Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.3.031:629.3.06

С. А. Гулин, В. В. Никитин, Г. Е. Середа, Е. Г. Середа
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ЭКИПАЖЕЙ С ЛИНЕЙНЫМ СИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Дата поступления: 27.08.2016

Решение о публикации: 30.08.2016

Дата публикации: 30.09.2016

Аннотация: **Введение.** В системе линейного тягового привода высокоскоростных экипажей, движущихся со скоростями 350-450 км/ч, целесообразно применение синхронного двигателя, обмотка статора которого располагается на путевой структуре, а источники постоянного магнитного поля (постоянные магниты, сверхпроводниковые электромагниты в режиме "замороженного потока", объемные сверхпроводники) размещаются на экипаже. Такая система высокоскоростного тягового привода не требует подвижного токосъема для питания тягового привода, что является ее весьма существенным преимуществом. Отсутствие подвижного токосъема на высокоскоростном экипаже предполагает использование бесконтактной системы питания потребителей собственных нужд.

Цель. Целью работы является анализ вариантов организации системы бесконтактного электроснабжения потребителей собственных нужд высокоскоростных магнитолевитационных экипажей с линейным синхронным тяговым приводом.

Метод. Рассматриваются массогабаритные и энергетические параметры источников питания собственных нужд магнитолевитационных экипажей, анализируются области применения источников питания.

Результаты. Для бесконтактного питания потребителей собственных нужд магнитолевитационных экипажей с электродинамическим подвесом целесообразно использование линейных индукторных генераторов и аккумуляторных батарей. Для магнитолевитационных экипажей с электромагнитным подвесом целесообразно использовать линейный генератор, линейный трансформатор и аккумуляторные батареи.

Практическая значимость. Результаты могут быть использованы при создании отечественного коммерческого высокоскоростного пассажирского транспорта на магнитном подвесе.

Заключение. Выбор сочетания источников питания потребителей собственных нужд (ПСН) определяется типом магнитного подвеса экипажа. При электромагнитном подвесе целесообразно использование линейного трансформатора, линейного генератора индукторного типа и аккумуляторных батарей. При электродинамическом

подвесе с использованием сверхпроводниковых магнитных систем целесообразно применение линейного генератора и аккумуляторных батарей.

Ключевые слова: высокоскоростной наземный транспорт, магнитный подвес, линейный генератор, линейный трансформатор.

Sergey A. Gulin, Victor V. Nikitin, Gennady E. Sereda, Evgeny G. Sereda
Emperor Alexander I Petersburg State Transport University
**AUXILIARY POWER SUPPLY SYSTEMS FOR HIGH SPEED MAGLEV
VEHICLES WITH LINEAR SYNCHRONOUS TRACTION MOTORS**

Abstract: Introduction. In linear traction drives of high speed vehicles moving with velocities about 350 – 450 km/h it is expedient to use synchronous motors with stator winding located on track structure and constant magnetic field sources (permanent magnets, superconducting windings or bulk superconductors) located on the vehicle. Such high speed traction system does not require the moving contact for its power supply and it means a considerable advantage of system. Lack of a moving contact on the vehicle involves also the use of contactless system for auxiliary power supply.

Purpose. The purpose of the paper is to analyze the versions of contactless auxiliary energy consumers power supply of high speed maglev vehicles with synchronous traction motors.

Method. Weight, size and energy parameters of maglev vehicles power supply sources for auxiliary consumers are discussed and their areas of use are analyzed.

Results. For contactless power supply of auxiliary energy consumers of maglev vehicles with electrodynamic suspension it is expedient to use linear induction generators and rechargeable batteries. For maglev vehicles with electromagnetic suspension it is expedient to use linear generators, linear transformers and rechargeable batteries.

Practical significance. Results may be used for creation of national commercial high speed maglev transport.

Conclusion. The choice of combination of power supply sources for auxiliary consumers is determined by vehicle magnetic suspension type. For vehicles with electromagnetic suspension it is expedient to use linear transformers, linear induction generators and rechargeable batteries. For vehicles with electrodynamic suspension use superconducting magnetic systems it is expedient to use linear generators and rechargeable batteries.

Key words: high speed transport, magnetic suspension, linear generator, linear transformer.

Введение

Транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом обладает рядом существенных преимуществ перед традиционным транспортом, использующим систему колесо-рельс: возможность реализовывать большее тяговое усилие за счет того, что оно не лимитируется условиями сцепления движущего колеса с рельсом; меньшие габариты подвижного состава за счет

отсутствия громоздких ходовых частей (важно для городского транспорта); меньший уровень шума.

Магнитолевитационные транспортные системы, осуществляющие пассажирские перевозки, находятся в опытной эксплуатации в Китае, Японии, Южной Корее [1–6]. Существуют проекты развития магнитолевитационных транспортных систем для пассажирских и грузовых перевозок в других странах, включая Россию [7, 8].

Общепризнано [1–5], что перспективные транспортные средства с линейным тяговым приводом и магнитным подвесом, способные осуществлять пассажирские перевозки с высокими скоростями (350 – 450 км/ч), могут составить реальную конкуренцию авиационному транспорту на расстояниях до 500-1000 км.

Несмотря на ограниченное применение транспортных систем с магнитным подвесом экипажей, к настоящему времени сформировалась следующая тенденция. Транспортные системы на магнитном подвесе для перевозок со скоростями до 100 км/ч (LINIMO – Япония, ROTEM – Южная Корея) выполняются с линейным асинхронным тяговым приводом, в системах TRANSRAPID (коммерческая линия Шанхай – аэропорт Пудонг, Китай) и MLX (опытная линия Яманаши, Япония), предназначенных для перевозок со скоростями до 400-500 км/ч, использован линейный синхронный тяговый привод.

В дальнейшем изложении принято деление потребителей энергии на системы электроснабжения тяговых нужд (тяговый электропривод) и системы электроснабжения собственных нужд, включая подвес, направление, освещение, климат-контроль и др. В настоящей статье рассматриваются вопросы энергообеспечения потребителей собственных нужд (ПСН).

В системах линейного тягового привода высокоскоростных экипажей целесообразно применение синхронного двигателя (ЛСД), обмотка статора которого располагается на путевой структуре и получает питание от тяговых подстанций посекционно, по мере движения экипажа, а на самом экипаже располагаются источники постоянного магнитного поля (постоянные магниты, сверхпроводниковые электромагниты в режиме "замороженного потока", объемные сверхпроводники). Такая система высокоскоростного тягового привода не требует подвижного токосъема для питания тягового привода, что является ее весьма существенным преимуществом. Наряду с задачей тягового энергообеспечения не менее важной задачей является обеспечение электропитания потребителей собственных нужд: электромагнитов подвеса и направления, освещения, климатической установки, информационных табло, системы внутреннего оповещения, прожектора, сигнальных фонарей и т.п. Отсутствие подвижного токосъема предполагает бесконтактную передачу энергии для питания бортовых ПСН.

Основными источниками бесконтактного электроснабжения ПСН на экипажах ВСНТ с магнитным подвесом являются линейные генераторы и линейные трансформаторы, вспомогательными – аккумуляторные батареи.

1. Линейные генераторы

В ВСНТ с магнитным подвесом и ЛСД линейные генераторы (ЛГ) обеспечивают питание ПСН на высоких скоростях движения, обычно выше 100-200 км/ч, поскольку ЭДС и мощность, вырабатываемая ЛГ, зависит от скорости экипажа. Использование различных систем подвеса экипажей TRANSRAPID (электромагнитный подвес) и MLX (электродинамический подвес) обусловило различия в мощности и конструктивном исполнении ЛГ.

1.1. Линейный генератор TRANSRAPID. ЛГ системы TRANSRAPID является линейным индукторным генератором; его основной нагрузкой являются электромагниты подвеса, что определяет весьма существенную мощность ЛГ (до 12-14 кВт/м). Принцип действия ЛГ основан на наведении ЭДС в обмотках генератора пульсирующей составляющей магнитного поля, которое создается бортовыми электромагнитами постоянного тока, выполняющими в рассматриваемой системе одновременно функции возбуждения ЛСД и подвеса экипажа. Пульсации магнитного потока создаются при движении обмоток ЛГ относительно зубцовой структуры пути, в которой уложены трехфазные обмотки статора ЛСД. Таким образом, бортовые электромагнитные модули (рис. 1) выполняют тройную функцию: создают поле возбуждения ЛСД, служат электромагнитами подвеса и несут на себе обмотку индуктора ЛГ [6, 9]. Поскольку частота индуцируемой ЭДС ЛГ зависит от скорости движения, бортовая сеть ПСН питается выпрямленным напряжением.

На вагоне TRANSRAPID размещены восемь электромагнитных модулей, каждый модуль состоит из двенадцати электромагнитов [10]. Конструкция генератора представлена на рис. 2. Частота ЭДС, наводимой в обмотке ЛГ, в шесть раз превышает частоту тока статора ЛСД.

В реальных условиях ЛГ может работать при воздействии ряда эксплуатационных факторов: изменения тока статора и тока возбуждения ЛСД, изменения нагрузки ЛГ, изменения воздушного зазора в системе подвеса.

Анализ показывает [10], что амплитуда ЭДС ЛГ практически не зависит от тока статора ЛСД и характеризуется весьма малым содержанием высших гармоник (наиболее выражена вторая гармоника). При скорости 80 км/ч суммарная ЭДС десяти центральных магнитов ЛГ одного электромагнитного модуля экипажа TRANSRAPID достигает 450 В. Ток возбуждения ЛСД влияет на ЭДС ЛГ существенно: с ростом тока возбуждения ЛСД растет амплитуда основной гармоники ЭДС ЛГ. (рис. 3).

Кроме этого, существенное влияние на амплитуду основной гармоники ЭДС ЛГ оказывает величина воздушного зазора (рис. 4).

Рис. 1. Электромагнитный модуль TRANSRAPID (слева) и электромагнит в разрезе (справа).

1 – сердечник, 2 – обмотка электромагнита подвеса,
3 – обмотка линейного генератора.

Рис. 2. Схема [10] линейного индукторного генератора TRANSRAPID (слева) и порядок укладки проводников обмотки генератора в полюсном наконечнике электромагнита (справа).

1 – ферромагнитопровод электромагнитного модуля,
2 – катушка электромагнита подвеса экипажа и возбуждения ЛСД,
3 – обмотка линейного генератора,
4 – обмотка статора ЛСД,
5 – ферромагнитопровод статора ЛСД.

Зависимости удельного напряжения и мощности ЛГ TRANSRAPID [9] представлены на рис.5.

Рис. 3. Зависимость амплитуды ЭДС ЛГ от тока возбуждения ЛСД. 1 – основная гармоника, 2 – вторая гармоника.

Рис. 4. Зависимость амплитуды ЭДС ЛГ от воздушного зазора в системе подвеса. 1 – основная гармоника, 2 – вторая гармоника.

1.2. Линейный генератор MLX. Магнитолевитационная система MLX (испытательный полигон Яманаши, Япония) принципиально

Рис. 5. Зависимости удельного напряжения (1) и удельной мощности (2) ЛГ TRANSRAPID от тока нагрузки.

отличается от системы TRANSRAPID: тяговое усилие создается ЛСД с использованием сверхпроводящих магнитов, создающих поля с высокой индукцией. По этой причине в ЛСД отсутствует стальная зубчатая структура. Однако так же, как в системе TRANSRAPID, основным источником питания бортовых ПСН является линейный генератор.

Обмотки ЛГ (рис. 6) размещены на наружной поверхности криостата тележки, в котором помещаются сверхпроводящие магниты

(СПМ). Катушки ЛГ, также как и левитационные катушки, имеют 8-образную форму. При движении экипажа в левитационных катушках, расположенных вдоль путевой структуры с зазором 80 мм относительно катушек ЛГ, за счет магнитного поля СПМ индуцируются токи. Подъемная сила создается при взаимодействии магнитного поля токов, наведенных в левитационных катушках с магнитным полем бортовых СПМ. Поскольку на

путевой структуре размещены дискретные левитационные катушки, катушки ЛГ на экипаже пронизываются магнитным полем, содержащим переменную составляющую [11, 12]. Эта переменная составляющая

Рис. 6. Конструкция ЛГ системы MLX.

Рис. 7. Зависимости относительной мощности (1), КПД η (2) и коэффициента мощности λ (3) ЛГ MLX от скорости движения экипажа.

экипажа, которые отслеживаются по сигналам датчика виброускорений, установленного на тележке. Данная система гашения колебаний обладает более высоким быстродействием, чем традиционные гидравлические или пневматические системы.

Расчетная мощность двух ЛГ, расположенных на одной тележке, составляет 2*25 кВт. На рис.7 [13] представлены кривые, полученные в

магнитного поля наводит в катушках ЛГ ЭДС, которая через

ШИМ-преобразователь, выполненный по трехфазной мостовой схеме, питает бортовую сеть ПСН постоянным напряжением 600 В. В системе MLX ЛГ в совокупности с преобразователем выполняет двоякую функцию: вырабатывает трехфазную систему ЭДС, весьма близкую к симметричной (несимметрия не более 4%, несинусоидальность не более 5%), и позволяет демпфировать колебания экипажа, возникающие за счет дискретной структуры левитационных катушек. ШИМ-преобразователь контролирует амплитуду и фазовый угол токов, индуцируемых в обмотках ЛГ: если фазовый угол отличен от нуля, то в системе взаимодействующих магнитов возникает вертикальная сила, создаваемая наведенными токами в обмотках ЛГ. ШИМ-преобразователь дает

возможность управлять дополнительной вертикальной силой путем управления фазовым углом индуцированных токов и демпфировать вибрации

результате опытных поездок экипажа MLX. Функционирование системы питания ПСН от ЛГ начинается при скорости экипажа свыше 200 км/ч, при скорости около 300 км/ч ЛГ выходит на расчетную мощность 25 кВт. Коэффициент мощности ЛГ во всем диапазоне скоростей (200 – 500 км/ч) поддерживается равным единице, КПД составляет 85-92%.

Система электроснабжения ПСН вагона MLX предусматривает возможность питания потребителей как от ЛГ при высоких скоростях движения, так и от аккумуляторных батарей при низких скоростях. При выходе на расчетную мощность ЛГ осуществляет подзаряд аккумуляторной батареи. Принципиальная схема системы электроснабжения ПСН MLX представлена на рис. 8.

Рис. 8. Принципиальная схема системы электроснабжения потребителей собственных нужд вагона MLX. ЛГ – линейный генератор, В – выпрямитель, И – инвертор, АКБ – аккумуляторная батарея, ПСН – потребители собственных нужд.

2. Линейный трансформатор TRANSRAPID

В ранних вариантах конструкции TRANSRAPID электроснабжение ПСН при низких скоростях и на стоянках осуществлялось от контактного рельса, размещенного на остановочных пунктах и вблизи них [14], что противоречило концепции бесконтактного электроснабжения во всем диапазоне скоростей, включая нулевую. Для проекта TRANSRAPID в Мюнхене была предложена и реализована на опытном полигоне более совершенная бесконтактная система электроснабжения на основе линейного трансформатора (ЛТ), обеспечивающая передачу энергии на экипаж, движущийся с малыми скоростями (вплоть до нулевой) вблизи остановочных пунктов и при стоянке.

ЛТ включает в себя первичную часть, размещаемую на путевой структуре и вблизи нее, и вторичную часть, размещаемую на экипаже.

ЭДС, наводимая во вторичной обмотке ЛТ, как известно, определяется выражением

$$E_2 = 2\pi f_1 M_{12} I_1 ,$$

где f_1 – частота тока первичной части;

M_{12} – взаимная индуктивность между первичной и вторичной частями ЛТ;

I_1 – ток первичной части.

Воздушный зазор между первичной и вторичной частями ЛТ составляет около 40 мм, поэтому взаимная индуктивность невелика. Для того, чтобы обеспечить требуемую ЭДС и мощность трансформатора при таком воздушном зазоре [15], рабочая частота линейного трансформатора составляет $f_1=20$ кГц. Кроме этого, цепь первичной части ЛТ путем последовательного включения конденсаторов настраивается на резонанс напряжений при рабочей частоте, что позволяет снизить сопротивление цепи переменному току. Для стабилизации величины ЭДС первичная цепь должна питаться от источника тока.

Стационарные компоненты системы (рис. 9) питаются от внешней трехфазной системы электроснабжения 20 кВ, 50 Гц через понижающий трансформатор и преобразователь частоты. Выходное однофазное напряжение инвертора – 400 В, 20 кГц, имеет прямоугольную форму. Выходной источник питания первичной обмотки ЛТ является источником тока и преобразует напряжение инвертора в синусоидальный ток с действующим значением 200 А, 20 кГц. Энергия по коаксиальному кабелю (фидеру) подается на первичную обмотку ЛТ, которая размещена на путевом полотне в кабель-канале из стекловолокна. Первичная часть также включает в себя компенсирующие конденсаторы, которые включены последовательно в цепь первичной катушки через равные расстояния. Емкость конденсаторов подобрана так, чтобы обеспечить резонанс напряжений на частоте 20 кГц.

Мобильные компоненты системы (вторичная часть) размещены на экипаже. Вторичная обмотка ЛТ интегрирована в поверхность электромагнитов подвеса. К выходу вторичной (приемной) катушки подключен выпрямитель и повышающий преобразователь, которые обеспечивают питание ПСН (бортовой сети). Каждый вагон оборудован 32 приемными катушками (32 электромагнита подвеса), расположенными на внутренней поверхности модулей электромагнитов подвеса; для улучшения индуктивной связи катушки вторичной обмотки ЛТ дополнены ферромагнитными подложками. Ферромагнитные подложки выполняют также вспомогательную функцию – осуществляют электромагнитное экранирование системы питания ПСН от наведенных токов от прочего электрооборудования. Отмечается [14], что благодаря множеству параллельных каналов энергоснабжения, разработчикам удалось

существенно снизить диаметр питающих кабелей и оптимизировать их разводку по вагону.

Рис. 9. Система электроснабжения собственных нужд вагона TRANSRAPID с линейным трансформатором. ТР – трансформатор, ПЧ – преобразователь частоты, ИТ – источник тока, ЛТ – линейный трансформатор, В – выпрямитель, ИП – импульсный преобразователь повышающего типа, ПСН – потребители собственных нужд.

Заключение

Основными источниками энергии для бесконтактной системы передачи энергии на движущийся высокоскоростной экипаж ВСНТ являются линейный генератор индукторного типа и линейный трансформатор. Они должны быть дополнены бортовыми аккумуляторными батареями, выполняющими функции вспомогательного и/или аварийного источника питания.

Выбор конкретных комбинированных вариантов питания ПСН зависит от принятой системы магнитного подвеса экипажа. При электромагнитном подвесе необходима передача значительной мощности на экипаж уже при малых скоростях движения, поэтому бесконтактная система питания ПСН должна включать в себя ЛТ, ЛГ и аккумуляторную батарею. При электродинамическом подвесе на основе сверхпроводящих магнитов использование ЛТ нецелесообразно, поэтому в данном случае бесконтактная система электроснабжения ПСН должна выполняться на основе ЛГ и аккумуляторной батареи.

Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология; под ред. В. А. Гапановича. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.

2. Магнитолевитационный транспорт: научные проблемы и технические решения / под ред. Ю. Ф. Антонова, А. А. Зайцева. – М.: Физматлит, 2015. – 612 с.
3. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова; под ред. А. А. Зайцева. – СПб.: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 160 с.
4. Зайцев А. А. Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Железнодорожный транспорт, 2014. – № 5. – С. 69-73.
5. Антонов Ю. Ф. Технология HSST в проектах LINIMO и ROTEM / Ю. Ф. Антонов, В. В. Никитин, А. И. Хожайнов // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды I Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 29-31 октября 2013 г. – СПб: ООО PUDRA, 2013. – С.133-137.
6. Gieras J. & Piech Z. Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems. CRC Press, Boca Ration, London, New York, Washington DC, 2000. – 271 p.
7. Зайцев А. А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации / А. А. Зайцев // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 2-й Междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 17-20 июня 2014 г. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 8-21.
8. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная технология как транспортная стратегия грузовых и пассажирских перевозок / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев, А. Д. Корчагин, В. Ф. Юдкин // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии: труды 2-й Междунар. научн. конф. Санкт-Петербург, 17-20 июня 2014 г. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 22-49.
9. Andriollo M., Martinelli G., Morini A. & Tortella A. Optimization of the On-Board Linear Generator in EMS-MAGLEV Trains (Periodical Style), IEEE Transactions on Magnetics, 1997. – vol. 33, no.5, pp.4224-4226.
10. Guo Liang, Lu Qinfen & Ye Yunyue. FEM Analysis of the Linear Generator EMF in Maglev. International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China, 27-29 Sept., - 2005. – Volume 3, pp. 2112-2115.
11. Yamamoto T., Murai T., Hasegawa H., Yoshioka H., Fujiwara S. & Hatsukade S. Development of the Distributed-type Linear Generator with Damping Control. Quaterly Reports of RTRI, June, 2000. – Vol. 41, No 2, pp. 83-88.
12. Hasegawa H. & Matsue H. Development of a Linear Generator Integrated into an Existing Superconducting Magnet of Yamanashi Maglev Vehicle. Quaterly Reports of RTRI, Feb., 2004. – vol. 45, No 1, pp. 21-25.
13. Sakamoto Y., Kashiwagi T., Suzuki E., Yamamoto K. & Murai T. Development of Linear Generator Combined with Magnetic Damping Function. Quaterly Reports of RTRI, Feb., 2006. – vol. 47. – No 1. – pp. 18-23.

14. Bauer M., Becker P. & Zheng Q. Inductive Power Supply (IPS®) for the Transrapid. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Proc. 19th Intern. Conf., Dresden, 13-15 October 2006. – pp. 227-232.

15. Diekmann A., Hahn W., Kunze K. & Hufenbach W. The Support Magnet Cladding with Integrated IPS® Pick-up Coil of Transrapid Vehicles. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Proc. 19th Intern. Conf., Dresden, 13-15 October, 2006. – pp. 233-237.

References

1. Antonov Yu. F. & Zaitsev A. A. *Magnitolevitatsionnaya transportnaya tehnologia* [Magnetic Levitation Transport Technology]. Moscow, 2014. 476 p.

2. *Magnitolevitatsionnyi transport: nauchnye problemy i technicheskie reshenia* [Magnetic Levitation Transport: scientific problems and technical decisions]. Edited by Yu. F. Antonov & A. A. Zaitsev. Moscow, 2015. 612 p.

3. Zaitsev A. A., Talashkin G. N. & Sokolova Ya. V. *Transport na magnitnom podvese* [Transport on magnetic suspension]. St. Petersburg, 2010. 160 p.

4. Zaitsev A. A. *Zheleznodorozhny Transport – Railway Transport*, 2014, No5, pp. 69–73.

5. Antonov Yu. F., Nikitin V. V. & Khozhainov A. I. *Tehnologia HSST v proektah LINIMO i ROTEM* [HSST technology in LINIMO and ROTEM projects]. *Magnitolevitatsionnye transportnye systemy i tehnologii: trudy I mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 1st Int. Scientific Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2013, pp. 133–137.

6. Gieras J. & Piech Z. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. CRC Press, Boca Ration, London, NY, Washington DC, 2000. 271 p.

7. Zaitsev A. A. *Konteynerny most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove magnitnoi levitatsii* [Container bridge St. Petersburg – Moscow based on magnetic levitation] *Magnitolevitatsionnye transportnye systemy i tehnologii: trudy II mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 2nd Int. Scientific Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 8–21.

8. Antonov Yu. F., Zaitsev A. A., Korchagin A. D. & Yudkin V. F. *Magnitolevitatsionnaya tehnologia kak transportnaya strategiya gruzovykh i passaghirskikh perevozok* [Magnetic levitation technology as transport strategy for freight and passenger transportation] *Magnitolevitatsionnye transportnye systemy i tehnologii: trudy II mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. 2nd Int. Scientific Conf. "Magnetic Levitation Transport Systems and Technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 22–49.

9. Andriollo M., Martinelli G., Morini A. & Tortella A. Optimization of the On-Board Linear Generator in EMS-MAGLEV Trains (Periodical Style), IEEE Transactions on Magnetics, 1997, vol. 33, no.5, pp.4224–4226.
10. Guo Liang, Lu Qinfen & Ye Yunyue. FEM Analysis of the Linear Generator EMF in Maglev. International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China, 27–29 Sept., 2005. Volume 3, pp. 2112–2115.
11. Yamamoto T., Murai T., Hasegawa H., Yoshioka H., Fujiwara S. & Hatsukade S. Development of the Distributed-type Linear Generator with Damping Control. Quaterly Reports of RTRI, June, 2000, vol. 41, no 2, pp. 83–88.
12. Hasegawa H. & Matsue H. Development of a Linear Generator Integrated into an Existing Superconducting Magnet of Yamanashi Maglev Vehicle. Quaterly Reports of RTRI, Feb., 2004, vol. 45, No 1, pp. 21–25.
13. Sakamoto Y., Kashiwagi T., Suzuki E., Yamamoto K. & Murai T. Development of Linear Generator Combined with Magnetic Damping Function. Quaterly Reports of RTRI, Feb. 2006, vol. 47, no 1, pp. 18–23.
14. Bauer M., Becker P. & Zheng Q. Inductive Power Supply (IPS®) for the Transrapid. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Proc. 19th Intern. Conf., Dresden, 13–15 October 2006, pp. 227–232.
15. Diekmann A., Hahn W., Kunze K. & Hufenbach W. The Support Magnet Cladding with Integrated IPS® Pick-up Coil of Transrapid Vehicles. Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Proc. 19th Intern. Conf., Dresden, 13-15 October 2006, pp. 233-237.

Сведения об авторах:

ГУЛИН Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры "Электромеханические комплексы и системы" ФГБОУ ВО Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: pgups.emks@mail.ru

НИКИТИН Виктор Валерьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой "Электромеханические комплексы и системы" Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

СЕРЕДА Геннадий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Электромеханические комплексы и системы" Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

СЕРЕДА Евгений Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры "Электромеханические комплексы и системы" Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I

E-mail: g-pereda@mail.ru

Information about authors:

Sergey A. GULIN - Cand. Sc. (Tech.), senior researcher, associate professor of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PSTU) Electromechanical Complexes and Systems Department

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Victor V. NIKITIN - Dr. Sc. (Tech.), associate professor, head of PSTU Electromechanical Complexes and Systems Department

E-mail: victor-nikitin@nm.ru

Gennady E. SEREDA - Cand. Sc. (Tech.), associate professor, associate professor of PSTU Electromechanical Complexes and Systems Department

E-mail: gennady.sereda@mail.ru

Evgeny G. SEREDA - Cand. Sc. (Tech.), associate professor of PSTU Electromechanical Complexes and Systems Department

E-mail: g-pereda@mail.ru