

## ОТЗЫВ

официального оппонента Сапсалева Анатолия Васильевича, доктора технических наук, профессора на диссертационную работу Соломина Андрея Владимировича «Развитие теории линейных тяговых устройств высокоскоростного магнитолевитационного транспорта», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям:

05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»;

05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

### **Актуальность темы диссертации**

Развитие экономики в стране в значительной степени определяется качеством работы всех видов транспорта. Для Российской Федерации с ее географическим расположением наиболее важным является железнодорожный транспорт, связывающий между собой Запад с Востоком и Север с Югом огромной страны. Увеличение и ускорение грузооборота, создание новых транспортных коридоров, повышение качества и скорости перевозки пассажиров – все это требует совершенствования подвижного состава железных дорог, в первую очередь, работающего на электрической тяге. И здесь существенно важными являются вопросы, связанные с увеличением скорости движения, что, в свою очередь, обостряет вопросы, связанные с обеспечением безопасности движения. На перспективу направлены работы по созданию принципиально новых видов электрического подвижного состава – высокоскоростного магнитолевитационного транспорта (МЛТ), перемещающегося со скоростями 400-500 км/ч, а на следующем этапе – и вакуумного МЛТ, скорость движения экипажа которого может превышать 1000 км/ч.

Для осуществления движения принципиально новых видов транспорта, реализующих магнитолевитационные технологии, применяются линейные тяговые устройства. Одним из видов приводных двигателей для тяговых устройств являются линейные асинхронные двигатели (ЛАД), которые и выбраны в качестве объекта исследования. Разработка и исследование линейных тяговых устройств на базе линейных асинхронных двигателей, в том числе, работающих на новом принципе, развитие их теории для разработки основ проектировании высокоскоростного магнитолевитационного транспорта представляются актуальными научными проблемами.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждается корректностью при формулировании и постановке задач исследования, корректностью принимаемых допущений при аналитиче-

ском решении полевых задач. Основные теоретические результаты диссертации получены с использованием фундаментальных законов электротехники, теории электромагнитного поля и электромеханического преобразования энергии. Автором диссертации достаточно корректно применен математический аппарат: дифференциальное и интегральное исчисления функций одной или нескольких переменных, векторный анализ, комплексное исчисление, вариационное исчисление и ряды Фурье. Выводы и рекомендации в работе аргументированы и подтверждены расчетами.

Обоснованность теоретических результатов диссертации подтверждается достаточным совпадением с данными экспериментальных исследований.

### **Новизна полученных результатов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Из материалов диссертации и публикаций следует, что автором в новой постановке решен целый ряд теоретических и практических вопросов, связанных с анализом процессов в линейных асинхронных электродвигателях для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта. При этом полученные результаты обладают новизной, как в теоретическом, так и практическом (прикладном) аспектах.

К наиболее важным достижениям, обладающим научной новизной, относятся:

По специальности 05.2.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»

1. Принцип реализации боковой стабилизации высокоскоростного транспортного состава, подвешенного в магнитном поле, путем использования бегущих навстречу друг другу в поперечном движении направлении магнитных полей.

2. Результаты математического моделирования тяговых линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, работающих на новом принципе, позволившие получить соотношения для расчета их интегральных характеристик с учетом взаимосвязей между магнитным полем в воздушном зазоре, токами во вторичном элементе (ВЭ) и скоростью движения экипажа магнитолевитационного транспорта.

3. Математическая модель ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, на основании которой определены соотношения для расчета усилий боковой стабилизации экипажа высокоскоростного МЛТ, повышающего безопасность движения, при учете взаимного влияния геометрических размеров двигателя и величины бокового смещения.

4. Результаты решения оптимизационной задачи, позволяющие уже на стадии проектирования линейных тяговых устройств для МЛТ выбирать рациональные соотношения между геометрическими размерами ЛАД с поперечным магнитным потоком и скоростью движения.

По специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»:

1. Применение принципа встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей с возможностью изменения степени их симметрии позволяет создавать новые, многофункциональные асинхронные электрические машины не только линейного типа, но и с вращательным, а так же с вращательно-поступательным движением их якорей.

2. Полученные оптимальные соотношения для плотности тока во вторичном элементе ЛАД с поперечным магнитным потоком, учитывающие взаимосвязи между скоростью движения и геометрическими размерами машины.

3. Теоретическим путем доказано, что приращение плотности тока во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком при его поперечном смещении в любую сторону относительно оси симметрии с индуктором всегда будет иметь отрицательное значение.

4. Результаты исследования особенностей регулирования линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Установлены закономерности увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений за счет вытеснения тока в пазу короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД в переходных режимах пуска в ход, увеличения скорости и торможения.

### **Значимость полученных результатов для науки и практики**

Значительную теоретическую значимость имеют следующие результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Принцип создания боковой стабилизации высокоскоростного магнитолевитационного транспорта относительно путевой структуры на основе встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей, открывающий новое научное направление в области проектирования перспективных транспортных систем и многофункциональных линейных асинхронных электрических машин.

2. Разработанные математические модели линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, у которых сочетаются магнитные поля, созданные токами всей системы катушек обмотки индуктора ЛАД и бегущие в продольном направлении, и встречно бегущие в поперечном направлении, возбужденные токами катушек обмотки, образующих поперечные ряды. Соотношения, полученные на базе математических моделей, учитывают взаимосвязи между распределением магнитного поля в немагнитном зазоре, распределением тока во вторичном элементе и скоростью движения экипажа МЛТ.

3. Соотношения для расчета боковых усилий, улучшающих поперечную динамику магнитолевитационного транспорта, создаваемых ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, которые учитывают взаимосвязи между геометрическими размерами двигателя и величиной бокового смещения экипажа.

4. Метод определения оптимальной плотности тока во вторичном элементе ЛАД с поперечным магнитным потоком при учете взаимного влияния полюсного деления, длины и ширины индуктора и скорости движения магнитолевитационного транспорта.

5. Результаты исследования особенностей регулирования скорости линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента при учете явления вытеснения тока в пазу на увеличение активного и уменьшение индуктивного сопротивлений обмотки вторичного элемента в переходных режимах его работы.

Практическая значимость результатов:

1. Предложенный принцип использования встречно бегущих магнитных полей открывает путь для разработки систем высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с повышенной безопасностью движения за счет боковой стабилизации, достигаемой только за счет применения многофункциональных ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком без каких-либо датчиков положения и дополнительных устройств.

2. Математические модели тяговых линейных асинхронных двигателей, полученные в диссертации, позволяют создавать более точные методики их расчета.

3. Математическая модель тягового ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, которая позволила установить соотношения для расчета усилий поперечной стабилизации с целью проектирования высокоскоростного МЛТ с повышенной безопасностью движения.

4. Определение максимума плотности тока во вторичном элементе при заданных значениях геометрических размеров и скорости движения МЛТ позволяет проектировать ЛАД с увеличенным значением тягового усилия.

5. Предложенный способ регулирования ЛАД с короткозамкнутой обмоткой вторичного элемента позволяет создавать новые конструкции двигателей.

6. Закономерности увеличения активного и снижения индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента за счет учета влияния вытеснения тока в пазу позволяют повысить точность расчета, пусковых, тяговых и тормозных усилий линейного асинхронного двигателя.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Результаты исследований, изложенных в диссертации, уже нашли практическое применение и используются при разработке стендов и макетов магнитолевитационного транспорта, что подтверждается актами внедрения. (Акт внедрения АО «Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова» и акт внедрения ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова» РАН.

Ряд результатов работы используется в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС при чтении курсов лекций, при проведении практических и лабора-

торных работ, использованы при издании 3 наименований учебно- методической литературы.

Принцип встречно бегущих магнитных полей позволяет создавать новые типы электрических машин и рекомендуется организациям, занимающимся проблемами электромеханики и электропривода.

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

### **Структура работы и основное содержание ее разделов**

Диссертационная работа включает в себя введение, девять глав, заключение, библиографический список из 256 литературных источников. Объем работы составляет 392 страниц вместе с рисунками и приложениями.

**Во введении** обоснована актуальность темы, обозначены научные проблемы, цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность, кратко представлена общая характеристика работы.

**В первой** главе диссертации рассматриваются варианты перспективных высокоскоростных транспортных систем нового типа – с магнитной подвеской экипажей: с размещением индукторов линейных тяговых модулей в путевой структуре и с размещением индукторов ЛАД на экипажах. Анализ публикаций в области высокоскоростного МЛТ позволил сделать вывод о том, что на нынешнем этапе развития передовых стран целесообразно создавать МЛТ на базе линейных тяговых устройств с асинхронными тяговыми двигателями.

Описаны конструкции линейных асинхронных двигателей для МЛТ, разработанные в Ростовском государственном университете путей сообщения. Представлена конструкция многофункционального электромагнитного рельсового тормоза, который способен работать в режиме дополнительного тягового двигателя, вихретокового тормоза и стояночного тормоза.

Приведены классификации 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.

Математические модели распределения тока в лобовых частях обмотки индуктора ЛАД с продольным и поперечным магнитным потоком представлены в виде, позволяющем учитывать заданные геометрические размеры индуктора, получить обобщенные модели распределения тока в лобовых частях и повысить точность расчета тягового усилия магнитолевитационного транспорта.

**В третьей** главе работы на основе решения полевой задачи выполнено математическое моделирование распределения токов во вторичных элементах тяговых линейных асинхронных двигателях с продольным магнитным потоком.

Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать распределение линий тока во вторичном элементе и оценивать эффективность взаимодействия токов индуктора и вторичного элемента. Определено, 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.

**В четвертой** главе для ЛАД с поперечным магнитным потоком разработана математическая модель распределения магнитной индукции с учетом поперечного краевого эффекта и установлено его влияние на распределение токов во вторичном элементе, исследовано взаимодействие токов индуктора и вторичного элемента с учетом сдвига их по фазе. Выполненные расчеты учитывают поперечную симметрию двигателя и граничные условия. Автором введено понятие срединного эффекта, создаваемого взаимодействием токов во вторичном элементе ЛАД и магнитным полем под лобовыми частями обмотки индуктора. Определены соотношения для расчета тягового усилия ЛАД с поперечным магнитным потоком при учете влияния срединного эффекта.

**В пятой** главе приводятся результаты оптимизации тяговых ЛАД для магнитолевитационного транспорта. В результате исследования окрестности экстремума средней плотности токов вторичного элемента ЛАД с поперечным магнитным потоком и установлено, что максимум занимает достаточно узкую область и при даже незначительном отклонении от оптимума плотность тока существенно снижается.

Решена проблема оптимизации силового взаимодействия индуктора и вторичного элемента тягового ЛАД, сформулирована вариационная задача. Получено решение оптимизационной задачи взаимодействия токов индуктора двигателя и его вторичного элемента. Получены соотношения для определения коэффициента силового взаимодействия. Результаты расчетов свидетельствуют об экстремумах коэффициентов силового взаимодействия.

Определены зоны наиболее эффективного использования ЛАД с поперечным магнитным потоком в тяговом приводе магнитолевитационного транспорта.

**В шестой** главе приведены результаты исследования регулируемого ЛАД с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента. Возможность изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки открывает дополнительные возможности регулирования скорости. Приведены конструкции регулируемых ЛАД, разработанных при участии автора диссертации.

Решение краевой задачи позволило установить соотношения для расчета коэффициентов увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений обмотки вторичного элемента ЛАД, учитывающих влияние поверхностного эффекта (вытеснения тока в пазу ВЭ).

Определено, что эффект вытеснения тока в пазу вторичного элемента, регулируемого ЛАД резко проявляется при замыкании подвижным элементом свыше половины проводников по высоте паза ВЭ. При этом значительно изменяются параметры короткозамкнутой обмотки вторичного элемента ЛАД и вытеснение тока в пазу вторичного элемента регулируемого линейного асинхронного двигателя следует обязательно учитывать для снижения погрешностей при расчете тягового усилия при трогании экипажа МЛТ с места и в режиме торможения.

**Седьмая** глава посвящена исследованию линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком. Представлены некоторые конструкции ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, в их числе и многофункциональные двигатели, работающие на новом принципе действия, создающие не только тяговые, но и дополнительные усилия боковой стабилизации. Приводятся результаты распределения магнитодвижущих сил в воздушном зазоре ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком. В результате решения полевой задачи получены соотношения для расчета интегральных характеристик ЛАД. Оценивается эффективность применения тяговых линейных асинхронных двигателей и на традиционном высокоскоростном подвижном составе в качестве дополнительных тяговых двигателей и тормозных устройств.

**В восьмой** главе приводятся результаты математического моделирования усилий боковой стабилизации, создаваемых линейными асинхронными двигателями с продольно-поперечным магнитным потоком, которые повышают безопасность движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

Автором диссертации разработан принцип двойной поперечной стабилизации экипажа высокоскоростного МЛТ относительно путевой структуры с тяговым ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком (получен патент РФ на изобретение). Тяговое линейное устройство с новым ЛАД развивает повышенное усилие боковой стабилизации.

В результате решения полевой задачи найдены соотношения для определения величины усилий боковой стабилизации магнитолевитационного транспорта, в том числе и при учете величины воздушного зазора.

**В девятой** главе описаны результаты экспериментальных исследований физических моделей линейных асинхронных двигателей.

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

Выполнено исследование процесса нагрева вторичного элемента в режиме короткого замыкания (при неподвижном вторичном элементе ЛАД), которое показало, что его температура достигает своих установившихся зна-

чений за 40 минут, что намного превышает время пуска и торможения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

Исследование распределения магнитных полей в воздушном зазоре моделей линейных асинхронных двигателей подтверждает правильность принятых для исследования расчетных моделей ЛАД.

Теоретические результаты, данные расчетов и измерений показали, что расхождение значений тяговых усилий ЛАД не превышает 10%, а усилий поперечной стабилизации – 6%. Это свидетельствует об адекватности результатов исследований, изложенных в диссертации.

**Диссертация** написана в традиционном стиле, представляет собой логичное и последовательное изложение завершеного научного исследования. Результаты исследований представлены на Международных и Всероссийских научных конференциях. Все они достаточно полно отражают полученные научные результаты, а также основные аспекты их практической реализации.

**Автореферат** достаточно полно отражает основное содержание диссертации. Основные результаты работы отражены в 62 публикациях соискателя, среди которых 28 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, из них - 12 написаны им единолично, 3 статьи напечатаны в журналах из базы Scopus, 4 монографии (2 без соавторов) и 27 патентов на изобретения (2 без соавторов).

#### **Соответствие диссертации научным специальностям**

Рассматриваемая диссертационная работа соответствует научным специальностям

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

п. 1 – «Подвижной состав нового поколения и тормозные расчеты, повышающие безопасность движения 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».

#### **Вопросы и замечания**

1. Почему в диссертации не рассматриваются варианты использования в линейных тяговых устройствах синхронных электрических машин?

2. Решения для распределения плотности тока в индукторе представлены в виде волновых уравнений. Почему автор заложил в аргументе отрицательное время. С точки зрения математики это допустимо, но какой физический смысл имеет здесь отрицательно время?



3. В каких случаях следует учитывать при расчете линейных тяговых устройств взаимодействие токов в лобовых частях обмотки индуктора ЛАД с токами вторичного элемента?

4. Конструкция линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента позволяет расширить диапазон и повысить плавность регулирования скорости. Не совсем ясно, каким способом на практике предлагает автор изменять сопротивление короткозамкнутой обмотки ВЭ?

5. Автор утверждает, что двигатель с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента позволяет расширить диапазон и повысить плавность регулирования скорости. По сравнению с чем? При частотно-токовом управлении ЛАД, очевидно, что эти характеристики будут выше.

6. Более строго следовало бы отнестись к обозначению комплексных величин. Не понятно, где коэффициенты комплексные, где вещественные? В связи с этим вопрос по формуле (6.43),  $R_e$  – в этой формуле действительная часть или какое-то сопротивление? То же по формуле (7.63).

7. Каким образом при расчете характеристик регулируемого ЛАД учитывается сопротивление шины?

8. Можно ли обмотку индуктора тягового линейного асинхронного двигателя с продольно-поперечным магнитным потоком, работающего на новом принципе действия выполнить распределенной как вдоль, так и поперек индуктора данной электрической машины с целью повышения ее энергетических характеристик?

9. На мой взгляд, в диссертации мало ссылок на современные зарубежные публикации по проблемам, близким к теме представленной работы.

10. В ряде глав диссертации символом «а», обозначено отношение «л» к полюсному делению линейного асинхронного двигателя (гл. 2 – гл. 5), а в 6 главе этим же символом обозначена степень замыкания подвижным элементом проводников в пазу короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого линейного асинхронного двигателя.

11. В автореферате на с. 11 описка в представлении общего случая  $b_{1и} = b_{3и} - b_{2и}$ , должен быть знак неравенства. Практически везде в автореферате описки, связанные с представлением экспоненциальной функции.

12. На с. 90 автор использует безразмерную величину, известную в литературе как коэффициент Рейнольдса. Этот коэффициент характеризует добротность ЛАД, и в меньшей мере его нагрузку, как об этом пишет автор. В автореферате (с. 13) этот коэффициент обозначен несвойственным ему индексом.

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Соломина Андрея Владимировича по актуальности темы, научной новизне и результатам, их теоретической и практической значимости заслуживает в целом положительной оценки.

## Заключение

Диссертационная работа Соломина Андрея Владимировича «Развитие теории линейных тяговых устройств 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 в области технических решений и разработки линейных тяговых устройств для магнитолевитационного транспорта, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие транспортной и электротехнической отраслей страны. Автор работы Соломин А.В. заслуживает присуждения 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».

Официальный оппонент, профессор кафедры  
«Электроника и электротехника» Новосибирского  
государственного технического университета» (НГТУ-НЭТИ), доктор  
технических наук, профессор



Сапсалева Анатолий Васильевич

Адрес: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Электроника и электротехника»

Телефон: +7(383)346-32-37

Эл. почта: sapsalevav@ngs.ru

Адрес: Сапсалева Анатолий Васильевич  
И.О. Ф.И.О. Сапсалева Анатолий Васильевич  
22.09.2022

