двигателей с продольным и поперечным магнитным потоком.

Учет составляющих плотности тока в лобовых частях обмотки ЛАД с продольным магнитным потоком позволяет повысить точность расчета тяговых усилий и энергетических характеристик машины.

Математическая модель распределения тока в лобовых частях обмотки индуктора ЛАД с поперечным магнитным потоком представлена в виде, позволяющем учитывать заданные геометрические размеры индуктора, например, полюсное деление, и получить обобщенную модель распределения тока в лобовых частях и повысить точность расчета тягового усилия магнитолевитационного транспорта.

В третьей и четвертой главах работы на основе решения краевых задач выполнено математическое моделирование распределения токов во вторичных

элементах тяговых линейных асинхронных двигателей с продольным и поперечным магнитным потоком.

Математическая модель плотности тока во вторичном элементе ЛАД с продольным магнитным потоком учитывает распределение магнитной индукции в поперечном направлении за пределами индуктора, что повышает точность расчета тягового усилия. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать распределение линий тока во вторичном элементе и оценивать эффективность взаимодействия токов индуктора и вторичного элемента. Автором установлено, что фазовый сдвиг между плотностями токов индуктора и вторичного элемента увеличивается при уменьшении полюсного деления машины. Получено соотношение для определения коэффициента ослабления электромагнитной силы (тягового усилия) за счет поперечного сжатия линий тока во вторичном элементе. Показано, что коэффициент ослабления электромагнитной силы возрастает при уменьшении полюсного деления ЛАД.

Для линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком получена математическая модель распределения магнитной индукции с учетом поперечного краевого эффекта, оценено его влияние на распределение токов во вторичном элементе, исследовано взаимодействие токов индуктора и вторичного элемента с учетом сдвига их по фазе. Введено понятие срединного эффекта, обусловленного взаимодействием токов во вторичном элементе ЛАД с поперечным магнитным потоком и магнитным полем в зоне лобовых частей обмотки индуктора. Получены соотношения для расчета тягового усилия линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком с учетом влияния срединного эффекта.

В пятой главе рассмотрены вопросы оптимизации тяговых ЛАД для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта. Доказано, что при увеличении полюсного деления ЛАД с поперечным магнитным потоком относительное смещение оси токов вторичного элемента уменьшается.

Исследованы окрестности экстремума средней плотности токов вторичного элемента и установлено, что максимум занимает узкую область и при незначительном отклонении от оптимума плотность тока существенно снижается.

Исследован вопрос об оптимизации силового взаимодействия индуктора и вторичного элемента тягового ЛАД, сформулирована вариационная задача. Получено решение оптимизационной задачи силового взаимодействия индуктора двигателя и его вторичного элемента с учетом результатов, полученных в третьей и четвертой главах диссертации. Это подтверждается

расчетами, выполненными автором, которые свидетельствуют о наличии экстремумов коэффициентов силового взаимодействия.

Определены зоны эффективного использования линейных асинхронных двигателей с поперечным магнитным потоком в тяговом приводе высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

В шестой главе содержатся результаты исследования регулируемого линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Это линейные асинхронные двигатели нового типа и возможность изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки расширяет диапазон регулирования скорости. Описаны конструкции регулируемых ЛАД, разработанных при участии соискателя.

На основании решения полевой задачи получены соотношения для расчета коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений обмотки вторичного элемента ЛАД, учитывающих влияние вытеснения тока в пазу при различных положениях замыкающего элемента.

Результаты исследований позволили сделать заключение о том, что эффект вытеснения тока в пазу вторичного элемента регулируемого ЛАД значительно проявляется при закорачивании подвижным элементом свыше половины проводников в пазу. В этих случаях значительно увеличиваются активное и уменьшаются индуктивные сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД. Это говорит о том, что вытеснение тока в пазу вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя необходимо учитывать при расчете тягового усилия при пуске в ход (трогание экипажа МЛТ с места) и в режиме торможения высокоскоростного поезда.

Седьмая глава посвящена исследованию линейных асинхронных двигателей, магнитный поток которых замыкается как в продольном, так и в поперечном направлениях. Приведены конструкции ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, в том числе и двигатели, работающие на основе встречно бегущих магнитных полей, способных создавать помимо тяговых, усилия боковой стабилизации, использование которых на магнитолевитационном транспорте позволит обеспечить безопасность движения.

Приводятся результаты распределения магнитодвижущих сил в воздушном зазоре ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. На основании решения полевой задачи получены соотношения для расчета интегральных характеристик ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. Интегральные характеристики ЛАД определены и на основании

инженерной методики, построенной на использовании схемы замещения линейной асинхронной машины.

Приводятся сведения об эффективности использования тяговых ЛАД на рельсовом высокоскоростном подвижном составе в качестве дополнительных тягово-тормозных модулей.

В восьмой главе изложены основные результаты математического моделирования усилий боковой самостабилизации, развиваемых ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, которые улучшают поперечную динамику высокоскоростного МЛТ и повышают безопасность его движения.

Определен путь повышения безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта за счет использования эффекта встречно бегущих магнитных полей, который не требует установки датчиков положения и других дополнительных устройств.

Предложен принцип двойной поперечной стабилизации высокоскоростного транспортного экипажа относительно путевой структуры с тяговым ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, разработанный соискателем и защищенный патентом РФ на изобретение. Расчеты показали, что системы МЛТ тяговым линейным устройством на базе разработанного ЛАД развивают повышенные почти на 30% усилия боковой стабилизации.

На основе решения полевых задач установлены соотношения для расчета усилий поперечной стабилизации экипажа МЛТ. Определено влияние воздушного зазора на величину усилий боковой стабилизации

В девятой главе изложены результаты экспериментальных исследований опытных образцов линейных асинхронных двигателей.

Приводится описание экспериментальных установок.

Экспериментальным путем определены параметры схемы замещения ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных показывает, что их расхождение не превышает 15%.

Исследование нагрева вторичного элемента в режиме короткого замыкания (при неподвижном вторичном элементе ЛАД) показало, что его температура достигает своих установившихся значений за 40 минут, что превышает время пуска и торможения высокоскоростного поезда МЛТ.

Изучение распределения магнитных полей в воздушном зазоре ЛАД свидетельствует о справедливости принятых для исследования расчетных моделей линейных двигателей.

Данные расчетов и измерений показали, что расхождение значений тяговых усилий не превышает 10%, а усилий боковой стабилизации – 6%. Это

подтверждает справедливость результатов исследований, изложенных в диссертации.

Диссертация представляет собой логичное и последовательное изложение результатов завершеного научного исследования.

3. Научная новизна результатов, выводов и рекомендаций диссертации

Диссертация представлена по двум научным специальностям.

1. Предложен новый способ обеспечения боковой стабилизации экипажа высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, обеспечивающий повышение безопасности движения.

2. Разработаны математические модели тягового линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком, принцип действия которого основан на использовании встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей, учитывающие взаимосвязи между магнитным полем в воздушном зазоре, токами во вторичном элементе и скоростью движения экипажа МЛТ.

3. На основе математических моделей ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком определены соотношения для расчета боковых стабилизирующих усилий, улучшающих поперечную динамику экипажа магнитолевитационного транспорта.

4. Поставлена и решена оптимизационная задача, получены соотношения для расчета коэффициента ослабления электромагнитной силы и способы его снижения для увеличения тягового усилия ЛАД с поперечным магнитным потоком.

5. Сформулирована и решена краевая задача, получены соотношения для расчета плотности тока индукторов тяговых линейных асинхронных двигателей с продольным и поперечным магнитным потоком при учете геометрических размеров машины и их влияния на распределение тока в лобовых частях обмоток.

6. Сформулированы и решены краевые задачи, позволившие получить соотношения для расчета плотности тока во вторичных элементах ЛАД с продольным и поперечным магнитным потоком, учитывающие действие поперечного краевого эффекта.

7. Разработаны и исследованы ЛАД с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, позволяющего расширить диапазон регулирования скорости линейного двигателя. Установлены закономерности изменения коэффициентов увеличения активного и снижения

индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД при учете поверхностного эффекта в переходных режимах работы машины.

Выводы и рекомендации в диссертации достаточно аргументированы.

4. Значимость результатов, полученных в диссертации, для теории и практики

Разработанный способ боковой стабилизации МЛТ, основанный на использовании встречно бегущих магнитных полей, можно считать новым научным направлением в создании и исследовании многофункциональных тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком. Имеют значение для теории математические модели, позволившие получить соотношения для расчета усилий боковой стабилизации высокоскоростных транспортных экипажей с тяговыми ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, результаты решения оптимизационных задач по определению плотности тока во вторичных элементах линейных асинхронных двигателей, учитывающих взаимозависимости между скоростью движения МЛТ и геометрическими размерами тяговых машин, установленные закономерности увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента за счет вытеснения тока в пазу регулируемого линейного асинхронного двигателя в переходных режимах работы.

Практическая значимость диссертации заключается в возможности использования встречно бегущих магнитных полей для создания новых типов линейных асинхронных двигателей, обеспечивающих автоматическую боковую стабилизацию экипажа МЛТ, что позволит обеспечить безопасность движения. Имеют практическое значение результаты математического моделирования ЛАД с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком, позволяющие повысить точность расчета тяговых усилий и новый способ регулирования скорости движения при использовании линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента.

5. Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, представленных в диссертации, обеспечивается

корректностью допущений, принимаемых при решении краевых задач и разработке математических моделей. Основные теоретические результаты получены на основе законов электротехники, теории электромагнитного поля и электромеханического преобразования энергии. В диссертации корректно выполнены математические преобразования с использованием дифференциального и интегрального исчисления, функций одной или нескольких переменных, векторного анализа и рядов Фурье.

Теоретические результаты диссертации получили экспериментальное подтверждение.

6. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты исследований, изложенных в диссертации, используются при разработке стендов и макетов магнитолевитационного транспорта, что подтверждается актами внедрения.

Принцип встречно бегущих магнитных полей позволяет создавать новые типы электрических машин для высокоскоростного МЛТ, промышленных электроприводов на основе магнитолевитационных технологий.

Результаты диссертации рекомендуются для использования в организациях, которые занимаются разработкой и исследованием транспортных систем, электрических машин и электрических приводов и в учебном процессе при подготовке специалистов в области транспорта, электропривода и электромеханики.

7. Соответствие диссертационной работы специальностям

Диссертация Соломина А.В. «Развитие теории линейных тяговых устройств для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта» соответствует научным специальностям:

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

п. 5 – «Подвижной состав нового поколения и тормозное оборудование, повышающее безопасность движения поездов и пропускную способность железных дорог»; п. 8 – «Тяговые и тормозные расчеты. Тяговые и тормозные качества подвижного состава. Обеспечение безопасности движения поездов».

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

п. 1 – «Анализ и исследование физических явлений, лежащих в основе функционирования электрических электромеханических преобразователей и

электрических аппаратов»; п. 2 – «Разработка научных основ создания и совершенствования электрических, электромеханических преобразователей и электрических аппаратов».

Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Результаты работы отражены в публикациях соискателя, среди которых 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 монографии и 2 патента написаны им единолично.

8. Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Целесообразность применения линейных асинхронных двигателей именно в высокоскоростных транспортных системах требует обоснования. В настоящее время в существующих высокоскоростных транспортных системах на магнитном подвесе, таких как Transrapid (Германия – Китай) и MLU-MLX (Япония), используются линейные синхронные двигатели. ЛАД используются в относительно низкоскоростных транспортных системах (до 100-120 км/ч). Это связано с тем, что влияние продольных краевых эффектов особенно сильно проявляется именно при высоких скоростях движения.

2. В числе результатов, выносимых на защиту, в пунктах научной новизны и практической значимости заявлены новые принципы действия тяговых ЛАД. Представляется, что это не очень корректно, правильнее было бы говорить о новых технических решениях.

3. Существенное место в основных научных результатах диссертанта занимает повышение точности расчетов тяговых усилий ЛАД с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком за счет учета влияния лобовых частей обмоток индукторов, однако конкретных оценок на сколько повышается точность расчетов не приводится.

4. Выводы по второй главе о характере изменения X и Y-компонент плотности тока индукторов ЛАД при уменьшении полюсного деления и увеличении вылета лобовых частей обмоток представляются очевидными.

5. Судя по постановке задачи анализа распределения токов во вторичном элементе ЛАД, продольный краевой эффект, связанный с ограниченностью продольного размера индуктора ЛАД, не учитывается. Как соотносятся уточнение расчетов тяговых усилий за счет учета электромагнитного взаимодействия индуктора и вторичного элемента в боковых зонах последнего и потеря точности за счет пренебрежения продольным краевым эффектом?

6. Диссертантом введено понятие "коэффициент ослабления электромагнитной силы (тягового усилия)". Хотелось бы, чтобы физический

смысл этого понятия был представлен более прозрачно. Кроме того, терминология, введенная диссертантом, используется не всегда корректно. В частности, диссертантом установлено, что срединный эффект проявляется в увеличении тягового усилия ЛАД с поперечным потоком, а в выводе 5 по главе 4 встречаем: "... учет срединного эффекта увеличивает коэффициент ослабления тягового усилия на 5...10%".

7. Целесообразность применения ЛАД с регулируемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента и ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе должна быть подтверждена более глубоким технико-экономическим обоснованием.

8. Утверждения диссертанта о том, что "...решена научная проблема повышения безопасности движения высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе..." и "...решена научная проблема повышения эффективности использования линейных асинхронных двигателей на высокоскоростном магнитолевитационном транспорте..." (стр. 341 диссертации) представляются преждевременными. Об этом можно будет говорить, когда основные идеи диссертанта будут реализованы и подтвердятся в полномасштабных проектах. Пока следует говорить о том, что получена совокупность технических решений, на основе которых можно будет повысить безопасность и эффективность.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку представленной работы

9. Заключение

Диссертационная работа Соломина Андрея Владимировича «Развитие теории линейных тяговых устройств для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842), в том числе критериям, записанным в (п. 9 – п. 14), является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные новые теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, и научно обоснованные технические решения и разработки в области линейных асинхронных тяговых устройств для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие транспортной и электротехнической отраслей страны.

