

УДК 629.439.027.34:621.318.36

**Ю. Ф. Антонов, Н. К. Данилов, С. А. Казначеев,
Я. И. Мельников, Е. И. Морозова, Д. А. Усов, Е. А. Разин**
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕВИТАЦИИ И БОКОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАТФОРМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Дата поступления 07.09.2015

Решение о публикации 01.10.2015

Дата публикации 22.12.2015

Аннотация: в статье описано создание экспериментальной установки для исследования эффекта магнитостатической левитации с использованием магнитного рельса (как основания) и платформы с постоянными магнитами в сочетании с объемными высокотемпературными сверхпроводниками 2-го поколения (ВТСП).

Приводятся доказательства устойчивости гибридной схемы полюса, результаты измерения вертикальных и боковых сил и зависимости левитационного зазора от последовательности операций захолаживания высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения (ВТСП).

Приводится доказательство возможности достижения статической левитации с зазором более 10 мм при использовании объемных высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения и эффективность их применения для обеспечения боковой стабилизации.

Ключевые слова: статическая левитация; высокотемпературные сверхпроводники 2-го поколения; отечественная магнитолевитационная транспортная технология; грузовые магнитолевитационные транспортные системы.

**Yu. F. Antonov, N. K. Danilov, S. A. Kaznacheev,
Ya. I. Melnikov, E. I. Morozova, D. A. Usov, E. A. Razin**

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I

**DEVELOPMENT OF MODEL SETUP AND STUDY OF LEVITATION AND
LATERAL STABILIZATION OF THE PLATFORM WITH THE USE OF
HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS OF THE 2ND
GENERATION**

Abstract: the article describes the creation of an experimental setup to investigate the effect of magnetostatic levitation using magnetic rail (as a base) and platform with permanent magnets in combination with bulk high-temperature superconductors of the 2nd generation.

The article provides evidence of the stability of the hybrid pole, the measurement results of the vertical and lateral forces and the dependence of the levitation gap of the sequence of operations of cooling high-temperature superconductors of the 2nd generation.

The article provides evidence of the ability to achieve static levitation with a gap of more than 10 mm when using bulk high-temperature superconductors of the 2nd generation and the efficiency of their application to provide lateral stabilization.

Key words: static levitation; high-temperature superconductors of the 2nd generation; Russian magnetic levitation transportation technology; freight magnetic levitation transport system.

Введение

Использование постоянных магнитов в бортовых полюсах левитации, боковой стабилизации и линейной тяги исключает потребность активного контроля и этим упрощает бортовые системы, снижает вероятность отказов в работе, повышает их эффективность и надежность. Для обеспечения левитации, боковой стабилизации и линейной тяги не требуется подвод питания на борт транспортного средства через контактную сеть (как это имеет место в технологии HSST – в проектах Linimo, Rotem и АМТ) или использование бортовых источников в виде различного рода накопителей энергии (технологии Transrapid и Maglev). Весьма малые магнитные поля рассеяния исключают потребность в пассивных и активных магнитных экранах. Возможность получения сравнительно большого левитационного зазора снижает требования к точности изготовления активной путевой структуры и нижнего строения пути. Прямым следствием этого является снижение капитальных затрат (примерно вдвое по сравнению с известными технологиями) и упрощение технического обслуживания наземной инфраструктуры.

Для грузовых магнитолевитационных транспортных конвейеров на участках погрузки и разгрузки, а на участке разгона — достижение динамической левитации на малой скорости. Транспортная система с такими свойствами может быть построена на базе использования путевого магнитного рельса и бортового полюса из объемного высокотемпературного сверхпроводника 2-го поколения.

Целью разработки модельной установки является экспериментальное доказательство возможности достижения статической левитации с зазором более 10 мм на основе использования объемных высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения и эффективность их применения для обеспечения боковой стабилизации.

Предметные задачи для достижения поставленной цели состоят в следующем:

– создать экспериментальную установку для исследования эффекта магнитостатической левитации с использованием магнитного рельса (как основания) и платформы с постоянными магнитами в сочетании с объемными высокотемпературными сверхпроводниками 2-го поколения (ВТСП);

– доказать устойчивость гибридной схемы полюса, выполнить измерения вертикальных и боковых сил и зависимости левитационного зазора от последовательности операций захолаживания высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения (ВТСП);

– на базе полученных опытных данных и выполненных на их основе расчетов внести коррективы в отечественную магнитолевитационную транспортную технологию «МагТранСити» для ее адаптации к грузовым магнитолевитационным транспортным платформам, предназначенным для умеренно скоростных конвейеров.

Данная разработка является пионерской.

Проблемы статической левитации и боковой стабилизации при использовании постоянных магнитов

В соответствии с теоремой Самуэла Ирншоу (1842 г.) в системе тел, взаимодействующих посредством полей, потенциал которых изменяется обратно пропорционально расстоянию от источника и которые не способны к изотропному вытеснению полей взаимодействия из занимаемого пространства, устойчивое равновесие невозможно.

К полям, потенциал которых убывает пропорционально расстоянию от источника, относятся, в частности, гравитационное, магнитостатическое и электростатическое поля. Чтобы получить устойчивое равновесие в таких полях, необходимо сконструировать систему с минимумом потенциальной энергии в точке равновесия, т. е. создать в некоторой области пространства вокруг этой точки «потенциальную яму». Для этого можно использовать неоднородные среды, а также материалы, относительная диэлектрическая или магнитная проницаемость которых меньше, чем у окружающей их среды. Если окружающей средой является воздух, то устойчивое равновесие в магнитостатическом поле можно получить только используя диамагнетики. Относительная магнитная проницаемость диамагнетиков мало отличается от единицы. Поэтому сила, возвращающая тело к положению равновесия, будет невелика. В конструкциях систем левитации на постоянных магнитах имеется, как правило, хотя бы одна степень свободы, в направлении которой равновесие невозможно. Ограничение смещения по направлению исключенного равновесия в разрабатываемой модели обеспечивается с

помощью объемного высокотемпературного сверхпроводника 2-го поколения (2G ВТСП), охлаждаемого жидким азотом. Сверхпроводник является диамагнетиком. Он обеспечивает и левитацию, и боковую стабилизацию.

Таким образом, проектируемая система левитации на постоянных магнитах должна иметь максимальное рабочее усилие в вертикальном направлении (направлении взвешивания) и минимальное тангенциальное усилие при смещении бортового и путевого магнитных полюсов относительно друг друга в направлении исключенного (бокового) равновесия.

Технология сборки и монтажа магнитного рельса из постоянных магнитов

Для создания магнитолевитационного транспорта одним из наиболее рациональных и эффективных решений является использование полюсов из постоянных магнитов, собранных согласно расчетной схеме. Магнитный рельс моделирует бортовые магнитные полюса левитации и боковой стабилизации.

Магнитные полюса представляют собой набор элементарных магнитов оптимальных габаритов, ориентированных в пространстве таким образом, чтобы магнитная индукция в рабочем зазоре отвечала техническим требованиям, а магнитные поля рассеяния в пассажирском салоне или на грузовой платформе были весьма малыми. Выбираемая схема сборки магнитного полюса должна обеспечить защиту грузов и людей от влияния магнитного поля, снизить требования к защитным экранам, уменьшить объем используемых элементарных магнитов, в совокупности снизить стоимость производства подвижного состава.

При изготовлении магнитного рельса элементарные постоянные магниты, имеющие габариты 46x46x46 мм, собирались в квадратные трубы с поперечным сечением 50x50x50 мм и толщиной стенки 1,5 мм, выполненные из нержавеющей стали.

Необходимость модернизации производства по сборке магнитных полюсов

Для внедрения магнитолевитационной технологии требуется соответствующая производственная база. Для решения этой задачи, никогда еще не стоявшей перед производством, необходима реорганизация и модернизация оборудования и инструментов, а также разработка мер и техники безопасности на производстве.

Поскольку специальных производств на сегодняшний момент нет, проблемы, связанные с процессом сборки и с установкой магнитов, новы. Особые требования предъявляются и к перевозке магнитов, и к их хранению, и к оборудованию мест хранения и непосредственной сборки, а также к инструменту и оборудованию, необходимому в процессе производства. Возникает проблема со сборкой магнитов, так как используются крупногабаритные магниты, которые имеют притягивающее усилие более 100 кгс.

а) При перевозке магнитов возникает проблема, связанная с тем, что с завода магниты поступают в упаковке, проложенные между собой немагнитным материалом. Этот материал, как правило, достаточно мягкий и в процессе транспортировки может деформироваться под воздействием сил притяжения, возникающих между магнитами. Вследствие деформации расстояние между магнитами сокращается. Поэтому после доставки упакованных магнитов на место сборки возникает проблема с тем, чтобы отделить магниты друг от друга.

б) Изготовление магнитного полюса предполагает достаточно выстроенный технологический цикл с целью минимизации трудозатрат.

с) Если при сборке магнитов в трубах приходится преодолевать силы притяжения одного магнита до 100 кгс, то при сборке полюсов из труб с магнитами, учитывая, что в каждой трубе по 10 магнитов, силы притяжения возрастают в 10 раз. Полюса закрепляются промежуточными конструкциями из АМГ и крепятся к основной платформе.

д) При сборке полюса может возникнуть потребность выполнения сварки, заточки и т. д. В связи с этим требуется соблюдать температурный режим, чтобы не создавать условия, влекущие к изменению магнитных свойств постоянных магнитов.

е) Таким образом, обычное производство, где используется оборудование и грузозахватные механизмы, изготовленные из стали и иных магнитных материалов, где не продумана защита от магнитных полей персонала и электронных компонентов управления оборудованием, не подходит для сборки магнитных полюсов и должно быть адаптировано для этой цели.

ф) Опыт сборки магнитного рельса показал, что необходимо разрабатывать и внедрять в производство новые технологии, специализированное оборудование и инструмент, а также разрабатывать правила техники безопасности при работе с высокоэнергетическими магнитными материалами.

Из опыта изготовления магнитного рельса можно сделать следующие выводы по подготовке производства:

1) нельзя использовать только дешевые материалы, такие как конструкционная сталь. На производстве должны использоваться стали разных марок, алюминиевые сплавы, нержавеющие сплавы и применяться немагнитные материалы. Проблемы со стыковкой и последующей эксплуатацией металлов, используемых при производстве, а также антикоррозионной защитой этих металлов уже не так существенны, поскольку эти материалы используются в производстве достаточно давно и технологии работы с этими материалами уже отработаны; существуют современные защитные лакокрасочные покрытия, используемые и в морском судостроении;

2) для производства необходимо помещение с немагнитным, достаточно мягким полом, чтобы в случае падения хрупкие магниты не повреждались и не деформировались, так как повреждение магнитов вызывает нарушение диаграммы магнитных полей и такой магнит будет уже непригоден для производства. Кроме этого, должны быть немагнитные столы, немагнитный инструмент, изготовленный из маломагнитного материала;

3) важнейшей составляющей является отработка технологического процесса, исключающего травмирование рабочего персонала, и проработка системы техники безопасности;

4) необходимо разработать специальную тару для перевозки магнитов, исключающую их деформацию и слипание, а также систему транспортировки готовых изделий.

Одним из серьезнейших препятствий при проведении сборочных работ было отсутствие специального инструмента, приспособлений, технологического оборудования, а также оборудованных производственных помещений для работы с конструкциями из материалов, имеющих сильные магнитные поля. Но благодаря российским инженерам, участвовавшим в процессе сборки, была решена и эта задача. Было разработано уникальное технологическое оборудование, позволившее в кратчайшие сроки создать магнитолевитационную платформу с использованием постоянных магнитов.

В ходе работ были определены задачи по дальнейшему совершенствованию технологического оборудования, созданию новых инструментов и приспособлений, использованию в производстве новых материалов. Были конкретизированы требования к организации производства, была осознана необходимость подготовки специалистов для работы в условиях нового производства. Были разработаны требования по технике безопасности.

Для выполнения работ по сборке элементарного магнитного блока разработано специальное технологическое оборудование.

Выбор типа и марки элементарных постоянных магнитов

Спеченный постоянный магнит на основе сплава типа NdFeB (неодим-железо-бор) по сравнению с магнитами другого типа обладает более высокой эффективностью и малым отношением энергетических параметров к цене.

Магниты NdFeB значительно превосходят по магнитной индукции ферритовые магниты Fe-Ba, Fe-Sr или широко применяемые магниты типа ЮНДК (AlNiCo). Они имеют плотность энергии в 8-10 раз выше, чем ферритовые магниты. Постоянные магниты NdFeB обладают наибольшей магнитной силой из всех постоянных магнитов, известных науке в настоящее время. Магнитная индукция магнитов NdFeB 1,15 – 1,45 Тл. Теоретически предел магнитной индукции материала NdFeB ~ 1,6 Тл. Магниты NdFeB обладают наилучшими параметрами устойчивости к размагничиванию. Потеря магнитных свойств магнитов NdFeB во времени составляет ~ 2% в 5 лет.

Для выполнения работ по гранту выбраны магниты марки N35U, которые имеют следующие параметры: остаточная индукция 1,17 Тл, коэрцитивная сила по индукции 868 кА/м, коэрцитивная сила по намагниченности 955 кА/м, энергетическое произведение (BH)max 263 кДж/м³, диапазон рабочих температур: от -60 до + 800 С.

Для создания эффективных многополюсных систем, состоящих из элементарных магнитов, важным свойством элементарных магнитов является наличие у них высокой коэрцитивной силы. Это позволяет сбалансировать магнитную систему и достигнуть большей устойчивости к размагничивающим факторам.

Экспериментальное исследование подъемной силы и силы боковой стабилизации объемного высокотемпературного сверхпроводника второго поколения

Объект исследования: модель плоского азотного криостата с пластиной из объемного высокотемпературного сверхпроводника 2-го поколения (2G ВТСП) в медной матрице.

Габариты ленты 2G ВТСП 120x12x0,03 мм (без подложки). 30 слоев отрезков ленты из 2G ВТСП уложены крест-накрест и замоноличены медью. Габариты пластины 120x120x1 мм.

Азотный криостат выполнен в виде прямоугольной ванночки из отрезков медной пластины, соединенных медной пайкой. Тепловой изоляцией служит пенофлекс. Пластины для азотного криостата показаны на рисунке 1.

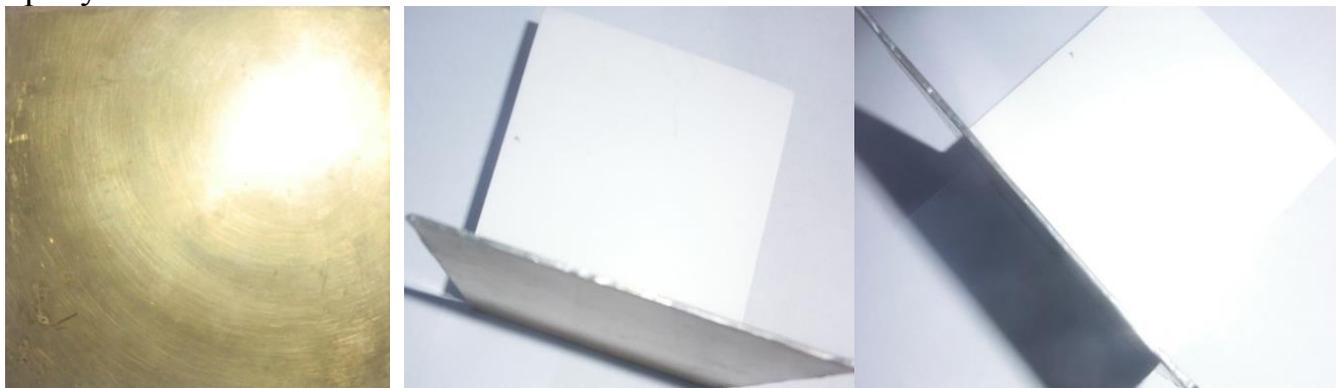


Рис.1. Пластины («коврики») для азотного криостата

Изготовлено две модификации магнитного рельса. Магнитный рельс А выполнен из постоянных магнитов NdFeB и ферромагнитных полюсов (рис.2).

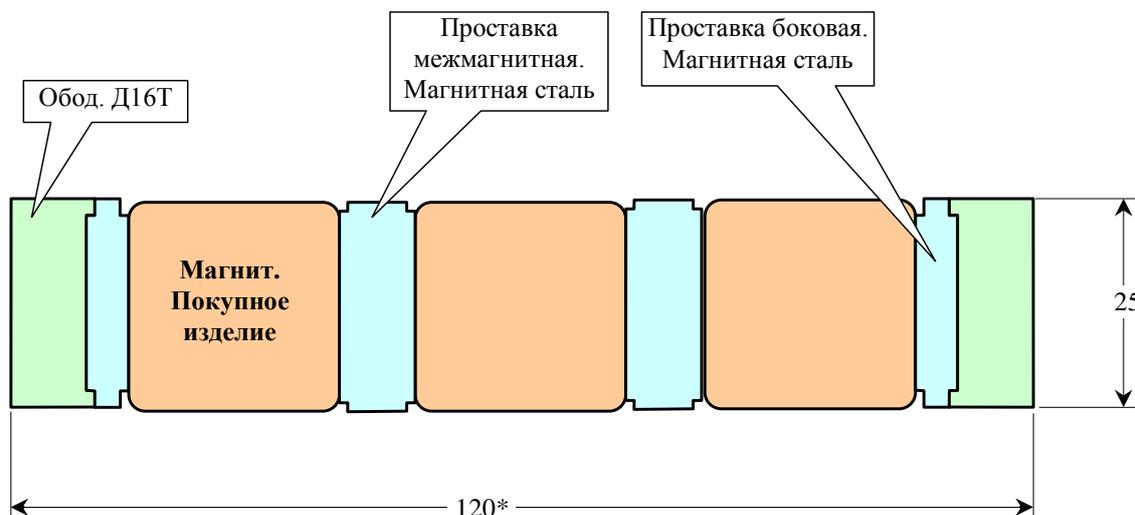


Рис.2. Поперечное сечение магнитного рельса А

Постоянные магниты имеют размеры 25x25x25 мм. Между магнитами имеются проставки шириной 8,5 мм. Боковые проставки имеют ширину 5 мм. В проставках сделаны выемки 1–2 мм для затекания в них эпоксидной смолы.

Обод представляет собой рамку, свинченную из дюралевых полос. Сверху и снизу эпоксидным клеем прикреплен лист из нержавеющей стали размерами 620x120x0,5 мм.

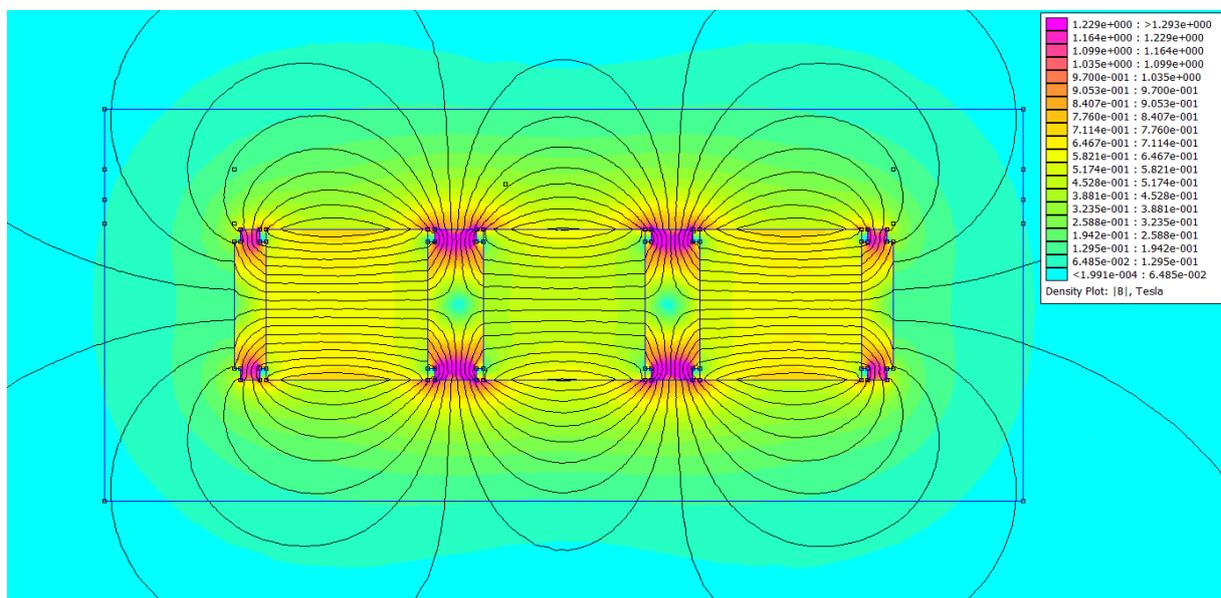


Рис.3. Линии равного магнитного потенциала магнитного рельса А

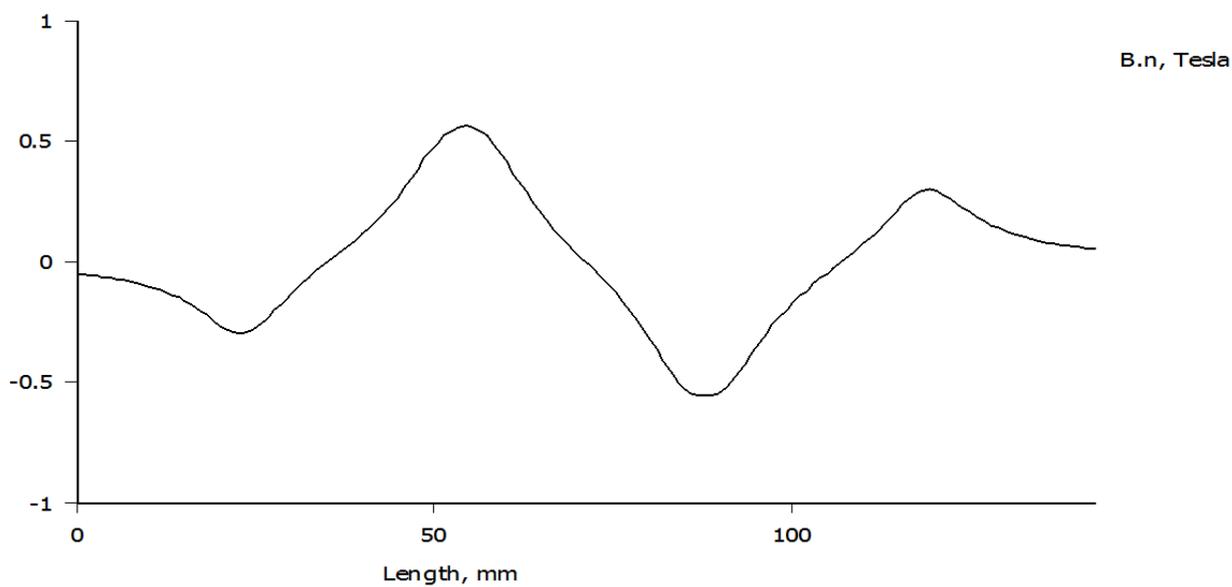


Рис.4. Нормальная (вертикальная) компонента магнитной индукции на высоте 4 мм над магнитным рельсом А

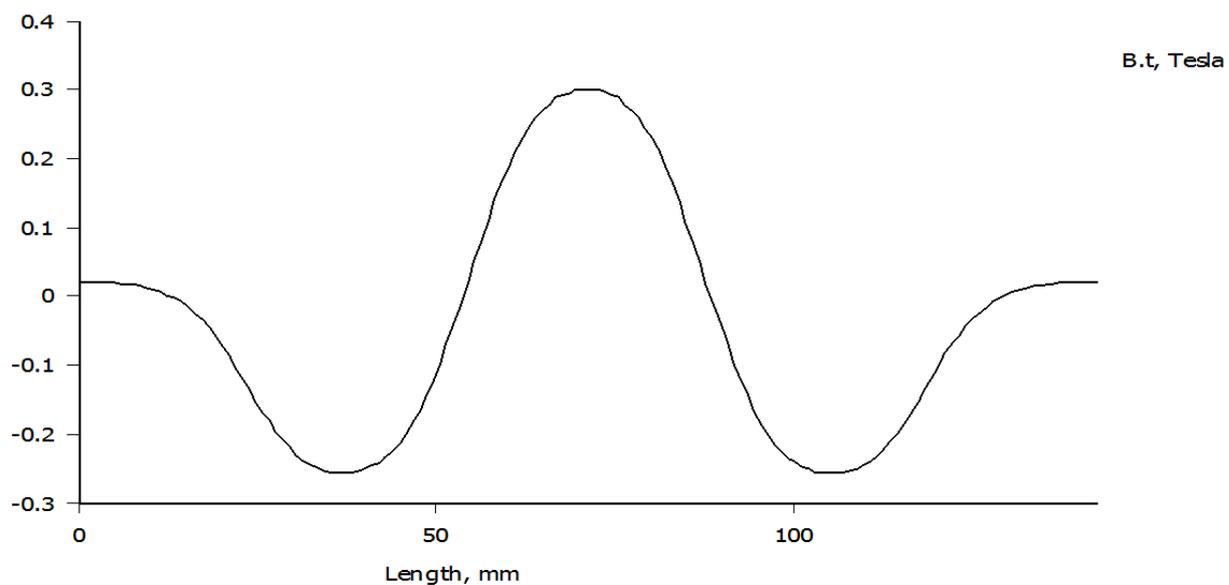


Рис.5. Тангенциальная (горизонтальная) компонента магнитной индукции на высоте 4 мм над магнитным рельсом А

Экспериментальная установка и технология выполнения эксперимента представлены на рисунках 6 – 10.



Рис.6. Экспериментальная установка с использованием ВТСП

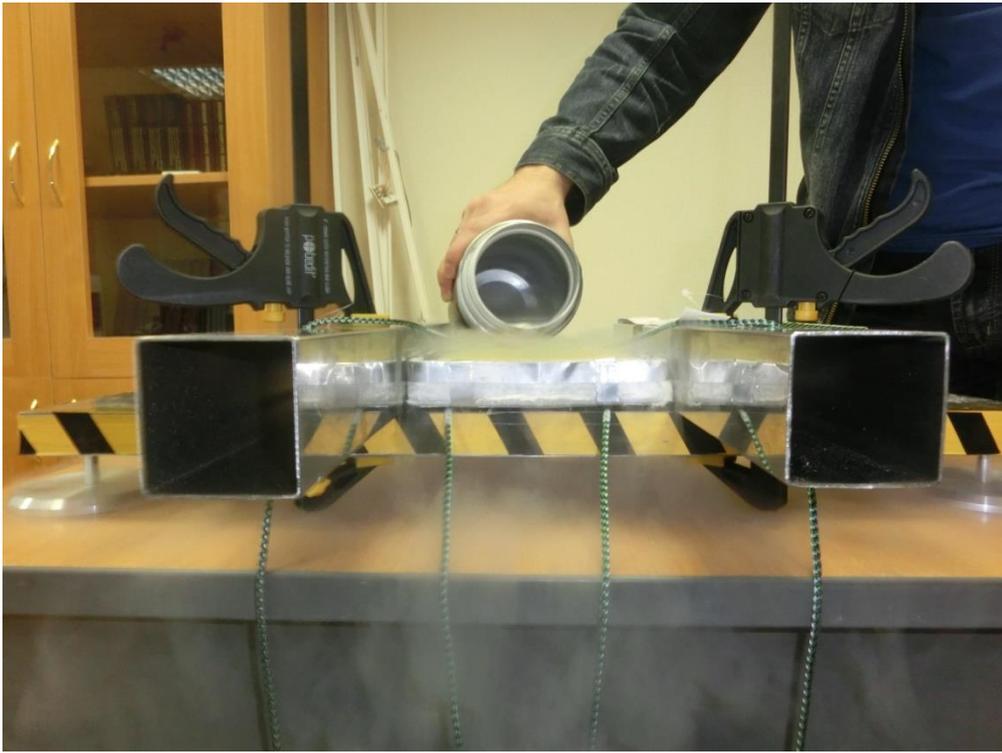


Рис.7. Захолаживание ВТСП жидким азотом



Рис.8. Демонстрация левитационного зазора

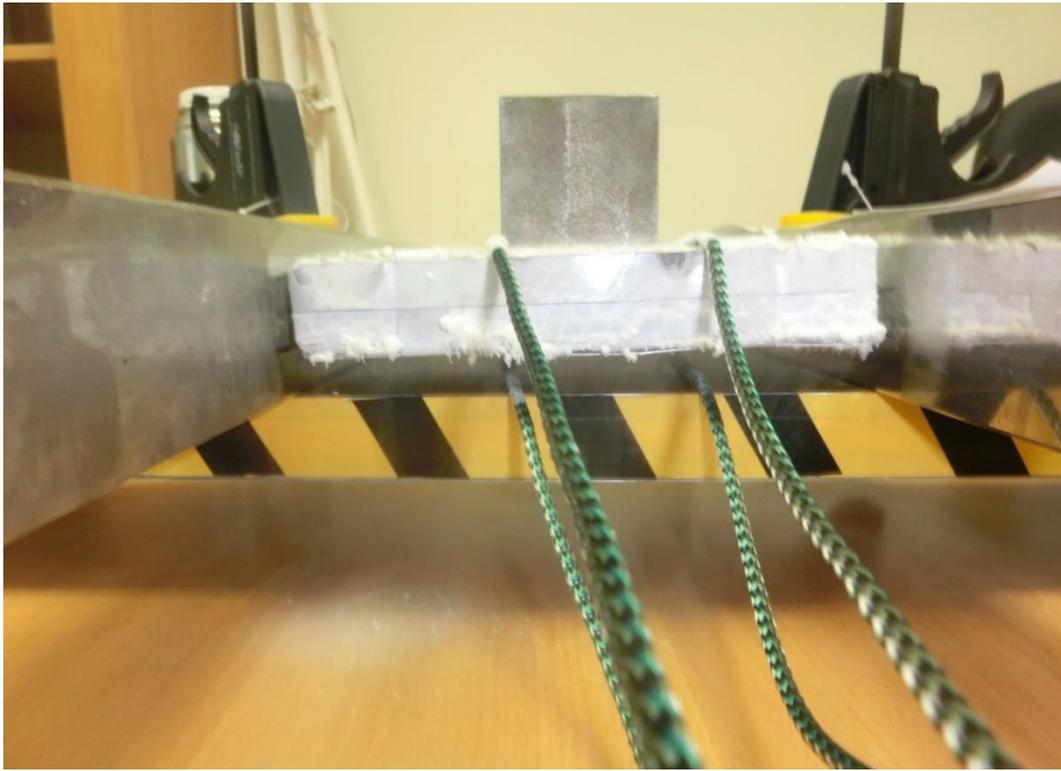


Рис.9. Демонстрация левитационного зазора под нагрузкой 1 кг (веревки применяются для испытания боковой устойчивости)



Рис.10. Демонстрация левитационного зазора

Анализ результатов эксперимента:

Площадь ВТСП пластины в медной матрице $24,4 \text{ см}^2$. Объем пластины $2,44 \text{ см}^3$. Количество лент в одной пластине – 300. Суммарная длина ленты, потребной для сборки – 36 м.

Поскольку при левитационном зазоре $h=10 \text{ мм}$ сила боковой стабилизации составляет 4,5 кг, то для обеспечения боковой силы стабилизации, равной 4 500 кг, понадобятся ВТСП пластины в медной матрице общей площадью $2,44 \text{ м}^2$, т. е. 1 000 пластин, использованных в эксперименте.

Потребная длина ВТСП ленты на изготовление 1 000 пластин – 36 км.

Приняв удельную плотность ВТСП $\gamma = 8 \text{ г/см}^3$, потребная масса ВТСП (без медной оболочки) $M = 2,44 \times 8 \times 1\,000 = 19\,520 \text{ г} = 19,52 \text{ кг}$.

Масса сборок ВТСП и медной оболочки $\sim 100 \text{ кг}$.

Масса магнитной системы с криостатами, жидким азотом и несущими конструкциями $\Sigma M \sim 500 \text{ кг}$.

Разработка модельной установки «б» на базе магнитного рельса с повышенными магнитными параметрами и малыми полями рассеяния

Модельная установка *Б* состоит из магнитного рельса (как основания) и платформы на базе термостата с объемным 2G ВТСП, охлаждаемым жидким азотом. Для исследования левитации и боковой стабилизации платформы с использованием 2G ВТСП выбрана оптимальная по массогабаритным и экономическим показателям схема сборки магнитного рельса с периодическим изменением полярности модульных магнитов в поперечном (боковом) направлении. Магнитный рельс имеет габариты 0,5 м и массу 45 кг. Он состоит из пяти модульных магнитов, представляющих собой тонкостенные (1,5 мм) трубы из нержавеющей стали с установленными в них десятью элементарными магнитами NdFeB с габаритами $46 \times 46 \times 46 \text{ мм}$. Модульные магниты закреплены между собой с помощью шпилек из нержавеющей стали. Объемный 2G ВТСП представляет собой свернутую в спираль ленту из 2G ВТСП производства компании SuperPower. Толщина ленты 0,1 мм, ширина 4 мм. Критический ток 150 А.

На рисунках 11 – 20 представлены основные этапы сборки магнитного рельса *Б* с повышенными магнитными параметрами.



Рис.11. Изготовление технологического оборудования для выполнения работ по сборке магнитного блока

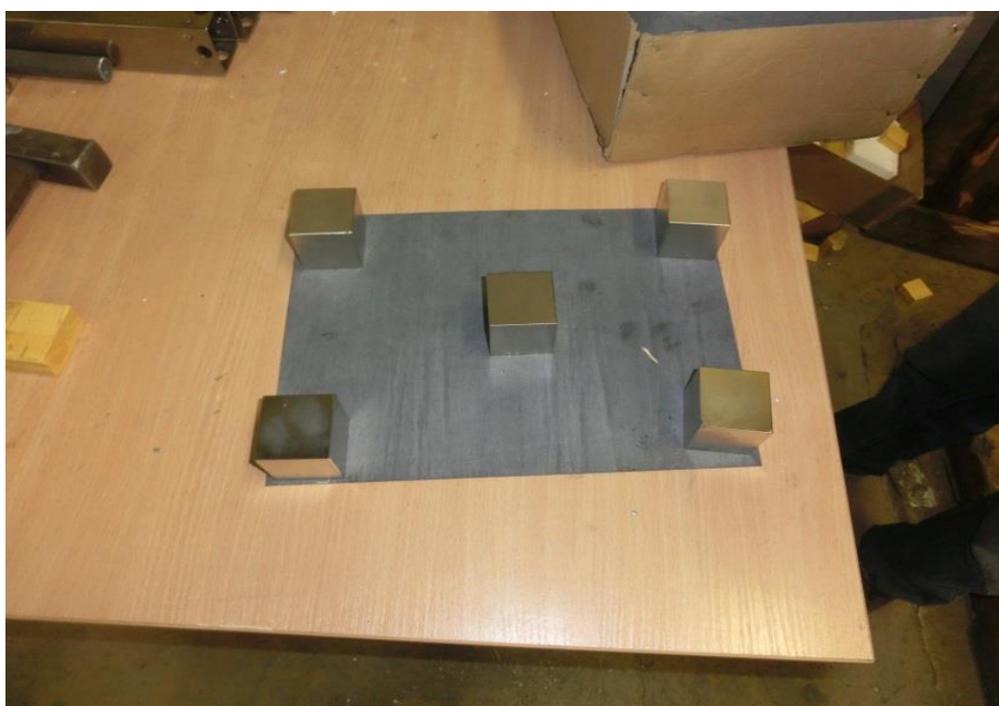


Рис.12. Магниты, подготовленные для установки в блок (после проверки направления намагниченности). Ферромагнитный лист для фиксации магнитов.



Рис.13. Установка магнита в элементарный блок



Рис.14. Устройство для установки магнитов в элементарный блок



Рис.15. Закрепление магнитов в элементарном блоке механическим способом (кернение)



Рис.16. Устройство для помещения магнитов в элементарный блок



Рис.17. Устройство для помещения магнитов в элементарный блок



Рис.18. Сборка рельса
(соединение магнитных блоков шпильками из нержавеющей стали)

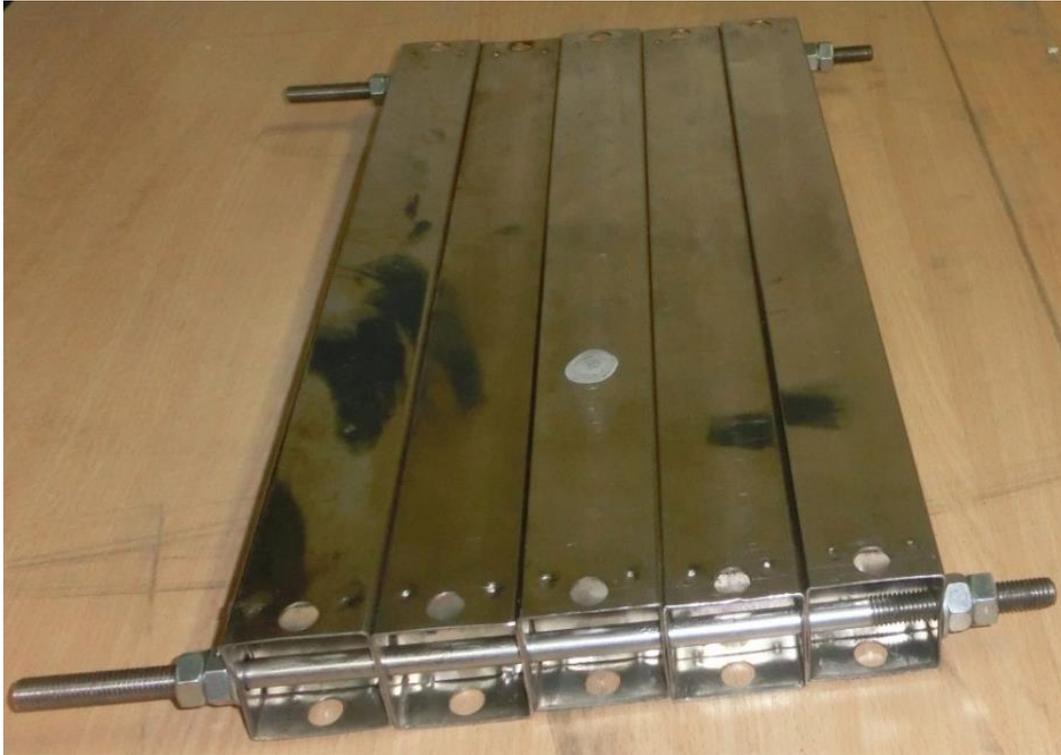


Рис.19. Магнитный рельс



Рис.20. Магнитный рельс

На рисунке 21 показаны расчетные линии равного магнитного потенциала магнитного рельса *Б*.

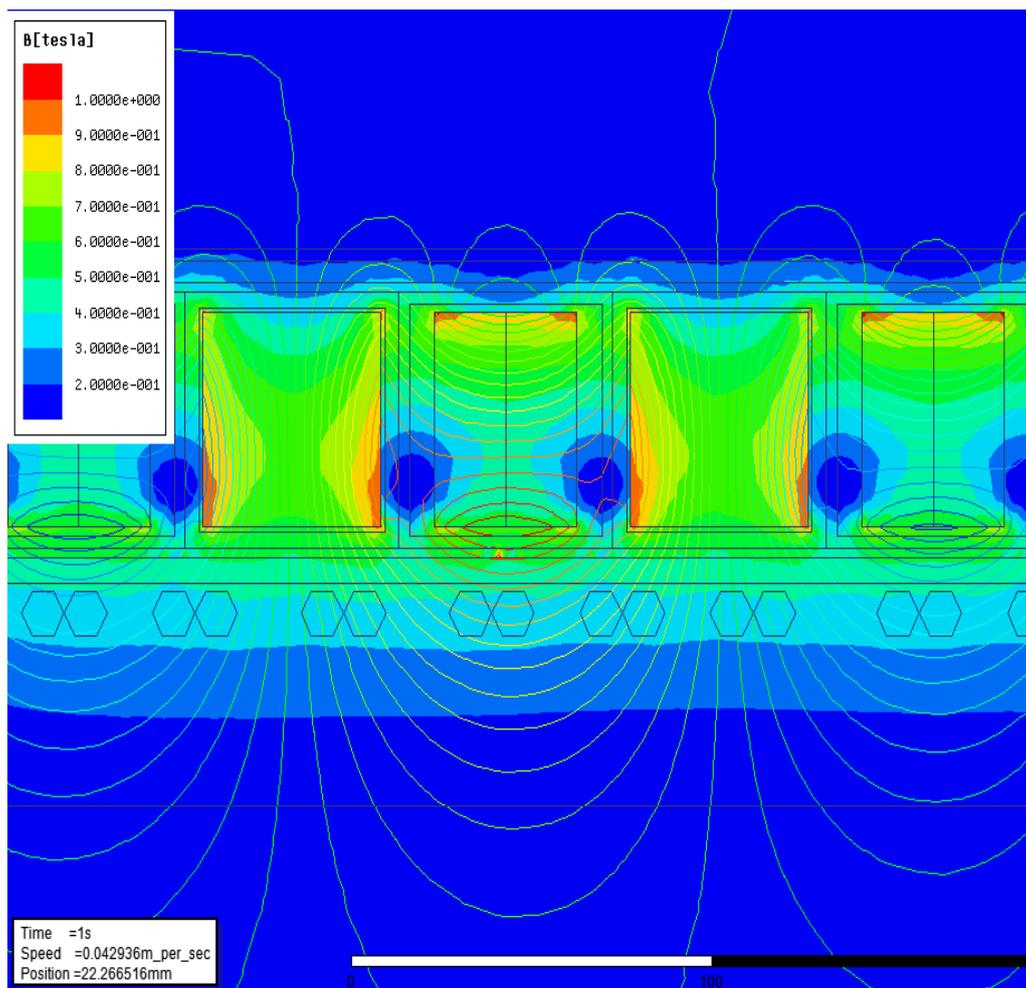


Рис.21. Расчетные линии равного магнитного потенциала магнитного рельса B

Заключение

Результаты эксперимента:

- Платформа заложена вне магнитного рельса и установлена над магнитным рельсом в отсутствие вертикальных внешних нагрузок (усилий). Левитационный зазор $h=32$ мм. Боковая стабилизация отсутствует.

Вывод: Наблюдается практически полный эффект Мейсснера (полное вытеснение магнитного поля из объёма проводника при его переходе в сверхпроводящее состояние), отсутствие проникновения магнитного поля в объём сверхпроводника и его зацепление за центры пиннинга (обменное смещение, особенность петель гистерезиса перематничивания магнитных материалов, проявляющаяся в несимметричном расположении петли относительно оси ординат. Наблюдается в слоистых и наноструктурных

магнитных материалах, содержащих магнитно мягкую ферромагнитную и высокоанизотропную антиферромагнитную фазу).

- Платформа с усилием прижата к магнитному рельсу с установлением левитационного зазора $h=27$ мм. Затем усилие снято. Левитационный зазор сохранился неизменным. Сила боковой стабилизации 2,5 кг.

Вывод: В результате прижатия платформы к магнитному рельсу магнитное поле частично проникает в объем сверхпроводника и зацепляется на центрах пиннинга. Частичный эффект Мейсснера обеспечивает левитацию, но зазор при этом меньше.

После доливки азота в платформу она поднялась на 2 мм, так что левитационный зазор достиг 29 мм.

Вывод: Более глубокое охлаждение платформы усиливает эффект Мейсснера.

- Платформа с усилием прижата к магнитному рельсу с установлением левитационного зазора $h = 10$ мм. Затем усилие снято. Левитационный зазор сохранился неизменным. Сила боковой стабилизации 4,5 кг. Вертикальная сила «на отрыв» платформы составила 2,5 кг.
- «Теплая» платформа лежит на магнитном рельсе. После ее захлаживания левитации нет. При этом боковая сила составила более 25 кг.

Вывод: Данный вариант испытаний дает возможность определения максимального значения силы боковой стабилизации.

- Платформа захлаживается вне магнитного рельса и установлена над магнитным рельсом. Левитационный зазор 26 мм. Платформа с усилием прижата к магнитному рельсу с установлением левитационного зазора $h = 15$ мм. Затем усилие снято. Левитационный зазор сохранился неизменным. После приложения внешней боковой силы и ее снятия платформа не возвращается в исходное положение, но занимает новое устойчивое положение.

Цель исследовательской работы достигнута. Предметные задачи решены. Дальнейшие исследования по данной тематике должны быть направлены на разработку эффективных способов и технических решений обеспечения боковой стабилизации для различных режимов движения магнитолевитационных транспортных средств.

Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
2. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационный транспорт – М.: Физматлит, 2015. – 611 с.
3. Чурин А. Е., Казначеев С. А. Технология сборки и монтажа полюсов из постоянных магнитов по схеме «arrayHalbach» / Тр. II междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – СПб: 2014. – С. 186–190.
4. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Морозова Е. И. / Узел левитации как обращенная асинхронная машина с короткозамкнутым ротором / Тр. II междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – СПб: 2014. – С. 258–268.
5. General Atomics Low Speed Maglev Technology Development Program (Supplemental #3). – Final Report. - FTA-CA-26-7025.2005. – May 2005.
6. Морозова Е. И. / К вопросу создания единой конвейерно-магистральной системы на основе магнитной левитации / Тр. I междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – СПб: ООО PUDRA, 2013. – С. 105–108.
7. Технология «МагТранСити» в проекте «Санкт-Петербургский маглев» / Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Морозова Е. И., Хозиков Ю. Ф./ Известия Петербургского университета путей сообщения – 2013. – № 4 (37) – С. 5–17.
8. Морозова Е. И. Будущее контейнерных транспортных коридоров / Транспорт: наука, техника, управление. – 2014. – № 1 – С. 73–74.
9. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Морозова Е. И. Исследование магнитодинамической левитации и электродинамического торможения грузовой транспортной платформы / Известия Петербургского университета путей сообщения – 2014. – № 4 (41) – С. 5–15.
10. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Морозова Е. И. Роль транспорта в становлении нового технологического уклада / Вестник транспорта – 2015. – № 2 – С. 26–30.

References

1. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transportation technology]. Moscow, 2014. 476 p.

2. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitacionnyj transport* [Magnetic levitation transport]. Moscow, 2015. 611 p.

3. Churin A. E., Kaznacheev S. A. Tekhnologiya sborki i montazha polyusov iz postoyannyh magnitov po skheme “arrayHalbach” [The technology of assembly and installation of the poles of permanent magnets on “arrayHalbach”] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. “Magnetic levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2014, pp. 186-190.

4. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I. Uzel levitacii kak obrashchennaya asinhronnaya mashina s korotkozamknutym rotorom [The levitation node drawn as an asynchronous machine with squirrel-cage rotor] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. “Magnetic levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2014, pp. 258-268.

5. General Atomics Low Speed Maglev Technology Development Program (Supplemental no. 3). - Final Report. - FTA-CA-26-7025.2005.

6. Morozova E. I. K voprosu sozdaniya edinoj konvejerno-magistral'noj sistemy na osnove magnitnoj levitacii [The question of creating a unified pipelined-bus systems based on magnetic levitation] *Trudy 1-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Works 1st Int. Sc. Conf. “Magnetic and levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2013, pp. 105-108.

7. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I., Hozikov Yu. F. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2013, no. 4 (37), pp. 5-17.

8. Morozova E. I. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie - Transport: science, technology, management*, 2014, no. 1, pp. 73-74.

9. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2014, no. 4 (41), pp. 5-15.

10. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I. *Vestnik transporta - Journal of transport*, 2015, no. 2, pp. 26- 30.

Сведения об авторах:

АНТОНОВ Юрий Федорович, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), д.т.н., профессор

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

МОРОЗОВА Евгения Игоревна, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), аспирант

E-mail: moroz98.88@mail.ru

КАЗНАЧЕЕВ Сергей Александрович, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), инженер

E-mail: 89602574975@yandex.ru

ДАНИЛОВ Николай Константинович, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), студент

МЕЛЬНИКОВ Ярослав Игоревич, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), студент

РАЗИН Евгений Алексеевич, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), студент

УСОВ Дмитрий Александрович, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), студент

Information about authors:

ANTONOV Yu. F., Petersburg State Transport University, Ph. D., Professor

E-mail: yuri-anto@yandex.ru

MOROZOVA E. I., Petersburg State Transport University, post graduate student

E-mail: moroz98.88@mail.ru

KAZNACHEEV S. A., Petersburg State Transport University, engineer

E-mail: 89602574975@yandex.ru

DANILOV N. K., Petersburg State Transport University, student

MELNIKOV Ya. I., Petersburg State Transport University, student

RAZIN E. A., Petersburg State Transport University, student

USOV D. A., Petersburg State Transport University, student