

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

Д 218.010.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР), по диссертации на соискание ученой степени доктора наук аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 19.10.2020 № 6

О присуждении Соломину Андрею Владимировичу, Российская Федерация, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Развитие теории линейных тяговых устройств высокоскоростного магнитолевитационного транспорта» по специальностям 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» и 05.09.01 – «Электро-механика и электрические аппараты» принята к защите 29.06.2020 г., протокол № 3, диссертационным советом Д 218.010.01, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2. Приказ Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012), далее – ФГБОУ ВО РГУПС).

Соискатель Соломин Андрей Владимирович, 1972 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Исследование тормозных, догружающих и вспомогательных тяговых устройств подвижного состава на базе линейных электромагнитных модулей» по специальности 05.22.07. – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» защитил в 1998 году в диссертационном совете, созданном на базе Ростовского государственного университета путей сообщения. Работает доцентом на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (РОСЖЕЛДОР) с 2001 года по настоящее время.

Диссертация выполнена на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Зарифьян Александр Александрович, профессор кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС.

Официальные оппоненты:

Евстафьев Андрей Михайлович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электрическая тяга» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра 1» (ФГБОУ ВО ПГУПС); Коняев Андрей Юрьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО УрФУ); Сапсалева Анатолий Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроника и электротехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО (НГТУ-НЭТИ) – дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГАОУ ВО РУТ(МИИТ)), в своем положительном отзыве, подписанном профессором кафедры «Тяговый подвижной состав» (ТПС), д.т.н, старшим научным сотрудником Осяевым Анатолием Тимофеевичем и профессором кафедры ТПС д.т.н., доцентом Смирновым Валентином Петровичем и утвержденном проректором д.т.н., доцентом Савиным Александром Владимировичем, указала, что диссертация Соломина А.В. «Развитие теории линейных тяговых устройств высокоскоростного магнитолевитационного транспорта» является законченной научной квалификационной работой, выполнена на актуальную тему, обладает внутренним единством и содержит решения научных проблем в области линейных тяговых устройств магнитолевитационного транспорта. Совокупность теоретических положений, полученных в диссертации, можно квалифицировать как научное достижение, научно обоснованные технические решения, представленные в работе, при внедрении внесут значительный вклад в развитие транспортной и электротехнической отраслей страны. Диссертация отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Соломин Андрей Владимирович, заслуживает присуждения учёной 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».

Соискатель имеет 138 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 62 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 28 работ, а также 3 статьи в изданиях, входящих в базу SCOPUS, 27 изобретений и 4 монографии. Публикации полностью отражают содержание диссертации, в них рассмотрены вопросы развития теории линейных тяговых устройств на основе линейных асинхронных двигателей для магнитолевитационного транспорта (МЛТ), повышения безопасности движения высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе, использования принципа встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей для создания multifunctional линейных асинхронных двигателей (ЛАД).

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Основные публикации:

**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, 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.).

6. 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.).

7. 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.).

8. 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.).

9. 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.).

10. 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.).

11. 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.).

12. 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.).

13. 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.).

14. 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 государ-

ственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2. – С. 143-147. (0,312 п.л./0,15 п.л.).

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

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

17. V.A. Solomin, A.V. Solomin and L.L. Zamchina. Mathematical Modelling 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

18. 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.).

19. 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.).

20. 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.).

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

22. 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.).

23. 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.).

24. 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.).

25. 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.).

26. Соломин, А.В. Повышение безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта [Текст] /А.В. Соломин, А.А. Зарифья // 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

27. 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.

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

29. 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.

#### **На диссертацию поступили отзывы:**

**- ведущей организации – ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ).** Отзыв положительный. Замечания: **1** Линейные тяговые устройства для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта могут быть выполнены не только на основе линейных асинхронных двигателей, но и на базе линейных синхронных машин. В диссертации отсутствует сопоставление линейных тяговых устройств с асинхронными и синхронными двигателями. **2.** В диссертации рассматриваются системы магнитолевитационного транспорта с размещением индукторов линейных асинхронных двигателей в путевой структуре. Как обеспечить энергоснабжение индукторов ЛАД непосредственно на высокоскоростном экипаже, подвешенном в магнитном поле? **3.** Следовало более четко пояснить (гл. 2), в каких случаях при расчете тяговых линейных асинхронных двигателей необходим учет тока в лобовых частях обмотки индуктора. Насколько при таком учете тока повысится точность расчета тягового усилия? **4.** Следовало подробнее осветить вопросы способов изменения сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого тягового линейного асинхронного двигателя, особенно в машинах средней и большой мощностей. **5.** В диссертации отсутствует оценка величины поперечного усилия, возвращающего высокоскоростной экипаж МЛТ в симметричное положение при боковых смещениях при использовании в тяговых ЛАД конструкции вторичного элемента, представленной на рис. 6.4. **6.** В диссертации нет теоретических исследований в области нагрева тягового линейного асинхронного двигателя. С какой целью в гл. 9 приводятся результаты тепловых экспериментальных исследований ЛАД? **7.** Рисунки 1.9, рис. 7.5 и 8.1 во многом аналогичны. Достаточно привести, например, рис. 1.9. и сослаться на него в 7 и 8 главах. **8.** В диссертации нет сравнительной оценки систем высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с линейными тяговыми устройствами на базе ЛАД различного типа (с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком).

- **официального оппонента** – д.т.н., доцента Евстафьева Андрея Михайловича (заведующий кафедрой «Электрическая тяга» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра 1» (ФГБОУ ВО ПГУПС)). Отзыв положительный. Замечания: **1.** Целесообразность применения линейных асинхронных двигателей 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 использованы в относительно низкоскоростных транспортных системах (до 100-120 км/ч). Это связано с тем, что влияние продольных краевых эффектов особенно сильно проявляется 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 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 во второй главе о характере изменения X Y-компонент плотности тока индуктора 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, 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.

- **официального оппонента** – д.т.н., проф. Коняева Андрея Юрьевича (профессор кафедры «Электротехника и электротехнологические системы» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (ФГАОУ ВО УрФУ). Отзыв положительный. Замечания: **1.** Список литературы содержит 262 наименования. Однако из них только около 30 публикаций зарубежных авторов, при этом датированных 1960-1980 гг. Оценивалось ли современное состояние разработок по рассматриваемой теме за рубежом? **2.** При моделировании ЛАД никак не учитываются продольные краевые эффекты, влияние которых особенно проявляется при больших скоростях движения. Оценивались ли указанные явления? **3.** Для расчетов ЛАД в работе предлагается несколько аналитических моделей и методик расчета, основанных на разных подходах. В то же время возможности численных методов и современных компьютерных программ не использованы. **4.** В разделе 2 для упрощения расчетов предлагается замена реальных токов индуктора с сосредоточенными катушками токами, распределенными в воздушном зазоре по гармоническому закону. Выполнялось ли сопоставление картины магнитных полей в реальных ЛАД и в предлагаемой модели? **5.** Почему при анализе распределения токов в модели индуктора с поперечным потоком приведен пример только для малореального случая при ширине лобовой части катушки, равной половине полюсного деления (размер сосредоточенной катушки не может превышать полюсное деление)? **6.** Помимо сил самостабилизации при боковом смещении экипажа на вторичный элемент также действуют боковые выталкивающие электромагнитные силы, а также силы магнитного притяжения (при наличии обратного магнитопровода). Такие силы в диссертации не оценивались. **7.** Эффект поперечной самостабилизации в явном виде проявляется при ширине вторичного элемента меньше ширины индуктора. Однако в этом случае снижается тяговое электромагнитное усилие. Оценивалось ли такое противоречие? **8.** Общие замечания по структуре работы: диссертация перегружена решениями частных вопросов (например, три главы посвящены вопросам распределения токов индуктора и вторичных токов), характеристики новых ЛАД в режиме тяги, а также в режимах торможения и поперечной самостабилизации представлены скромно, явно недоиспользованы возможности экспериментальных исследований. **9.** Имеются отдельные замечания по оформлению диссертации: ошибки в записи уравнений (3.11) на стр. 71 и (3.18) на стр. 72; на рис. 7.5 и 8.1 направление тягового электромагнитного усилия не соответствует чередованию фаз обмотки; в тексте раздела 9.2 дана ссылка на схему замещения ЛАД, приведенную на рис. 9.1, но на рисунке показана конструкция двигателя; в отдельных главах оси координат меняются местами; при иллюстрации результатов расчетов данные ЛАД не приводятся, а даются ссылки на публикации (например, на рис. 8.7); в разделе 8.2. появился странный термин «электронное поле» (стр. 282, 286); имеются отдельные опечатки и неточности.

- **официального оппонента** – д.т.н., проф. Сапсалева Анатолий Васильевич (профессор кафедры «Электроника и электротехника» ФГБЦУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО (НГТУ-НЭТИ). Отзыв положительный. 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 отрицатель-

ное время. С точки зрения математики это допустимо, но какой физический смысл имеет здесь отрицательное 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 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 плавность регулирования скорости. По сравнению с чем? При частотно-токовом управлении ЛАД, очевидно, 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 символом « $\alpha$ » обозначено отношение « $\pi$ » к полюсному делению линейного асинхронного двигателя (гл. 2 – гл. 5), а в главе 6 этим же символом обозначена степень замыкания подвижным элементом проводников в пазе короткозамкнутой обмотки ВЭ регулируемого линейного асинхронного двигателя. **11.** В автореферате на стр. 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 стр. 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 стр. 13 этот коэффициент обозначен несвойственным ему индексом.

**На автореферат поступило 9 отзывов. Все отзывы положительные.**

**1. Отзыв** главного научного сотрудника АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ) д.т.н. **Науменко Н.С.** Замечания: **1.** Из текста автореферата не ясно, как влияет срединный эффект на точность расчета тягового линейного асинхронного двигателя? **2.** В автореферате не представлены сведения о величине усилий магнитной левитации, создаваемой самим линейным асинхронным двигателем тягового устройства МЛТ. **3.** На с. 11 (с. 19) не указаны позиции 1 и 2.

**2. Отзыв** зав. кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог» ФГБОУ ВО ОмГУПС, д.т.н., проф. **Черемисина В.Т.** Замечания: **1.** В автореферате не рассматриваются системы магнитолевитационного транспорта с линейными синхронными двигателями. **2.** В автореферате нет оценки величины электрических потерь, возникающих при регулировании сопротивления короткозамкнутой



обмотки вторичного элемента ЛАД. **3.** Имеются погрешности редакционного плана. Например, на рис. 11 на с. 19 нет обозначения позиций

**3. Отзыв** научного руководителя лаборатории кафедры «Механика, динамика и прочность» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» д.ф.-м.н., проф. **Погорелова Д.Ю.** Замечания: **1.** В автореферате нет сведений о возможностях применения ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком, работающих на новом принципе действия в других областях техники, например, в магнитолевитационных конвейерах и в устройствах для регулирования положения деталей в магнитном поле, сравнения систем МЛТ с линейными тяговыми устройствами на основе ЛАД различного типа. **2.** Из автореферата диссертации не ясно, насколько увеличится диапазон регулирования скорости при использовании в электроприводах регулируемых тяговых линейных асинхронных двигателей.

**4. Отзыв** д.т.н., проф. кафедры «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО ДВГУПС **Ли В.Н.** Замечания: **1.** На сколько повысится точность расчета тягового усилия ЛАД при учете токов в лобовых частях обмотки индуктора? **2.** Почему при исследовании магнитных полей тяговых линейных асинхронных двигателей не использованы современные численные методы расчета? **3.** Какие есть ограничения по величине тока при регулировании сопротивления короткозамкнутой обмотки линейного асинхронного двигателя?

**5. Отзыв** заместителя генерального директора по научной работе АО «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы им. А.Г. Иосифьяна (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», д.т.н., проф. **Гечи В.Я.** и начальника отдела общих научно-технических исследований АО «Корпорация «ВНИИЭМ» д.т.н., доц. **Захаренко А.Б.** Замечания: **1.** Определение параметров схемы замещения ЛАД на основе опытов холостого хода и короткого замыкания с расхождением с расчетными данными на 10% (стр. 26 автореферата) свидетельствует о линейности магнитной системы ЛАД. Не ясно, оптимально ли спроектирован макетный образец ЛАД? **2.** Вывод уравнения Лапласа относительно векторного магнитного потенциала для двумерной полевой задачи является известным (стр. 25 автореферата). Приводить его, возможно, не стоило. **3.** Все представленные зависимости получены аналитическим путем. Для анализа достоверности допущений, принятых при получении этих зависимостей, возможно, следовало бы воспользоваться одним из численных методов расчета. Например, метод конечных элементов.

**6. Отзыв** зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВО ОмГУПС, д.т.н., проф. **Харламова В.В.** Замечания: **1.** Из автореферата не ясно, какие основные научные результаты диссертации внедрены в организациях, перечисленных автором на стр. 8 автореферата? **2.** В автореферате недостаточно внимания уделено оценке адекватности полученных автором математических моделей и экспериментальной проверке достоверности основных научных результатов. **3.** На стр. 29 автореферата автор отмечает, что им «... решена научная проблема повышения эффективности использования линейных асинхронных двигателей на высокоскоростном МЛТ путем развития теории, что позволило повысить точность расчетов ...». Следовало уточнить, с какими другими известными методиками расчета проводилось сравнение и за счет чего достигнуто увеличение точности?

**7. Отзыв** д.т.н., проф. кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» **Галкиной Е.И.** Замечания: **1.** В автореферате нет сведений о том, как будет подаваться электроэнергия для питания линейных тяговых устройств высокоскоростных систем магнитолевитационного транспорта. **2.** В автореферате имеются ряд шероховатостей и редакционных погрешностей.

**8. Отзыв** д.т.н., проф. кафедры «Энергетика» ФГБОУ ВО «Горский государственный аграрный университет» **Гиоева З.Г.** Замечания: **1.** В автореферате нет сравнения систем МЛТ с линейными тяговыми устройствами на основе ЛАД различного типа. **2.** Из автореферата не ясно – каким образом на практике можно реализовывать перемещение подвижного элемента в регулируемом тяговом ЛАД?

**9. Отзыв** д.т.н., профессора кафедры «Электротехника и теплотехника» ФГБОУ ВО ПГУПС доц. **Никитина В.В.** Замечания: **1.** Диссертант утверждает, что ЛАД являются более перспективными для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, однако это весьма спорно, и веских аргументов в пользу этого утверждения в автореферате нет. **2.** Во второй главе диссертации разработана уточненная математическая модель для расчета плотности тока во вторичном элементе ЛАД с продольным магнитным потоком. Учитывает ли эта модель продольные краевые эффекты? **3.** Диссертантом получены многочисленные выражения для плотностей токов в индукторе и во вторичных элементах ЛАД. Однако конечный интерес должны представлять электромагнитные силы. К сожалению, результаты оценки этих сил, а также сведений, насколько повышается точность расчета этих сил при учете влияния лобовых частей обмоток ЛАД, в автореферате практически нет. **4.** Надежность и экономичность тяговых ЛАД с регулированием сопротивлений вторичного элемента контактно-механическим способом, которые представлены в шестой главе, требует дополнительного исследования и обоснования в сравнении с частотно-регулируемыми тяговыми ЛАД. **5.** По тексту автореферата встречаются формулировки «рациональные и оптимальные соотношения в тяговых ЛАД», «оптимизация силового взаимодействия», «зоны наиболее рационального использования ЛАД», «оптимальные значения плотности тока вторичного элемента», «оптимальные значения средней плотности тока». Смысл, который автор вкладывает в эти формулировки, не всегда ясен. Какой критерий оптимальности? Что значит «зоны наиболее рационального использования ЛАД? **6.** Имеют место опечатки. Например, последняя формула на стр. 11 очевидно содержит опечатку, иначе не соблюдается размерность. Последние формулы (18) на стр. 15, вероятно содержат опечатку.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации, согласно «Положению о присуждении ученых степеней», обоснован не только их высокой публикационной активностью в ведущих российских и зарубежных научных изданиях, но и достижением ряда фундаментальных результатов в области разработки и исследования перспективных высокоскоростных транспортных систем, средств повышения безопасности движения и многофункциональных электромеханических преобразователей энергии, а также их личными достижениями в области железнодорожного транспорта и электромеханики, их непосредственной причастностью к специальностям, по которым происходила защита диссертации, наличием опыта работы в области подготовки научных кадров, высшей квалификации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- **разработаны:** способ улучшения поперечной динамики и повышения безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с линейными тяговыми устройствами за счет использования встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей; математические модели линейных асинхронных двигателей с продольно-поперечным магнитным потоком, работающих на новом принципе действия, позволяющие определить соотношения для расчета характеристик линейных асинхронных двигателей (ЛАД) с учетом взаимного влияния распределения магнитного поля в воздушном зазоре, геометрическими размерами двигателя и скоростью движения экипажа МЛТ;

- **предложены:** метод, заключающийся в использовании результатов математического моделирования ЛАД с продольно-поперечным магнитным потоком для определения условий боковой стабилизации высокоскоростного экипажа МЛТ; метод определения коэффициента электромагнитной силы (тягового усилия) для тяговых линейных асинхронных двигателей с поперечным магнитным потоком, учитывающий распределение тока во вторичном элементе, величину воздушного зазора между экипажем МЛТ и его путевой структурой и влияние поперечного краевого эффекта и пути его снижения; способ регулирования скорости движения посредством применения линейного асинхронного двигателя с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента;

- **доказаны:** применимость для повышения безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта и создания многофункциональных линейных асинхронных двигателей путем использования принципа сочетания встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей с продольно бегущим магнитным полем; наличие экстремума плотности тока во вторичном элементе ЛАД и то, что экстремум занимает узкую область;

- **введены** понятия: «встречно бегущие в поперечном направлении магнитные поля»; «срединный эффект» для тяговых линейных асинхронных двигателей с поперечным магнитным потоком;

**Значимость исследования обоснована тем, что:**

- **доказаны:** работоспособность предложенного нового принципа сочетания в одном индукторе линейного асинхронного двигателя встречно бегущих поперечных магнитных полей с магнитным полем, бегущем в продольном направлении, наличие экстремума плотности тока во вторичном элементе линейного асинхронного двигателя; влияние срединного эффекта на величину электромагнитной силы ЛАД и способы его снижения путем направленного изменения геометрических размеров двигателя;

- **применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы:** математической физики, теории электромагнитного поля и электро-механического преобразования энергии, закон Ампера. Математический аппарат диссертации включает дифференциальное и интегральное исчисление функций одной или нескольких переменных, векторный анализ, комплексные числа, ряды Фурье;

- **изложены:** результаты математического моделирования ЛАД с продольным, поперечным и продольно-поперечным магнитным потоком, полученные на основании решения краевых задач и позволяющие получить соотношения для расчета тяговых усилий линейных асинхронных двигателей, результаты исследования особенностей регулирования линейных асинхронных двигателей с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента;

- **раскрыты:** пути решения проблемы повышения безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта за счет боковой самостабилизации экипажа относительно путевой структуры, пути создания новых конструкций многофункциональных линейных асинхронных двигателей, способ регулирования скорости линейных асинхронных двигателей при изменении сопротивления короткозамкнутой обмотки вторичного элемента;

- **изучены:** взаимосвязь использования нового принципа действия на основе встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей для создания перспективных высокоскоростных транспортных систем с повышенной безопасностью движения за счет создания боковых усилий поперечной самостабилизации; направления совершенствования линейных тяговых устройств на базе линейных асинхронных двигателей; закономерности увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений короткозамкнутой обмотки вторичного элемента регулируемого ЛАД при учете влияния вытеснения тока в пазу;

- **проведена модернизация:** метода расчета токов во вторичном элементе линейных асинхронных двигателей; метода регулирования скорости линейных асинхронных двигателей с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента при учете вытеснения тока.

#### **Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

- **разработаны и внедрены:** способ автоматической боковой самостабилизации экипажа высокоскоростного магнитолевитационного транспорта, основанный на новом принципе действия, повышающий безопасность движения, комплект конструкторской документации (рабочие чертежи), разработанные автором на основе результатов научных исследований;

- **определены:** перспективы практического использования принципа встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей для создания перспективных видов транспорта и многофункциональных преобразователей энергии;

- **созданы** на основе результатов математического моделирования линейных асинхронных двигателей практические рекомендации по направленному улучшению их технико-экономических характеристик, новые конструкции линейных асинхронных двигателей, защищенные 27 патентами на изобретения;

- **представлены** предложения по повышению точности расчета линейных тяговых устройств для магнитолевитационного транспорта на основе линейных асинхронных двигателей; по совершенствованию систем боковой стабилизации высокоскоростных транспортных экипажей на магнитном подвесе; по расширению пределов регулирования скорости ЛАД.

### **Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

- для экспериментальных работ использованы макетные образцы линейных асинхронных двигателей, разработанных при участии автора;
- **теоретические методы и подходы** базируются на методах математической физики, на фундаментальных законах теории электромагнитного поля и электромеханического преобразования энергии;
- **идея базируется:** на использовании нового принципа применения встречно бегущих в поперечном направлении магнитных полей в линейных тяговых устройствах для высокоскоростного магнитолевитационного транспорта для повышения безопасности его движения и для создания многофункциональных линейных асинхронных преобразователей энергии;
- **использованы** основные законы теории электромагнитного поля и электромеханического преобразования энергии, дифференциальное и интегральное исчисление функций одной или нескольких переменных, векторный анализ и комплексные числа;
- **установлена** достаточная сходимость теоретических результатов, полученных в диссертационной работе, с данными экспериментальных исследований;
- **использованы** методики анализа электромагнитных полей для определения параметров и характеристик тяговых линейных устройств на базе линейных асинхронных двигателей для магнитолевитационного транспорта.

### **Личный вклад соискателя состоит в:**

- в разработке принципа встречно бегущих в поперечном движению высокоскоростного магнитолевитационного транспорта (МЛТ) магнитных полей, позволившем создать линейные тяговые устройства с продольно-поперечным магнитным потоком, повышающие безопасность движения нового вида транспорта;
- в развитии основ теории тяговых ЛАД на базе аналитических решений краевых задач, что повысило точность расчета тяговых усилий и энергетических характеристик ЛАД;
- в решении задач по определению оптимальных значений плотности тока во вторичном элементе тягового ЛАД;
- в разработке и исследовании нового типа тягового ЛАД с изменяемым сопротивлением короткозамкнутой обмотки вторичного элемента, применение которого для магнитолевитационного транспорта позволит улучшить пусковые и тормозные характеристики нового вида транспорта; в создании теории расчета усилий поперечной стабилизации экипажа МЛТ, улучшающих его боковую динамику;
- в непосредственном участии при выполнении численно-аналитических расчетов, планировании экспериментов и обработке опытных данных;
- в разработке инновационных конструкций тяговых линейных асинхронных двигателей, защищенных 27 патентами на изобретения.

**Диссертация охватывает** основные вопросы поставленных научных проблем и задач, обладает внутренним единством, что подтверждается корректной постановкой цели и задач исследований; содержит новые научные результаты, а также свидетельства личного вклада автора в науку.

На заседании «19» октября 2020 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Соломина Андрея Владимировича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, включающую теоретические основы и технические решения по улучшению поперечной динамики и повышению безопасности движения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта с линейными тяговыми устройствами, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, в котором изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение эффективности тяговых линейных электродвигателей для систем магнитолевитационного транспорта, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие транспортной и электротехнической отраслей страны, соответствует требованиям п.п. 9-11, 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 02.08.2016) к докторским диссертациям, и принял решение присудить Соломину Андрею Владимировичу ученую степень доктора технических наук по специальностям 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» и 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

При проведении открытого голосования членов диссертационного совета в количестве 20 человек, из них 8 докторов наук по специальности 05.22.07 и 5 докторов наук по специальности 05.09.01, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 5 человек, проголосовали: за – 19, против – нет, воздержались – 1.

Заместитель председателя диссертационного  
совета Д 218.010.01  
д.т.н., профессор



*Жарков Юрий Иванович*  
Жарков Юрий Иванович

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 218.010.01  
д.т.н., профессор

*Щербак Петр Николаевич*  
Щербак Петр Николаевич

«19» октября 2020 г.