

ISSN 2413-9203

# ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

**TRANSPORTATION  
SYSTEMS AND  
TECHNOLOGY**  
peer-review journal

[transsyst.ru](http://transsyst.ru)

СЕТЕВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ «ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

SETEVOJ EHLEKTRONNYJ ZHURNAL "TRANSPORTNYE SISTEMY I TEKHNOLOGII"

POWER ELECTRONIC JOURNAL "TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY"

**Главный редактор** А. А. Зайцев, доктор экономических наук, профессор  
**Editor-in-chief** A. A. Zaitsev, Dr. economic sciences, Professor, Petersburg State Transport University

**Заместитель главного редактора** Ю. Ф. Антонов, доктор технических наук, профессор

**Deputy chief editor** Y. F. Antonov, D. Eng., Professor, Petersburg State Transport University

**Выпускающий редактор** Т. П. Гладышева

**Executive editor** T.P.Gladysheva

**Ответственный секретарь** Т. С. Антонова

**Executive secretary** T. S. Antonova

**Редактор сайта** А. В. Дитрихс

**Online content editor** A. V. Ditrh

**Перевод на английский язык** В. В. Шматченко, кандидат технических наук, доцент

**English translation** V. V. Shmatchenko, Ph.D., Associate Professor, Petersburg State Transport University

**Литературное редактирование и корректура** Т. П. Гладышевой

**Editing and proofreading** T.P.Gladysheva

**Верстка** Л. А. Каратановой

**Layout** L. A. Karatanova

**Учредитель и издатель** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

**Founder and publisher** Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Petersburg State Transport University»

**Контакты** 190031, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, 113, ауд. 9/11-5, тел.+7(911)238-44-45, e-mail: info@transssyst.ru; сайт: www.transssyst.ru

**Contacts** 190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 113, 9/11-5, tel:

+7(911)238-44-45, e-mail: info@transssyst.ru; сайт: www.transssyst.ru

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации**

Эл№ФС77-53673 от 17.04.2013 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

**Mass media registration certificate number**

Эл№ФС77-53673 от 17.04.2013 issued by the The Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications

Журнал имеет институт рецензирования

The Journal has the Peer-review division

Журнал распространяется через Интернет без ограничений

и по адресно-целевой подписке через редакцию

The Journal is distributed via Internet for free and by subscription via Editorial office

**Минимальные системные требования**

Тип компьютера, процессор, сопроцессор, частота: Pentium IV и выше; оперативная память (RAM): 256 Мб и выше; необходимо на винчестере: не менее 64 Мб; ОС MacOS, Windows (XP, Vista, 7); видеосистема: встроенная; дополнительное ПО: Adobe Reader версия от 7.X или аналог.

Защита от незаконного распространения: реализуется встроенными средствами Adobe Acrobat

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ  
INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD**

**Ли Вэйли**, доктор технических наук, профессор, Пекинский технический университет, Пекин, КНР

**Weili Li**, Ph.D., Professor, Beijing University of Technology, Beijing, China, Chairman of Editorial board

**Колесников Владимир Иванович**, Академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, С.-Петербург, Россия

**Vladimir Kolesnikov**, Academician of the Russian Academy of Sciences, doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg, Russia

**Ганиев Ривнер Фазылович**, Академик Российской академии наук, директор Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

**Rivner Ganiev**, Academician of the Russian Academy of Sciences, director of the Institute of Mechanical Engineering. Blagonravov Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Глухих Василий Андреевич**, Академик Российской академии наук, научный руководитель НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, доктор технических наук, профессор, председатель Совета

**Vasily Gluhih**, Academician of the Russian Academy of Sciences, scientific adviser NIIÉFA name D.V. Efremov, doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial board

**РЕДКОЛЛЕГИЯ  
EDITORIAL TEAM**

**Антонов Юрий Федорович**, доктор технических наук, профессор, ПГУПС, Санкт-Петербург, Россия, председатель редколлегии

**Yuri Antonov**, Dr. Sc., Professor, Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia, Chairman of Editorial team

**Галкин Александр Геннадьевич**, ректор Уральского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор, Екатеринбург, Россия

**Alexander Galkin**, Rector of the Ural State State Transport University, Dr. Sc., Professor, Ekaterinburg, Russia

**Верескун Владимир Дмитриевич**, ректор Ростовского государственного университета путей сообщения, доктор технических наук, профессор, Ростов-на-Дону, Россия

**Vladimir Vereskun**, Rector of Rostov State Transport University, Dr. Sc., Professor, Rostov-on-Don, Russia

**Паньчев Александр Юрьевич**, ректор Петербургского государственного университета путей сообщения, кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербург, Россия

**Alexander Panychev**, Rector of , Petersburg State Transport University, Ph.D., Associate Professor, St. Petersburg, Russia

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ, ПРЕДЛАГАЕМЫМ  
ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОЛОГИИ» СЕТЕВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

#### ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ И УСЛОВИЯ

- 1.1 Тема и содержание представляемой для публикации статья и должны соответствовать профилю журнала, обладать научной новизной и представлять интерес для специалистов.
- 1.2 Статьи, ранее опубликованные или переданные в другие издания, в журнал не принимаются.
- 1.3 Результаты исследований должны соответствовать одной из научных отраслей: физико-математических (01.00.00), технических (07.00.00, 08.00.00, 09.00.00, 11.00.00, 13.00.00, 14.00.00, 20.00.00, 23.00.00), экономических (38.00.00).
- 1.4 Нижеперечисленные материалы предоставляются в электронном виде в одном архивном файле (zip или rar):

**Файл 1** – рукопись научной статьи в формате MS Word.

**Файл 2** – первая страница рукописи, подписанная автором (авторами).

**Файл 3** – согласие на обработку персональных данных, заверенное личной подписью, в сканированном виде.

**Файл 4** – информация об авторах:

- ФИО полностью,
- дата рождения,
- место работы, должность,
- ученая степень и звание,
- паспортные данные (серия, номер, кем и когда выдан),
- e-mail, телефон, • адрес.

**Файл 5** – название статьи, аннотация, ключевые слова, библиографический список на английском языке в формате MS Word.

**Файл 6** – экспертное заключение о возможности опубликования рукописи в открытом доступе, заверенное по месту обучения или работы, в сканированном виде.

**Файл 7** – рецензия научного руководителя (для студентов-исследователей, магистров, аспирантов и соискателей ученых степеней).

**Файл 8** – лицензионный договор.

- 1.5 Все рукописи проходят рецензирование (внешняя экспертная оценка).  
В случае отрицательного отзыва рукопись возвращается автору на доработку.  
В случае повторного отрицательного отзыва статья отклоняется.  
После получения положительной рецензии с рекомендацией к публикации рукопись передается в издательство и проходит предпечатную подготовку.

#### ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТУ

**Объем статьи** – не менее 8 и не более 15 страниц при наборе текста в формате Word 14-м кеглем через одинарный интервал. На первой странице рукописи помещаются УДК, фамилии авторов (с указанием места обучения или работы), название статьи, аннотация и ключевые слова.

Текст должен содержать введение, разделы, заключение.

**Формулы** должны быть набраны только в редакторе Equation, а отдельные символы и буквы формул в тексте статьи в редакторе – MS Word (не в Equation). Буквы латинского алфавита в тексте и формулах набираются курсивом, буквы греческого и русского алфавитов – обычным шрифтом. Нумеровать нужно только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

**Формат страницы** – А4; каждое поле – 2,5 см; абзацный отступ – 1 см; размер шрифта 14, выравнивание по левому краю; автор (авторы) с указанием места обучения или работы – размер шрифта 14, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; название рукописи – размер шрифта 14, заглавные буквы, полужирное начертание, выравнивание по левому краю; аннотация, ключевые слова – размер шрифта 12, выравнивание по ширине. Требуемый объем **аннотации** – не менее 500 знаков. В аннотации должны быть указаны предмет, тема, цель работы, метод или методология проведения работы, результаты работы, область применения результатов, выводы. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. Одним из проверенных вариантов аннотации является краткое повторение в ней структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение.

**Библиографический список** приводится в конце статьи и составляется в порядке упоминания в тексте рукописи. Ссылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках.

**Рисунки, графики и таблицы** должны иметь номер и заголовки (размер шрифта 12, выравнивание по центру).

**Внимание!** Рисунки и формулы не должны быть сканированными!

**Фотографии** предоставляются в двух вариантах: в тексте статьи и в виде отдельных файлов TIFF и JPEG без сжатия. Название файла должно соответствовать подрисовочной подписи. Сканирование материалов из альбомов, журналов, буклетов, газет и книг влечет за собой сильное понижение качества изображения. Используйте функцию Descreen. Если Вы сканируете фото самостоятельно, выставляйте разрешение 300 dpi (больше не имеет смысла, меньше приведет к понижению качества). То же самое касается рисунков, графиков и диаграмм, созданных в CorelDRAW и Illustrator. Помещайте в файл в формате Word рисунки только в качестве preview-версии, не забывая прилагать отдельно исходники.

**Важная информация.** Настоящие требования могут быть изменены без оповещения авторов. Неисключительные права на все материалы, опубликованные на сайте журнала, кроме оговоренных случаев, принадлежат ФГБОУ ВПО ПГУПС. Все материалы, авторские права на которые принадлежат ФГБОУ ВПО ПГУПС, могут быть перепечатаны при наличии письменного разрешения ФГБОУ ВПО ПГУПС. Требуется предварительное согласие на перепечатку со стороны издателя.

## Содержание

### Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

|                                            |                                                                               |    |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Киселенко А. Н.,<br/>Сундуков Е. Ю.</b> | Технологии высокоскоростного транспорта для Севера России                     | 5  |
| <b>Сугоровский А. В.</b>                   | Реконструкция железнодорожных станций в связи с развитием Усть-Лужского порта | 13 |
| <b>Фёдорова М. В.</b>                      | Скоростной городской транспорт для современной агломерации                    | 26 |

### Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

|                                                                                                                             |                                                                                                                          |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Дёмина А. А.,<br/>Сафонов А. В.,<br/>Ковальчук О. А.,<br/>Запретилина Е. Р.,<br/>Родин И. Ю.,<br/>Андреев Е. Н.</b>      | Разработка и испытания макета ВТСП модуля для системы магнитной левитации транспортного средства                         | 37 |
| <b>Бейн Д. Г.,<br/>Исполова Е. А.,<br/>Житков Ю. Б.,<br/>Сахаров Р. А.</b>                                                  | Конструкция и оценка прочности магнитолевитационной тележки                                                              | 49 |
| <b>Пашков Н. Н.</b>                                                                                                         | Уравнение движения магнитолевитационного подвижного состава                                                              | 59 |
| <b>Волков М. П.,<br/>Проскурин А. А.</b>                                                                                    | Левитационный зазор при подвесе ВТСП под постоянным магнитом                                                             | 70 |
| <b>Адалёв А. С.,<br/>Кучинский В. Г.</b>                                                                                    | Линейный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов для грузовой магнитолевитационной транспортной платформы | 77 |
| <b>Шилова О. А.,<br/>Цветкова И. Н.,<br/>Красильникова Л. Н.,<br/>Ладилина Е. Ю.,<br/>Любова Т. С.,<br/>Кручинина И. Ю.</b> | Синтез и исследование супергидрофобных, антиобледенительных гибридных покрытий                                           | 91 |

### Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

|                                          |                                                                                  |     |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Рязанов Э. М.,<br/>Павлюков А. Э.</b> | Моделирование аварийного столкновения поезда на магнитной подушке с препятствием | 99  |
| <b>Дианов В. Н.,<br/>Гевондян Т. А.</b>  | Вопросы аппаратурной бесбойности магнитолевитационных транспортных средств       | 112 |

## CONTENTS

### Section 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

|                                              |                                                                                               |    |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Kisselenko A. N.,<br/>Sundukov E. Yu.</b> | Technology of high-speed transport for the Russian North                                      | 6  |
| <b>Sugorovsky A. V.</b>                      | Reconstruction of railway stations in connection with the development of the port of Ust-Luga | 13 |
| <b>Fedorova M. V.</b>                        | Speed urban transport for modern agglomeration                                                | 26 |

### Section 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENT

|                                                                                                                                  |                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Dyomina A. A.,<br/>Safonov A. V.,<br/>Koval'chuk O. A.,<br/>Zapretilina E. R.,<br/>Rodin I. Yu.,<br/>Andreev E. N.</b>        | Development and testing prototype of HTS module for the system of magnetic levitation of vehicle | 38 |
| <b>Bein D. G.,<br/>Ispolova E. A.,<br/>Zhitkov YU. B.,<br/>Saharov R. A.</b>                                                     | Design and assessment of strength Magneto-levitation bogie                                       | 49 |
| <b>Pashkov N. N.</b>                                                                                                             | Equation of motion magnetic levitation rolling stock                                             | 59 |
| <b>Volkov M. P.,<br/>Proskurin A. A.</b>                                                                                         | Levitation gap in suspension of HTSC under the permanent magnet                                  | 70 |
| <b>Adalev A. S.,<br/>Kuchinskij V. G.</b>                                                                                        | Linear electric motor with pm excitation for a freight magnetolevitation platform                | 77 |
| <b>Shilova O. A.,<br/>Cvetkova I. N.,<br/>Krasil'nikova L. N.,<br/>Ladilina E. YU.,<br/>Lyubova T. S.,<br/>Kruchinina I. Yu.</b> | Synthesis and research of superhydrophobic, anti-icing hybrid coatings                           | 91 |

### Section 3. SAFETY

|                                              |                                                                                   |     |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Rvazanov Eh. M.,<br/>Pavlyukov A. Eh.</b> | Simulation of emergency collision of a magnetic levitation train with an obstacle | 100 |
| <b>Dianov V. N.,<br/>Gevondyan T. A.</b>     | Questions hardware bassboost magneto-levitation Vehicles                          | 112 |

## Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

УДК 625.39: 656(470-17)

**А. Н. Киселенко, Е. Ю. Сундуков**

Институт социально-экономических и энергетических проблем  
Севера Коми научного центра Уральского отделения РАН

### **ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТРАНСПОРТА ДЛЯ СЕВЕРА РОССИИ**

Дата поступления 19.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** Север России в ближайшей перспективе остается не охваченным высокоскоростным движением. Такое положение может быть исправлено применением магнитолевитационных и струнных эстакадных технологий. Однако использованию таких технологий должно предшествовать тщательное эколого-экономическое обоснование, а также адаптация конструктивных элементов и самих технологий к условиям Севера.

В целях развития железнодорожного высокоскоростного и скоростного сообщения следует создавать кольца высокоскоростного и скоростного движения. При этом изначально будет формироваться ячеистая сетевая структура, которая намного эффективнее существующих древовидных, имеющих место в Республике Коми, Архангельской и Мурманской областях.

Возможным применением на Севере России магнитолевитационной технологии может стать контейнерное сообщение эстакадного типа Ивдель – Индига протяженностью примерно 1100 км. От Ивдели контейнерная магистраль может быть продолжена в южном направлении до границы с Китаем.

При организации высокоскоростного движения следует разделять пассажирские и грузовые транспортные потоки. Если пассажирские модули исполнять в виде индивидуальных транспортных средств (четырех-пятиместными), элементы инфраструктуры будут менее дорогостоящими. Размеры и грузоподъемность контейнеров для высокоскоростных перевозок также могут быть уменьшены.

Разработчики струнных транспортных систем активно прорабатывают вопросы дизайна транспортных модулей различного предназначения, создания малозатратной транспортной инфраструктуры.

В условиях Севера России интерес представляет разработка транспортной системы, которая бы сочетала преимущества магнитолевитационного и струнного транспорта. Устойчивость такой системы может быть обеспечена при использовании эффекта «магнитной потенциальной ямы».

Реализация крупных транспортных проектов высокоскоростного движения в Российской Федерации может способствовать укреплению международного сотрудничества и осуществляться на его основе.

**Ключевые слова:** высокоскоростные магистрали, железнодорожное скоростное сообщение, магнитолевитационные и струнные эстакадные транспортные технологии, Север России.

**Anatoly N. Kiselenko, Evgeny Yu. Sundukov**

Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North, Komi Science Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences

## TECHNOLOGIES OF HIGH-SPEED TRANSPORT FOR THE NORTH OF RUSSIA

**Abstract:** The North of Russia in the short term remains not captured high-speed movement. Such situation can be rectified by application magnetic and levitation technologies, and so string trestle technologies. However, the careful ecological and economic reasoning, and also adaptation of constructive elements and technologies to North conditions has to precede use of such technologies.

For development of the railway high-speed communication it is necessary to create rings of the high-speed movement. Thus the cellular network structure which is much more effective existing treelike, taking place in the Komi Republic, the Arkhangelsk and Murmansk areas will be initially formed.

Container message of trestle type Ivdel – Indiga about 1100 km long can become possible application of magnetic and levitation technology in the north of Russia. From Ivdel the container highway can be continued in the southern direction to border with China.

At the organization of the high-speed movement it is necessary to divide passenger and cargo transport streams. If to execute passenger modules in the form of individual vehicles (four-five-seater), elements of infrastructure will be less expensive. The sizes and loading capacity of containers for high-speed transportations can be also reduced.

Developers of string transport systems actively study questions of design of transport modules of various mission, creation of low-cost transport infrastructure.

In the conditions of the North of Russia development of transport system which would combine advantages of magnetic and levitation and string transport is of interest. Stability of such system can be provided when using effect of «a magnetic potential hole».

Implementation of large transport projects of the high-speed movement in the Russian Federation can promote strengthening international cooperation and be carried out on its basis.

**Keywords:** high-speed highways, railway high-speed communication, magnetic and levitation technologies, string trestle transport technologies, North of Russia.

## **Введение**

Ввиду большой протяженности страны организации высокоскоростного сообщения уделяется особое внимание среди других проектов развития транспорта России. Большие расстояния создают значительные издержки на жизнеобеспечение, энергию, перевозку грузов и пассажиров. Усиливается разрыв между Россией и развитыми в экономическом отношении странами Европы [9] и Азии [10] из-за способов и стоимости преодоления расстояний. При создании высокоскоростных магистралей (ВСМ) приходится находить баланс между возможностями ВСМ и затратами на их строительство. В работе речь идет о наземных транспортных системах высокоскоростного сообщения Севера России.

### **Железнодорожное высокоскоростное и скоростное сообщение**

Схема развития сети железных дорог России [2] предусматривает строительство более 4 тыс. км линий ВСМ и запуск почти 7 тыс. км линий скоростного движения. Определены следующие направления железнодорожных ВСМ: Москва – Санкт-Петербург; Москва – Владимир – Нижний Новгород – Казань – Екатеринбург с подключением Перми, Уфы, Челябинска и Самары; Москва – Воронеж – Ростов-на-Дону – Адлер.

Как видим, Север России в ближайшей перспективе останется слабо охваченным высокоскоростным и скоростным движением. С целью исправления такого положения нами предлагается преобразование первых двух направлений в кольца высокоскоростного и скоростного движения [4]:

- 1) Москва – Санкт-Петербург – Вологда – Ярославль – Москва;
- 2) Москва – Ярославль – Вологда – Киров – Пермь – Екатеринбург – Москва.

Как отмечается в [7], «мы застряли в эпохе не очень быстрых, технически не лучших поездов». В преодолении этого разрыва упор следует делать не на «вчерашние технологии», а на «завтрашние». К технологиям завтрашнего дня можно отнести магнитолевитационные и струнные эстакадные технологии. В центральной России такие технологии все более приближаются к проектной реализации. Этого нельзя сказать об их применении в условиях Севера России.

### **Магнитолевитационные транспортные технологии**

Магнитолевитационный транспорт при расчете стоимости жизненного цикла имеет существенно лучшие показатели, чем традиционный железнодорожный транспорт [1]. Технология «МагТранСити» пригодна для

междугородных пассажирских скоростных поездов (скорость движения до 600 км/ч) и высокоскоростной грузовой контейнерной магистрали (скорость движения до 400 км/ч в открытом пространстве). Возможным применением на Севере России такой технологии может стать контейнерное сообщение эстакадного типа Ивдель – Индига [5] протяженностью примерно 1100 км. От Ивдели контейнерная магистраль может быть продолжена в южном направлении до границы с Китаем. Также магнитолевитационные технологии могут быть использованы при строительстве технологических линий, например для газопровода «Алтай».

Вместе с тем вопросы строительства магистралей эстакадного типа в высоких северных широтах требуют тщательных исследований. С одной стороны, высота свай должна обеспечивать защиту путепровода от снежных заносов, с другой – объемные свайные сооружения будут неустойчивыми в условиях вечной мерзлоты.

При организации высокоскоростного движения следует разделять пассажирские и грузовые транспортные потоки. При этом, если пассажирские модули исполнять в виде индивидуальных транспортных средств (4-5 местными), элементы инфраструктуры будут менее дорогостоящими – конструкции будут менее объемными, рассчитанными под меньшие силовые нагрузки, лучше адаптированными к природным ландшафтам.

Размеры и грузоподъемность контейнеров, перевозимых магнитолевитационной системой, также могут быть уменьшены. При этом размеры их следует подбирать так, чтобы в портах они заполняли 20-ти и 40-футовые контейнеры, которые в дальнейшем перевозятся морским транспортом [11, 12].

## **Струнные транспортные технологии**

Вопросы дизайна транспортных модулей различного назначения, создания малозатратной транспортной инфраструктуры активно прорабатываются разработчиками струнных транспортных систем на базе струнных технологий Юницкого (СТЮ или технологии SkyWay) [6]. Разработчики СТЮ полагают, что для широкомасштабного использования высокоскоростной (до 500 км/ч) грузопассажирской транспортной системы необходимо в ближайшие 3–3,5 года ее сертифицировать и продемонстрировать потенциальным заказчикам. Также они считают, что эффективность системы «стальное колесо – стальной рельс» многократно превышает эффективность системы с магнитным подвешиванием.

Разработчиками СТЮ сформированы требования к высокоскоростным наземным транспортным системам. Они полагают, что спроектированная эстакада высокоскоростного СТЮ удовлетворяет всем требованиям

и будет применима в любых природно-климатических условиях, в том числе и в условиях вечной мерзлоты.

В 2012 году А. Э. Юницким была разработана схема опорного каркаса струнной транспортной системы всей Российской Федерации, в том числе с выходом к Берингову проливу [6].

На наш взгляд, в условиях Севера России предпочтительнее бесконтактное перемещение транспортных средств, что может обеспечиваться магнитным подвешиванием. В связи с этим интерес представляет разработка транспортной системы, которая бы сочетала преимущества и магнитолевитационного, и струнного транспорта. Это достигается расположением совместно с рельсами-струнами статорных обмоток и установкой на юнибусах источников магнитного поля. Устойчивость такой системы может быть обеспечена при использовании эффекта «магнитной потенциальной ямы» [3].

Следует учитывать [8], что процессы интеграции, происходящие в экономиках государств мира, создание межгосударственных геоэкономических и геополитических объединений ставят перед транспортной отраслью новые сложные задачи, решение которых затруднительно в рамках отдельного государства. В интересах межгосударственного сотрудничества необходима совместная работа по снижению административных и инфраструктурных барьеров, по взаимному повышению доступности не только объектов инфраструктуры, но и транспортно-логистического бизнеса. Вместе с тем говорится и о том, что «фундаментальным риском, исходящим от глобализации, является политический проект, имеющий целью ослабление национального государства в пользу интересов одного лишь полюса экономического и политического могущества».

## **Выводы**

1. Реализация крупных транспортных проектов высокоскоростного движения в Российской Федерации может способствовать укреплению международного сотрудничества и осуществляться на его основе.

2. Организация скоростного пассажирского движения Вологда – Санкт-Петербург, Вологда – Киров – Пермь (далее до Екатеринбурга), Вологда – Ярославль (далее до Москвы) позволит создать два северных кольца скоростного движения.

3. Строительству высокоскоростных магистралей эстакадного типа на Севере России должны предшествовать тщательные эколого-экономические исследования.

4. В условиях Севера России положительный эффект может иметь гибридный транспорт на основе магнитолевитационных и струнных технологий.

## Библиографический список

1. 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. – Киров : МЦНИП, 2014. – С. 24–50.
2. Катцын Д. В. Предпосылки создания сети высокоскоростного железнодорожного сообщения в Российской Федерации // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2014 : материалы междунар. науч.-практ. конф., 1–2 октября 2014 г., СПб. ; ИПТ РАН. – СПб., 2014. – С. 34–36.
3. Козорез В. В. Динамические системы магнитно-взаимодействующих свободных тел. – Киев : Наук. думка, 1981. – 140 с.
4. Киселенко А. Н. О развитии транспортной системы Европейского Севера России // Региональная экономика: теория и практика. – 2014. – № 11 (338). – С. 2–11.
5. Киселенко А. Н. Совершенствование логистики в северных регионах с применением инновационных транспортных технологий / А. Н. Киселенко, Е. Ю. Сундуков // Магнитолевитационные транспортные системы и технологии : труды 2-й междунар. научн. конф., Санкт-Петербург, 17–20 июня 2014. – Киров : МЦНИП, 2014. – С. 391–395.
6. Литовский В. В. О фундаментальных приоритетах формирования инфраструктуры Урала на базе инновационных технических решений и разработок А. Э. Юницкого // Эко-потенциал. 2014. № 3(7). – С. 69–84.
7. Трейвиш А. И. Наша страна – самая холодная в мире // Знание – сила. 2003. № 5. – С. 43–50.
8. Якунин В. И. Транспортная геополитика / Сайт АО «Коммерсантъ» [Электронный ресурс]. – Код доступа : <http://www.kommersant.ru/doc/2713881> (дата обращения 27.04.2015).
9. New levels of high Speed // Progr. Railroad. – 1986. – Vol. 29, № 8. – P. 38–40.
10. Shanghai maglev – all you need to know / Сайт maglev.net [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev> (дата обращения 25.05.2015).
11. The emerging intermodal industry / Pike Emily // Container News. – 1990. – 25, № 10. – P. 16–19.
12. Neue Betriebsverfahren im kombinierten verkehr / Boese P., Hansmann A., Nöthlich M. // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. – 1989. – № 11. – С. 699–702, 705–706.

## References

1. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Korchagin A. D., Yudkin V. F. Magnitolevitacionnaya tekhnologiya kak transportnaya strategiya gruzovyh i passazhirskih perevozok [Magnetic and Levitation Technology as Transport Strategy of Freight and Passenger Traffic] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnshchj konferencii "Magnitnolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Works 2nd Int. sci. conf. "Magnetic and levitation transport systems and technologies"). Kirov, 2014, pp. 24–50.
2. Kattsyn D. V. Predposylki sozdaniya seti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo soobshcheniya v Rossijskoj Federacii [Prerequisites of Creation of a Network of High-speed Railway Communication in the Russian Federation] *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2014"* (Materials of the int. sci. and pract. conf. "Transport of Russia: Problems and Prospects – 2014"). St. Petersburg, 2014, pp. 34–36.
3. Kozorez V. V. *Dinamicheskie sistemy magnitno-vzaimodejstvuyushchih svobodnyh tel* [Dynamic Systems of the Magnetic Interacting Free Bodies]. Kiev, 1981. 140 p.
4. Kiselenko A. N. *Regional'naya ehkonomika: teoriya i praktika – Regional Econ.: Theory and Pract.*, 2014, no. 11 (338), pp. 2–11.
5. Kiselenko A. N., Sundukov E. Yu. Sovershenstvovanie logistiki v severnyh regionah s primeneniem innovacionnyh transportnyh tekhnologij [Improvement of Logistics in Northern Regions with Application of Innovative Transport Technologies] *Trudy 2 Mezhdunarodnoj nauchnshchj konferencii "Magnitnolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Works 2nd int. sci. conf. "Magnetic and levitation transport systems and technologies"). Kirov, 2014, pp. 391–395.
6. Litovskiy V. V. *EHko-potencial – Eco-potential*, 2014, no. 3 (7), pp. 69–84.
7. Treyvish A. I. *Znanie – sila – Knowledge – force*, 2003, no. 5, pp. 43–50.
8. Yakunin V. I. *Transportnaya geopolitika* [Transportation geopolitics]. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/271381> (27/04/2015).
9. New levels of high Speed. "Progr. Railroad", 1986, vol. 29, no. 8, pp. 38–40.
10. Shanghai maglev – all you need to know. URL: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev> (27/04/2015).
11. Pike E. *Container News*, 1990, vol. 25, no. 10, pp. 16–19.
12. Boese P., Hansmann A., Netlikh M. *Eisenbahntechn. Rdsch*, 1989, no. 11, pp. 699–702, 705–706.

**Сведения об авторах:**

КИСЕЛЕНКО Анатолий Николаевич, профессор; д. э. н., д. т. н.; заведующий лабораторией проблем транспорта; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения РАН, E-mail: [kiselenko@iespn.komisc.ru](mailto:kiselenko@iespn.komisc.ru)

СУНДУКОВ Евгений Юрьевич, к. э. н.; доцент; старший научный сотрудник лаборатории проблем транспорта; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения РАН, E-mail: [translab@iespn.komisc.ru](mailto:translab@iespn.komisc.ru)

**Information about authors:**

Anatoly N. KISELENKO, D. Sc. (Economics), D. Sc. (Tech.), professor, head of laboratory of the transport problems, Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North, Komi Science Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, E-mail: [kiselenko@iespn.komisc.ru](mailto:kiselenko@iespn.komisc.ru)

Evgeny Yu. SUNDUKOV, Ph. D. (Economics), associate professor, research worker of laboratory of the transport problems, Institute of Socio-Economic and Energy Problems of the North, Komi Science Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, E-mail: [translab@iespn.komisc.ru](mailto:translab@iespn.komisc.ru)

**А. В. Сугоровский**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ В СВЯЗИ С РАЗВИТИЕМ УСТЬ-ЛУЖСКОГО ПОРТА**

Дата поступления 07.08.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** Статья посвящена реконструкции станции Октябрьской железной дороги в Кингисеппском районе Ленинградской области – Веймарн с учетом увеличения грузового потока на станции Усть-Лужского узла.

Для решения поставленной задачи выполнены расчеты необходимого путевого развития станции. Для сравнения принято два варианта реконструкции станции. Планы реконструкции станции выполнены в графическом редакторе AutoCAD в соответствии с требованиями к проектам железнодорожных станций и узлов. Сравнение вариантов выполнено по сопоставимым, различающимся капитальным вложениям и эксплуатационным расходам. Стоимость реконструкции станции в текущих ценах 2015 года составляет около 500 миллионов рублей.

**Ключевые слова:** реконструкция станции, Усть-Лужский порт, Веймарн.

**Artyom V. Sugorovskiy**

Petersburg State Transport University

## **RECONSTRUCTION OF RAILWAY STATIONS IN CONNECTION WITH DEVELOPMENT OF THE UST-LUGA PORT**

**Abstract:** Article is devoted to reconstruction of station of Oktyabrskaya Railway in the Kingisepp region of the Leningrad region – Veymarn taking into account increase in a cargo stream at stations of Ust-Luzhsky knot.

Calculations of necessary quantity of ways at station are for this purpose executed. The executed calculations testify that it is necessary to add to the existing ways of station four new the priyomootpravochnykh of a way.

Data on a hardware of the stages adjoining station are accepted on the basis of TRA of station and technological process.

Two options of reconstruction of station are developed. Both in the first and in the second option the existing ways are extended.

In the first option parallel to the existing ways four new ways with a useful length not less than 1050 m, keep within in the same place where the cargo platform is located. For this purpose transfer of a high cargo platform 114 m long and 9 m wide will be required. At realization of this option additional allocation of land will be required.

In the second option parallel to the existing ways four new ways with a useful length not less than 1050 m, keep within in the same place where the passenger building is located. Their laying will require transfer of 2 high passenger platforms 4 and 4,5 meters wide, demolition of the outdated passenger building and construction of the new, modern passenger building, and also transfer of ways of locomotive economy. At realization of this option additional allocation of land will also be required.

Large-scale schemes of station, are executed in the graphic AutoCAD editor according to requirements to projects of railway stations and knots. Comparison of options is executed on the comparable, differing capital investments and operational costs. The cost of reconstruction of station in the current prices of 2015 makes about 500 million rubles.

**Keywords:** reconstruction of station, Ust-Luga port, Veymarn.

## **Введение**

Для обеспечения эффективной работы железнодорожного транспорта необходимо, чтобы уровень развития его инфраструктуры соответствовал объемам выполняемой перевозочной работы. В первую очередь это относится к железнодорожным станциям, являющимся наиболее сложными и ответственными звеньями транспортного конвейера, от пропускной и перерабатывающей способности которых в значительной степени зависит устойчивая работа всей сети железных дорог.

Настоящая статья посвящена развитию инфраструктуры железнодорожной станции Веймарн с учетом увеличения грузового потока на станции Усть-Лужского узла. Основанием для выбора данной темы послужила недостаточная развитость путевого развития этой станции, вызванная в первую очередь недостаточной полезной длиной имеющихся на станции приемоотправочных путей, а также недостаточным путевым развитием станции на перспективу.

### **1. Общая характеристика станции Веймарн**

Веймарн – крупная узловая станция Октябрьской железной дороги в Кингисеппском районе Ленинградской области. Расположена в поселке Веймарн.

От станции отходят железнодорожные линии на Гдов, Ивангород и Котлы. Усть-Лужское направление стало особенно востребованным после постройки там морского порта.

Станция по характеру работы является участковой и отнесена ко 2 классу. Схема расположения станции Веймарн в составе сети железных дорог Российской Федерации приведена на рис. 1.

В настоящее время на станции Веймарн имеется 4 главных пути и 6 приемоотправочных. Существующая схема станции представлена на рис. 2.

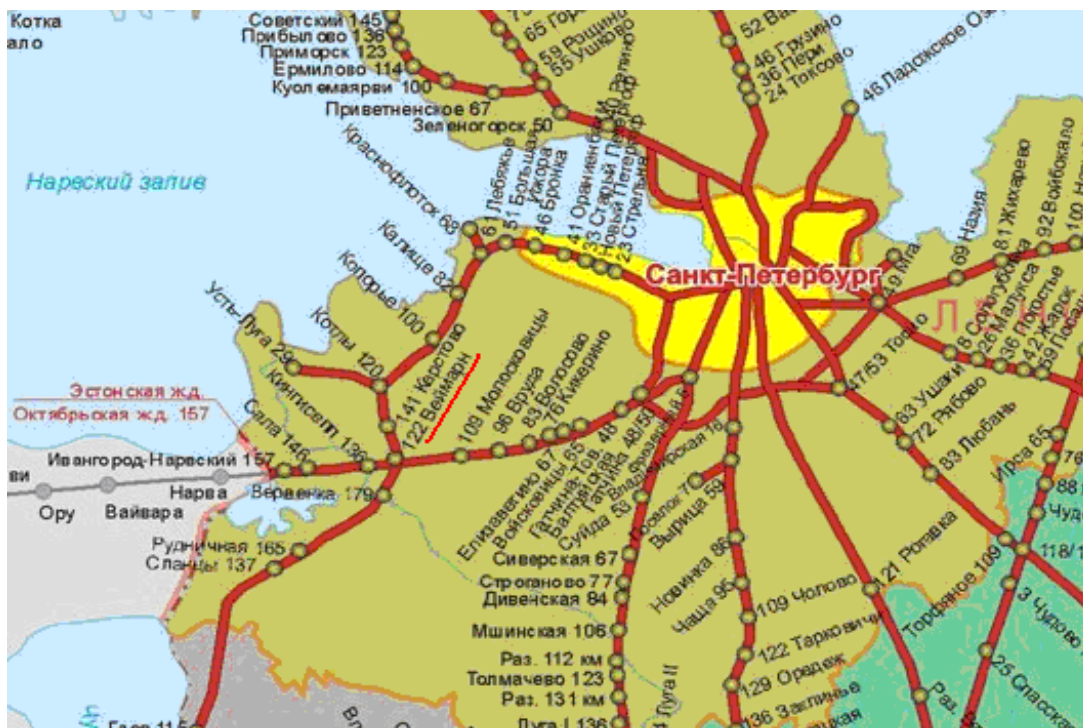


Рис. 1. Схема расположения станции Веймарн в составе сети железных дорог Российской Федерации

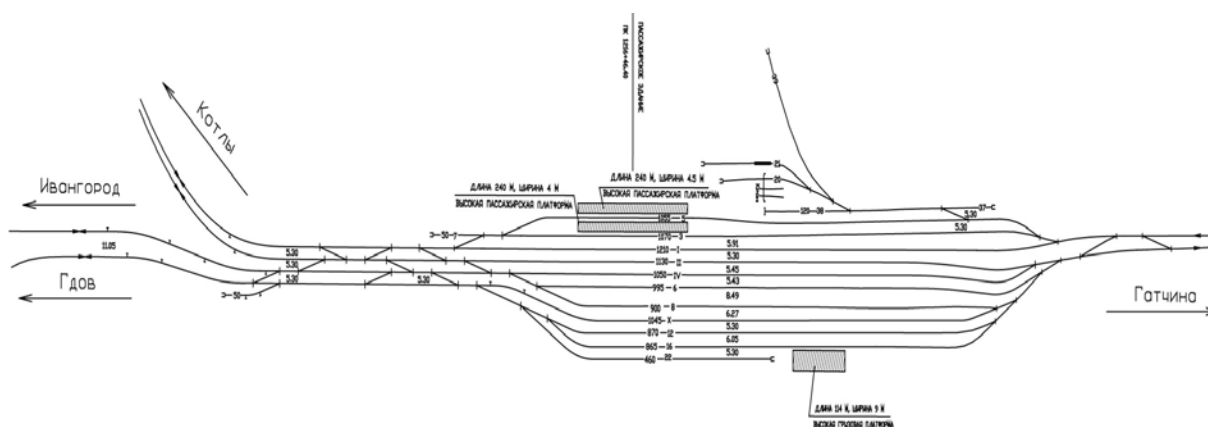


Рис. 2. Существующая схема станции Веймарн

## 2. Существующие и перспективные размеры движения по станции Веймарн

Существующие размеры движения по станции Веймарн приняты по графику движения поездов на 2014/2015 год, перспективные размеры движения по станции Веймарн на 2025 год приняты на основе данных ОАО «Институт экономики и развития транспорта» и представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Существующие и перспективные размеры движения**

| Примыкающая линия   | Размеры движения, пар поездов |      |              |      |          |      |
|---------------------|-------------------------------|------|--------------|------|----------|------|
|                     | пригородные                   |      | пассажирские |      | грузовые |      |
|                     | 2015                          | 2025 | 2015         | 2025 | 2015     | 2025 |
| Веймарн – Котлы     | 0                             | 2    | 0            | 0    | 50       | 74   |
| Веймарн – Ивангород | 3                             | 4    | 2            | 3    | 4        | 4    |
| Веймарн – Гатчина   | 5                             | 8    | 2            | 3    | 54       | 78   |
| Веймарн – Гдов      | 0                             | 0    | 0            | 0    | 0        | 0    |

### **3. Расчет потребного числа путей на станции**

#### **3.1. Общие сведения об используемой методике**

Так как размеры пассажирского и грузового движения на подходах к станции и средства сигнализации различны, то и вероятностно-статистические характеристики входящего и выходящего потоков будут разными. Поэтому расчет числа путей в приёмоотправочном парке ведется отдельно для каждого направления, после чего общее количество путей для транзитных поездов определяется суммированием полученных значений по трем направлениям.

Полученное суммарное значение путей в объединенном приёмоотправочном парке проверяется на соответствие нормативному потребному числу путей согласно СТН Ц-01-95.

Данные о техническом оснащении перегонов примыкающих к станции приняты на основании ТРА станции и технологического процесса.

#### **3.2. Число приёмоотправочных путей для пассажирских поездов**

На станции для приема и отправления пассажирских поездов используются главные и специальный пассажирский приёмоотправочный путь.

Число пассажирских приёмоотправочных путей, включая главные, на станции Веймарн равняется пяти.

### 3.3. Число приёмоотправочных путей для грузовых поездов

Число путей в приёмоотправочном парке для транзитных поездов определяется отдельно для четного и нечетного направлений по формуле:

$$m = \frac{t_{\text{зан}}}{I_p} + 1, \quad (1)$$

где  $I_p$  – расчетный интервал прибытия поездов в данный парк, мин;

$t_{\text{зан}}$  – время занятия пути одним поездом, мин;

1 – путь для обгона.

При поступлении в парк поездов только с одного направления значение расчетного интервала с достаточной точностью можно принять:

$$I_p = \frac{I_{\text{ср}} + I_{\text{min}}}{2}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{min}}$  – минимальный интервал следования грузовых поездов на участке ( $I_{\text{min}} = 8$  мин для двухпутного участка и 25 мин для однопутного);

$I_{\text{ср}}$  – средний интервал прибытия поездов на станцию, определяемый по формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1440}{N_{\text{гр}} + \varepsilon \cdot N_{\text{пс}}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{гр}}, N_{\text{пс}}$  – число соответственно грузовых и пассажирских поездов в рассчитываемом направлении;

$\varepsilon$  – коэффициент съёма грузовых поездов пассажирскими (принимается равным 1,5).

Продолжительность занятия пути одним поездом  $t_{\text{зан}}$  считается с момента начала установки маршрута для приема поезда на данный путь и до момента освобождения пути последним вагоном при отправлении поезда со станции:

$$t_{\text{зан}} = t_{\text{пр}} + t_{\text{оп}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{от}}, \quad (4)$$

где  $t_{\text{пр}}$  – время занятия пути при приеме поезда на станцию;

$t_{\text{оп}}$  – время выполнения операций на приёмоотправочных путях по технологическому процессу (для транзитных поездов принимается равным 25 мин);

$t_{\text{ож}}$  – среднее время простоя поезда в ожидании отправления, мин;

$t_{\text{от}}$  – время занятия пути при отправлении поезда со станции.

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{м}} + \frac{l''_{\text{бл}}}{16,7V_{\text{х}}} + \frac{l'_{\text{бл}} + l_{\text{с}} + l_{\text{вх}} + l_0}{16,7V_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{м}}$  – время приготовления сигнала на открытие сигнала ( $t_{\text{м}} = 0,15–0,20$  мин);

$t_{\text{в}}$  – время восприятия машинистом показания входного сигнала ( $t_{\text{в}} = 0,1$  мин);

$l'_{\text{бл}}, l''_{\text{бл}}$  – длины блок-участков, принимаемые в размере 1050 м;

$l_{\text{с}}$  – расстояние от входного светофора до первого стрелочного перевода, 300 м;

$l_{\text{вх}}$  – длина входной горловины, 400 м;

$l_0$  – норма полезной длины, 1050 м;

$V_{\text{пр}}$  – средняя скорость поезда при приеме на станцию,  $V_{\text{пр}} = 35 \dots 40$  км/ч;

$V_{\text{х}}$  – ходовая скорость поезда на блок-участке,  $V_{\text{х}} = 60 \dots 80$  км/ч;

16,7 – переводной коэффициент (1000 м/ 60 мин  $\approx 16,7$ ).

Среднее время простоя поезда в ожидании отправления определяется по формуле:

$$t_{\text{ож}} = \frac{\rho^2 \cdot (1 + \gamma^2) \cdot 60}{2 \cdot \lambda \cdot (1 - \rho)}; \quad (6)$$

где  $\rho$  – коэффициент загрузки системы;

$\gamma$  – коэффициент вариации интервалов отправления поездов, 0,7;

$\lambda$  – часовая интенсивность поступления поездов.

$$\rho = \frac{N}{N_{\text{гр}}^{\text{пр}}}, \quad (7)$$

где  $N$  – число грузовых поездов поступающих на станцию соответствующего направления;

$N_{\text{гр}}^{\text{пр}}$  – максимальная пропускная способность участка для грузового движения.

$$N_{\text{гр}}^{\text{max}} = \frac{1440 - t_{\text{техн}}}{T_{\text{пер}}} \cdot \alpha_{\text{н}} - \varepsilon_{\text{пс}} \cdot N_{\text{пс}}, \quad (8)$$

где  $T_{\text{пер}}$  – период графика на ограничивающем перегоне, при АБ равен 10 мин;

$t_{\text{техн}}$  – продолжительность технологического «окна», мин;

$\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент надежности, 0,95;

$\varepsilon_{\text{пс}}$  – коэффициент съема пассажирским поездом, 1,5;

$N_{\text{пс}}$  – количество пассажирских поездов.

$$t_{\text{от}} = t_{\text{м}} + t_0 + \frac{l_{\text{вых}}^{\text{от}}}{16,7 \cdot V_{\text{вых}}}, \quad (9)$$

где  $t_0$  – время от момента открытия сигнала до трогания грузового поезда, 1,0 мин.

$l_{\text{вых}}^{\text{от}}$  – расстояние, проходимое поездом до освобождения пути, равное сумме полезной длины этого пути и длины выходной горловины;

$V_{\text{вых}}$  – средняя скорость выхода, 30 км/ч.

Расчет количества путей для транзитных грузовых поездов сведен в табл. 2.

**Таблица 2. Расчет количества путей для транзитных грузовых поездов**

| Наименование показателя                     | Четное направление                                                                                    |                                                       | Нечетное направление                                    |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                             | Котлы                                                                                                 | Ивангород                                             | Гатчина                                                 |
| $I_{\text{min}}$                            | 10                                                                                                    | 10                                                    | 10                                                      |
| $I_{\text{ср}}, \text{ мин}$                | $\frac{1440}{74 + 1,5 \cdot 2} = 18,7$                                                                | $\frac{1440}{4 + 1,5 \cdot 7} = 99,3$                 | $\frac{1440}{78 + 1,5 \cdot 11} = 15,24$                |
| $I_{\text{р}}, \text{ мин}$                 | $\frac{18,7 + 10}{2} = 13,85$                                                                         | $\frac{99,3 + 10}{2} = 54,65$                         | $\frac{15,24 + 10}{2} = 12,62$                          |
| $I_{\text{р}}^{\text{ср.вз.}}, \text{ мин}$ | $\frac{13,85 \cdot 54,65}{13,85 + 54,65} = 11,05$                                                     |                                                       |                                                         |
| $t_{\text{пр}}, \text{ мин}$                | $0,2 + \frac{1000}{16,7 \cdot 60} + \frac{1000 + 300 + 600 + 1050}{16,7 \cdot 40} = 5,62 \text{ мин}$ |                                                       |                                                         |
| $N_{\text{max}}^{\text{гр}}, \text{ поезд}$ | $\frac{1440 - 60}{10} \cdot 0,95 - 1,5 \cdot 2 = 128$                                                 | $\frac{1440 - 60}{10} \cdot 0,95 - 1,5 \cdot 7 = 120$ | $\frac{1440 - 120}{10} \cdot 0,95 - 1,5 \cdot 11 = 108$ |

| Наименование показателя           | Четное направление                                                                |                                                                                  | Нечетное направление                                                              |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                                   | Котлы                                                                             | Ивангород                                                                        | Гатчина                                                                           |
| $N$ , поезд                       | 74                                                                                | 4                                                                                | 78                                                                                |
| $\rho$                            | $\frac{74}{128} = 0,57$                                                           | $\frac{4}{108} = 0,03$                                                           | $\frac{78}{108} = 0,72$                                                           |
| $\lambda$                         | $\frac{74}{24} = 3,01$                                                            | $\frac{4}{24} = 0,17$                                                            | $\frac{78}{24} = 3,25$                                                            |
| $t_{\text{ож}}$ , мин             | $\frac{0,57^2 \cdot (1 + 0,7^2) \cdot 60}{2 \cdot 3,01 \cdot (1 - 0,57)} = 11,22$ | $\frac{0,03^2 \cdot (1 + 0,7^2) \cdot 60}{2 \cdot 0,17 \cdot (1 - 0,03)} = 0,24$ | $\frac{0,72^2 \cdot (1 + 0,7^2) \cdot 60}{2 \cdot 3,25 \cdot (1 - 0,72)} = 18,76$ |
| $t_{\text{ож}}^{\text{ср}}$ , мин | $\frac{74 \cdot 11,22 + 4 \cdot 0,24}{74 + 4} = 10,65$                            |                                                                                  |                                                                                   |
| $t_{\text{от}}$ , мин             | $0,15 + 1 + \frac{1050 + 300}{16,7 \cdot 30} = 3,84$                              |                                                                                  |                                                                                   |
| $t_{\text{зан}}$ , мин            | $5,62 + 25 + 10,65 + 3,84 = 45,11$                                                |                                                                                  | $5,62 + 25 + 18,76 + 3,84 = 55,22$                                                |
| $m$ , путь                        | $\frac{45,11}{11,05} + 1 = 4$                                                     |                                                                                  | $\frac{55,22}{12,62} + 1 = 5$                                                     |

К рассчитанному количеству путей для приема и отправления транзитных поездов, по данным перспективных размеров движения на 2025 год, необходимо также добавить пять путей, предназначенных для приема пассажирских и пригородных поездов. Таким образом, на 2025 год на станции Веймарн необходимо иметь не менее 14 приёмоотправочных путей, включая главные.

### 3.4. Соответствие расчетов нормативным значениям

Сравнивая полученное значение путей для транзитных поездов со строительно-техническими нормами СТН Ц-01-95, получаем, что их число на указанные размеры движения (при 25 % смены локомотивных бригад) должно составлять не менее 8 путей. Таким образом, с учетом путей для пассажирских и пригородных поездов на 2025 год на станции Веймарн необходимо иметь не менее 14 приёмоотправочных путей, включая главные.

## 4. Проектные решения

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что к существующему путевому развитию станции необходимо добавить четыре приёмоотправочных пути. Кроме этого, исходя из факта, что станция Веймарн находится на линии Гатчина – Варшавская – Ивангород – Нарвский, где установ-

лена унифицированная длина поездов 71 условный вагон, полезная длина существующих и вновь запроектированных приемоотправочных путей должна быть не менее 1050 м. В связи с этим предусмотрено удлинение приемоотправочных путей до полезной длины 1050 метров.

Разработано два варианта реконструкции станции. И в первом, и во втором варианте существующие пути удлиняются в нечетной горловине.

В первом варианте параллельно существующим укладываются четыре новых пути полезной длиной не менее 1050 м, со стороны грузовой платформы. Для их укладки потребуется перенос высокой грузовой платформы длиной 114 м и шириной 9 м. При реализации этого варианта потребуется дополнительный отвод земель.

Во втором варианте параллельно существующим укладываются четыре новых пути полезной длиной не менее 1050 м, со стороны пассажирского здания. Для их укладки потребуется перенос 2-х высоких пассажирских платформ шириной 4 и 4,5 м, снос устаревшего пассажирского здания и строительство нового, современного пассажирского здания, а также перенос путей локомотивного хозяйства. При реализации этого варианта также потребуется дополнительный отвод земель.

## **5. Экономическая часть**

### **5.1. Сравнение вариантов реконструкции станции Веймарн**

Для определения приведенных затрат по вариантам реконструкции рассчитываются капитальные затраты и эксплуатационные расходы.

В составе капитальных вложений учитывались затраты на следующие работы:

1. Подготовка территории строительства.
2. Земляное полотно.
3. Верхнее строение железнодорожного пути.
4. Устройство сигнализации, централизации и блокировки.
5. Здания и сооружения производственные и служебные.
6. Энергетическое хозяйство.
7. Прочие работы и непредвиденные затраты.

Расходные ставки за измеритель приняты по данным методических указаний «Определение ориентировочной стоимости строительства железнодорожных станций и узлов по укрепленным показателям», ПГУПС. СПб, 2006 год.

В составе эксплуатационных расходов учитывались следующие виды затрат:

1. Содержание станционных путей.
2. Содержание стрелочных переводов.
3. Задержки по враждебности маршрутов.

Расходные ставки за измеритель приняты по данным методических указаний «Определение эксплуатационных расходов по укрупненным расходным ставкам при сравнении вариантов развития железнодорожных станций и узлов». Итоговые данные строительно-эксплуатационных расходов по вариантам приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Итоговые данные строительно-эксплуатационных расходов по вариантам**

| № п/п | Наименование расходов                                                                                             | Затраты, млн руб. |           |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
|       |                                                                                                                   | Вариант 1         | Вариант 2 |
| 1     | Капитальные вложения                                                                                              | 72,89             | 90,78     |
| 2     | Эксплуатационные расходы                                                                                          | 2,14              | 1,77      |
| 3     | Приведенные строительно-эксплуатационные расходы $\mathcal{E}_{\text{пр}} = K * E + \mathcal{E}$ , при $E = 0,12$ | 10,89             | 12,66     |

**Вывод:** при сравнении двух вариантов развития станции Веймарн первый вариант оказался экономически более эффективным, с точки зрения приведенных расходов.

## 5.2. Техничко-экономические показатели проекта

Стоимость реконструкции станции Веймарн включает в себя затраты на удлинение 4-х существующих приемоотправочных путей до полезной длины не менее 1050 м в сторону нечетной горловины станции, укладку 4-х дополнительных приемоотправочных путей полезной длиной не менее 1050 м, для их укладки потребуется перенос высокой грузовой платформы длиной 114 м и шириной 9 м, при реализации этого варианта потребуется дополнительный отвод земель площадью 0,9 га.

Техничко-экономические показатели проекта представлены в табл. 4.

**Таблица 4**

| Наименование показателей                                                         | Единица измерения   | Величина показателя |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Размеры работы станции:<br>на 2015 год<br>на перспективу                         | ваг/сут             | 7452                |
|                                                                                  | ваг/сут             | 10920               |
| Объем земляных работ                                                             | тыс. м <sup>3</sup> | 187,8               |
| Укладка путей                                                                    | км                  | 6,2                 |
| Стоимость реконструкции станции в ценах 2000 года                                | млн руб.            | 72,89               |
| Стоимость реконструкции станции в ценах 2015 года                                | млн руб.            | 510,25              |
| Стоимость реконструкции, отнесенная на 1 км укладываемых путей в ценах 2015 года | млн руб.            | 145,78              |

## **Заключение**

Настоящая статья посвящена развитию инфраструктуры железнодорожной станции Веймарн с учетом увеличения грузового потока на станции Усть-Лужского узла. Основанием для выбора этой темы послужила недостаточная развитость путевого развития этой станции, вызванная, в первую очередь, недостаточной полезной длиной имеющихся на станции приемоотправочных путей. Помимо необходимости удлинения путей, проработан вопрос достаточности имеющегося на станции путевого развития на перспективу.

Для сравнения принято два варианта реконструкции станции. Оба варианта предполагают увеличение полезной длины существующих приемоотправочных путей до 1050 м, вместо имеющихся 850 м, что позволит увеличить объем перевозимых грузов.

Планы реконструкции станции выполнены в графическом редакторе AutoCAD в соответствии с требованиями к проектам железнодорожных станций и узлов. Сравнение вариантов выполнено по сопоставимым, различающимся капитальным вложениям и эксплуатационным расходам. Приведенные строительно-эксплуатационные расходы развития станции Веймарн по варианту с укладкой путей со стороны грузовой платформы ниже, чем по варианту с укладкой путей со стороны пассажирского здания. Стоимость реконструкции станции в текущих ценах 2015 года составляет около 500 миллионов рублей.

## **Библиографический список**

1. Грошев Г. М. Регулирование эксплуатационной работы железных дорог в современных условиях / Г. М. Грошев, А. Г. Котенко, А. В. Гоголева, И. В. Кашицкий, Н. В. Климова, А. Р. Норбоев, Ант. В. Сугоровский : учеб. пособие / ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2013 – 71 с.
2. Логинов Ю. И. Железнодорожные станции и узлы / Ю. И. Логинов, Ю. И. Ефименко, С. И. Логинов, П. К. Рыбин, М. В. Стрелков, А. В. Сугоровский // Дополнительные разделы / Редактор : Ефименко Ю. И. – Санкт-Петербург, 2014. – 144 с.
3. Техничко-распорядительный акт железнодорожной станции Веймарн, утвержден начальником Волховстроевского центра организации работы железнодорожных станций В. В. Соколовым 28 февраля 2012 г.
4. Правила и технические нормы проектирования станций и узлов на железных дорогах колеи 1520 мм. – М. : МПС, 2001. – 255 с.
5. Подготовка исходных данных для ввода в имитационную модель функционирования пассажирской технической станции. А. В. Сугоров-

ский. Журнал: Известия петербургского университета путей сообщения. Номер 1, год 2010. – СПб. : ПГУПС.

6. Схема сортировочной станции и проект сортировочной горки. В. В. Костенко, К. И. Максимов, А. В. Сугоровский, Н. В. Ершиков : учеб. пособие. – СПб. : ПГУПС, 2012. – 54 с.

7. Мультимодальные перевозки и их оценка / Бренд Т. // 11 TRAIL Конгресс, ноябрь 2010. – Р. 1–5.

8. Железнодорожный и автомобильный транспорт. Грузовой транспорт модальный подход / А. Кампагнам // Труды семинара по мультимодальным перевозкам и ИКТ: Выводы и рекомендации // INTERREG IIIС Проект Port-Net. – 2006. – Р. 78–86.

9. Распределенный подход для решения нестационарных задач в смешанных транспортных сетях / К. Галвез-Фернандес, Д. Хардао, Х. Аед, З. Хаббас, Е. Альба // Достижения в области исследования операций, Издательство-Hindawi Publishing Corporation. – 2009. – 15 с.

10. Определение эксплуатационных расходов по укрупненным расходным ставкам при сравнении вариантов развития железнодорожных станций и узлов : метод. указ. / С. И. Логинов, А. Н. Ефанов, Ю. И. Ефименко, З. Н. Гарбузова. – СПб. : ПГУПС, 2009. – 19 с.

## References

1. Groshev G. M., Kotenko A. G., Gogoleva A. V., Kashitsky I. V., Klimova N. V., Norboy A. R., Sugorovsky Ant. V. Regulirovanie ehkspluatacionnoj raboty zheleznyh dorog v sovremennyh usloviyah [Adjusting Operating the Railways Today]. St. Petersburg, 2013. 71 p.

2. Efimenko Y. I., Loginov S. I., Rybin P. K., Strelkov M. V., Sugorovsky A. V. *ZHeleznodorozhnye stancii i uzly* [Railway Stations and Junctions]. St. Petersburg, 2014. 144 p.

3. Tekhniko-rasporyaditel'nyj akt zheleznodorozhnoj stancii Vejmar. 28 fevralya 2012 [Technical and Administrative Act Railway Station Weimar 28/02/2012].

4. Pravila i tekhnicheskie normy proektirovaniya stancij i uzlov na zheleznyh dorogah kolei 1520 mm [The rules and technical standards of design stations and junctions of the railways 1520 mm]. Moscow, Ministry of Railways, 2001. 255 p.

5. Sugorovsky A. V. *Izvestiya PGUPS – Bulletin PGUPS*, 2010, no 1, pp. 11–21.

6. Kostenko V. V., Maksimov K. I., Sugorovskij A. V., Ershikov N. V. *Skhema sortirovochnoj stancii i proekt sortirovochnoj gorki* [Driving yard and the project hump]. St. Petersburg, 2012, 54 p.

7. Brands T. *J. Systems Sci. and Systems Eng.*, 2010, Nov., pp. 1–5.

8. Campagnam A. The Rail and Road Freight Transport in the Co-Modality Approach Proc. of the Workshop on Multimodal Transport and ICT “INTERREG IIIC Project Port-Net”: Result and Recommendations. Klaipeda, 2006, pp.78-86. URL: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev> (27/04/2015).

9. Galvez-Fernandez C., Khadraoui D., Ayed H., Habbas Z., Alba E. Verteilte Ansatz zur Lösung der zeitabhängigen Problemen im Multimodalen Transport-Netzwerke. Wuerzburg, 2009. 15 p.

10. Loginov S. I., Ethanov A. N., Efimenko Y. I., Garbuzova Z. N. Opređenje ehkspluatacionnyh raskhodov po ukрупnyonnym raskhodnym stavkam pri sravnenii variantov razvitiya zheleznodorozhnyh stancij i uzlov [Determination of operating costs by bigger expenditure rates in the comparison options for the development of railway stations and junctions]. St. Petersburg, 2009. 19 p.

**Сведения об авторе:**

СУГОРОВСКИЙ Артем Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Железнодорожные станции и узлы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, E-mail: c123945@yandex.ru

**Information about author:**

Artyom V. SUGOROVSKIY, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department «Railway stations and units», the Petersburg State Transport University, E-mail: c123945@yandex.ru

УДК 338.47-656

**М. В. Фёдорова**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **СКОРОСТНОЙ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ АГЛОМЕРАЦИИ**

Дата поступления 06.08.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В статье выделяются основные недостатки существующих видов городского транспорта; описана новая форма расселения – «конурбация», дана классификация городского пассажирского транспорта; уточнено понятие «скоростной городской транспорт»; обоснована необходимость создания нового вида пассажирского транспорта с точки зрения стратегических и социально-экономических целей и задач развития Санкт-Петербурга; отражено создание магнитолевитационного транспорта (Маглев), позволяющего существенно улучшить транспортное обслуживание населения, снизить затраты времени на поездки, снять часть нагрузки на автомагистрали за счет переключения населения с пользования легковыми автомобилями на транспорт на магнитной подушке, уменьшить загрязнение окружающей среды.

Маглев не сможет заменить общественный транспорт, а лишь займет свою нишу. Маглев целесообразен там, где происходит контакт с плотной застройкой и скапливаются большие пассажиропотоки, которые не в состоянии обеспечить метрополитен. Особенность конструкции Маглева в том, что тележка охватывает несущие балки, препятствует сходу с полосы движения (схода с рельс); выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух при движении поездов исключены; уровень шума меньше на 10 дБ, чем у трамвая; вибрация в 8 раз меньше, чем у легкорельсового транспорта. Маглев обладает самой высокой скоростью из всех видов общественного наземного транспорта.

**Ключевые слова:** конурбация, агломерация, скоростной городской транспорт, магнитолевитационный транспорт (Маглев).

**Maria V. Fjodorova**

Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I

**SPEED URBAN TRANSPORT FOR MODERN AGLOMERATION**

**Abstract:** The paper highlighted the main shortcomings of the existing types of urban transport; described a new form of settlement – «conurbation», the classification of urban passenger transport; refined the concept of «fast urban transport»; the necessity of creating a new type of passenger transport in terms of strategic and socio-economic development goals and objectives of St. Petersburg; reflected the creation magnetic levitation transport, can significantly improve the transport service of the population, to reduce the time spent on the

trip, take some of the load on the highway due to the shift of the population use cars for transport on a magnetic cushion, reduce pollution.

Maglev is no substitute for public transport, and only takes a niche. Maglev is appropriate where there is a contact with the dense buildings and accumulate large volumes of passenger traffic, which are not able to provide the underground. Design features maglev that covers truck bearing beams, prevents lane departure (derailment); emissions of pollutants into the atmosphere when the movement of trains are excluded; noise is 10 dB less than the rail; Vibration 8 times less than that of light rail transport. Maglev has the highest rate of all public land transport.

**Keywords:** conurbation, agglomeration, high speed urban transport, maglev transport (Maglev).

## **Введение**

Скоростной пассажирский транспорт является необходимым условием социально-экономического развития города. Скоростной транспорт расширяет границы агломераций, увеличивает деловую активность населения, проживающего в регионах, способствует повышению производительности труда, уровню доходов граждан [4].

## **Конурбация как новая форма расселения**

Основой происходящих агломерационных процессов является формирование единой, пространственно и функционально связанной среды, в которой развитая транспортная инфраструктура объединяет в единое целое одно или несколько городских ядер и систему прилегающих центров различного уровня, являясь одним из основных факторов формирования среды, комфортной для проживания.

На протяжении последних лет в регионе идет формирование городской агломерации с центром в Санкт-Петербурге. Агломерация является «ключевой формой расселения, главными узлами опорного каркаса территориальной организации страны, центрами наращивания и реализации инновационного потенциала» [6].

Процесс формирования агломерации диктует необходимость создания современной системы пассажирского городского транспорта, призванной обеспечить возрастающий спрос на услуги транспортной инфраструктуры.

Пассажирский транспорт, являясь одной из подсистем региональной экономической системы, исполняет роль интеграционного фактора в агломерационных формах расселения. В настоящее время система пассажирского транспорта не имеет единой модели организации транспортного обслуживания [9].

Высокие темпы урбанизации населения требуют изменения количественных и качественных характеристик работы транспорта. Количественная характеристика выражается в наращивании пассажиропотоков; качест-

венная – в увеличении скорости перемещения пассажиров, увеличении вместимости транспортных средств.

Ученые-урбанисты, специалисты в области организации городской среды доказали необходимость смены парадигмы планирования застройки и транспортного развития: постепенно превращать существующие мегаполисы в новые виды конурбаций, характеризующихся специализацией поселений, взаимосвязанных, взаимодополняющих и зависимых друг от друга.

Конурбация – городская агломерация полицентрического типа, то есть имеющая в качестве ядер несколько более или менее одинаковых по размеру и значимости городов в отсутствие явно доминирующего. Концентрические структуры городов должны исчезнуть, и поселенческое пространство – организовываться на принципе построения конурбаций (рис. 1).



Рис. 1. Схема организации поселенческой среды «конурбация»

Город должен строиться таким образом, чтобы зоны отдыха, проживания и рабочая зона имели разграничения. Для этого необходима хорошо функционирующая городская система общественного транспорта.

Суть этой идеи в том, что единое городское мультимодальное пространство должно иметь несколько специализированных центров, связанных между собой, дополняющих и зависимых друг от друга. Это центры промышленные или производственные, жилые, научно-образовательные, транспортно-логистические (ТЛЦ). Человек должен жить в экологически чистой среде за городом. Поэтому производственные, деловые территории, требующие большого скопления людей, должны быть рассредоточены на расстояния в десятки, а то и в сотни километров друг от друга, и при этом транспортная доступность таких территорий не должна превышать одного часа [10].

Осуществить предлагаемую стратегию можно лишь на основе скоростного транспорта, обеспечивающего часовую доступность передвижения населения от дома до работы на расстояние трехсот километров и более [2].

Для вывода мегаполисов из системного градостроительного кризиса, угрожающего его экологической безопасности, требуется стимулирование использования общественного транспорта путем повышения его скорости и комфортности, соблюдения графиков движения, приближения остановок наземного транспорта к станциям метро.

Традиционные виды пассажирского транспорта, такие как метрополитен, трамвай, автомобиль не могут обеспечить высокое качество пассажирских перевозок в связи с интенсивным ростом их объема.

Основные недостатки существующих видов городского транспорта:

- низкая комфортабельность, нерегулярность и неудовлетворительная пропускная способность, особенно в условиях пиковых нагрузок;
- низкая скорость сообщения и потеря времени в пробках;
- негативное воздействие на экологическую обстановку в городе: шум (при интенсивной работе транспорта достигает 120 дБ) и загрязнение воздуха (ежегодно возрастает в 1,5 раза);
- высокая аварийность, особенно в автомобильном транспорте [3].

Необходимо искать решения транспортных, а вместе с ними и экологических проблем. Одним из путей решения транспортной проблемы является применение городского скоростного транспорта на основе магнитной левитации.

## **Скоростной пассажирский транспорт**

Специалисты пришли к выводу, что именно скоростной транспорт в состоянии решить основные аспекты развития городов. К ним относятся:

- градостроительный (сохранение единства крупных городов в условиях их развития);
- социальный (сокращение затрат времени населением на передвижение, снижение числа ДТП, повышение комфортности проживания в различных районах города);
- транспортный (сокращение числа автотранспорта и создание резерва провозной способности городского транспорта);
- экологический (снижение интенсивности движения автотранспорта и источников шума);
- экономический (интенсификация использования городской территории за счет повышения плотности застройки, подземной урбанизации, экономии энергоресурсов).

В Стратегии экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года («Стратегия 2030») развитие транспортного комплекса Санкт-Петербурга рассматривается в совокупности с задачей улучшения пространственной организации и жилой среды города, связности районов, совершенствования внешних связей мегаполиса.

Растущий со стороны экономических субъектов и населения города спрос на объемы, а также качество перевозок определяют высокий приоритет мер по модернизации транспортного комплекса и по увеличению скоростей на основных направлениях [8].

При этом в качестве основных тенденций развития транспортной системы города названы: развитие скоростного городского транспорта, обеспечение круглосуточной связности улично-дорожной сети, создание сети радиального, дугового движения, а также минимизация негативного влияния транспорта на городскую среду и население [13].

По нашему мнению, скоростной городской пассажирский транспорт – наземный колесный транспорт, обеспечивающий движение поездов со скоростью до 70 км/ч и осуществляющий движение по специализированным путям – скоростной магистрали, выполняющий регулярные перевозки пассажиров по установленным и фиксированным на длительный период времени маршрутам.

Создание линий скоростного пассажирского движения на основе магнитной левитации станет одной из мер по обеспечению приоритетности развития и преобладания общественного транспорта над индивидуальным автомобильным транспортом, а также роста финансовой и социально-экономической эффективности общественного транспорта [1].

Традиционными видами городского пассажирского транспорта являются автобус, троллейбус, трамвай и пригородно-городской железнодорожный транспорт. В связи с тенденцией разрастания городов-миллионников помимо метрополитена появляются новые виды скоростного городского транспорта: легкорельсовый трамвай (ЛРТ) и транспорт на основе магнитной левитации (МЛТ). Ниже представлена классификация городского пассажирского транспорта (рис. 2).

На основе сравнительной оценки трех видов городского транспорта (табл. 1) мы предлагаем магнитолевитационную (Маглев) технологию [11, 12].

МЛТ не сможет заменить общественный транспорт, а лишь займет свою нишу. Маглев целесообразен там, где происходит контакт с плотной застройкой и скапливаются большие пассажиропотоки, которые не в состоянии обеспечить метрополитен. Особенность конструкции Маглева в том, что тележка охватывает несущие балки, препятствует сходу с полозы движения (схода с рельс); выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух при движении поездов исключены; уровень шума меньше на 10 дБ, чем у трамвая; вибрация в 8 раз меньше, чем у легкорельсового транспорта. Маглев обладает самой высокой скоростью из всех видов общественного наземного транспорта [5].

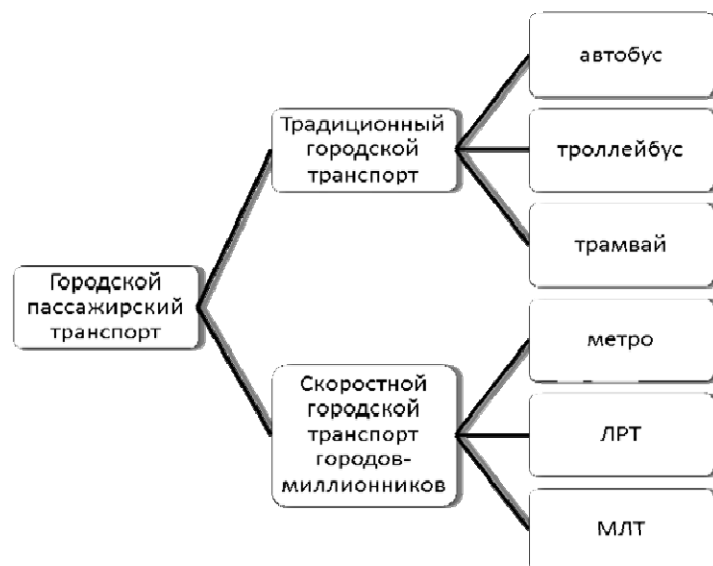


Рис. 2. Классификация городского пассажирского транспорта

**Таблица 1. Сравнительная оценка трех видов городского транспорта (по данным института Машиностроения и материалов Республики Корея)**

| № | Параметр, измеряемый в конкретных единицах или оценочно (лучше, хуже, одинаково)                                                | Легкий рельсовый транспорт (трамвай)                     | Метро                                                    | МЛТ                                                      |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 1 | Безопасность движения (возможность схода с колеи)                                                                               | Возможен                                                 | Возможен                                                 | Не возможен                                              |
| 2 | Маршрутная скорость движения (км/ч), остановки через 1 км при ускорении 1,1 м/сек <sup>2</sup>                                  | 20 км/ч ± 5 км/ч                                         | 35 км/ч ± 5 км/ч                                         | 45 км/ч ± 5 км/ч                                         |
| 3 | Провозная способность (чел./день). Предположим, работает 48 вагонов на 15-километровой линии (местимость вагона 115 чел./вагон) | 36 800 чел./день, интервал каждые 3'8" (2 ваг. 1 сцепка) | 64 800 чел./день, интервал каждые 4'3" (4 ваг. 1 сцепка) | 82 200 чел./день, интервал каждые 3'1" (4 ваг. 1 сцепка) |
| 4 | Зависимость климатических условий на эксплуатацию (снег, гололед)                                                               | Высокое                                                  | Низкое                                                   | Низкое                                                   |
| 5 | Уровень шума при движении, внутри и снаружи, в дБ                                                                               | 70/70                                                    | 70/70                                                    | 65/65                                                    |
| 6 | Уровень вибрации при движении                                                                                                   | Средний                                                  | Средний                                                  | Низкий                                                   |
| 7 | Выделение пыли при движении (металлической, резиновой и т. п.)                                                                  | Высокая                                                  | Высокая                                                  | Низкая                                                   |

| №  | Параметр, измеряемый в конкретных единицах или оценочно (лучше, хуже, одинаково)                 | Легкий рельсовый транспорт (трамвай)    | Метро                           | МЛТ                                           |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|
| 8  | Совместимость с селитебной зоной (жилыми зонами) и влияние на пассажиров                         | Неблагополучная (шум, вибрация, пыль)   | Неблагоприятная (шум, вибрация) | Нет негативного воздействия                   |
| 9  | Возможность прохода в непосредственной близости и «входа» в общественные здания                  | Низкая (шум, вибрация, пыль)            | Низкая (шум, вибрация, пыль)    | Высокая (низкий уровень шума, вибрации, пыль) |
| 10 | Стоимость строительства 1 км «под ключ»                                                          | 20–40 млн \$ США                        | 70 млн \$ США                   | 35 млн \$ США                                 |
| 11 | Расход электроэнергии на пасс/место, кВт/вагон-км                                                | 3,84                                    | 3,84                            | 3,72                                          |
| 12 | Эксплуатационные расходы на пассажир / место (из расчета 80 000 пассажиров в рабочие дни недели) | Похож на эксплуатационные расходы метро | 1,73 \$ США                     | 1,13 \$ США                                   |

В настоящее время предлагаются Маглев – скоростные трассы от Дворца Конгрессов в п. Стрельна до ст. м. «Обухово», с ответвлением на комплекс «Балтийская жемчужина» (рис. 3.), от станции «Рыбацкая» до Колпино и ряд других.

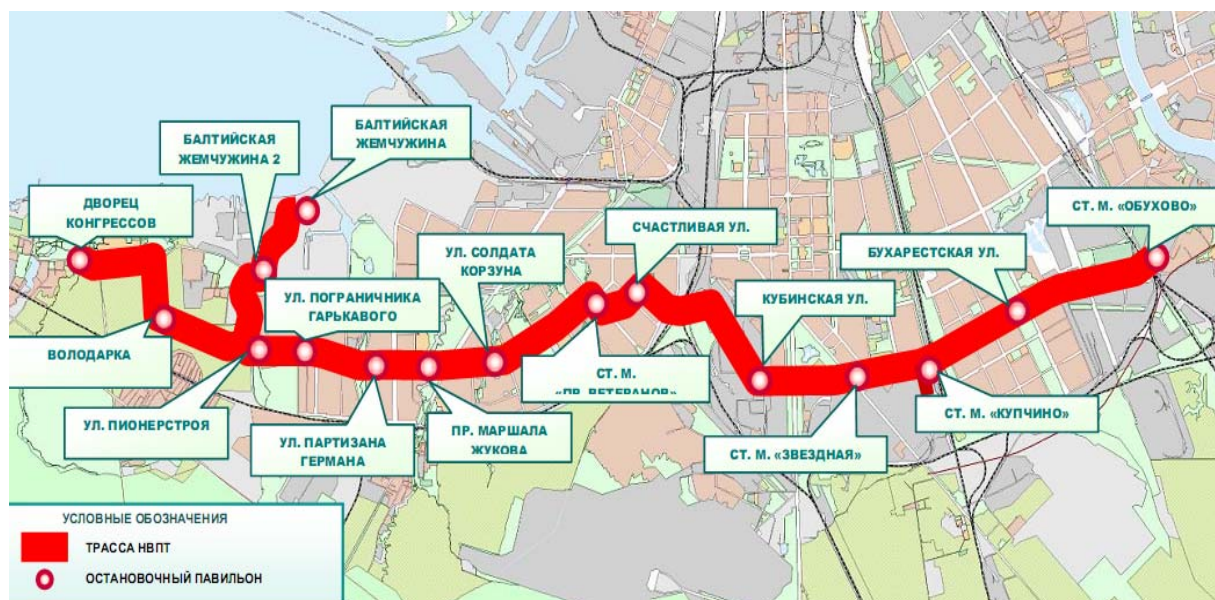


Рис. 3. Дуговая магистраль от дворца Конгрессов до станции метро «Обухово» по магнитолевитационной технологии

Целью строительства Маглев-трассы, проходящей через территории массовой жилищной застройки и обеспечивающей связи пассажиров со станциями метрополитена, является улучшение транспортного обслуживания. Кроме того, происходит снижение затрат времени на передвижение населения и повышение технического уровня подвижного состава, что существенно влияет на комфортность передвижения пассажиров. Это позволит переключить пользователей легковых автомобилей на линию МЛТ, что снизит загрузку автодорог и уменьшит загрязнение окружающей среды [7].

Для удовлетворения спроса на пассажирские перевозки, повышения привлекательности МЛТ, улучшения качества транспортного обслуживания населения необходимо реализовать комплекс мер, направленных:

- на обеспечение высокой скорости сообщения на Маглев-транспорте за счет его движения по выделенной полосе;
- обеспечение в часы пик приемлемых интервалов движения (не более 10 мин);
- обеспечение надежности функционирования и регулярности движения МЛТ;
- повышение комфортабельности поездок, в том числе, за счет снижения наполнения подвижного состава в пиковые периоды не выше 3 чел./м<sup>2</sup> свободной площади пола, использования современного парка вагонов, имеющих высокие транспортно-эксплуатационные, экономические и экологические характеристики;
- обеспечение удобства пересадок на городские виды пассажирского транспорта.

Для качественного обслуживания пассажиров Маглев-транспорта предусматривается строительство линии МЛТ и размещение остановочных пунктов в непосредственной близости к застраиваемым территориям. Протяженность эстакад трассы от дворца Конгрессов до станции метро «Обухово» составит 29 км. Планируется первоначальная установка 14 остановочных павильонов на эстакаде и 5 пересадочных комплексов с возможным повышением количества остановочных пунктов, с сокращением протяженности перегонов от 1,5 км до 1,0 км.

Развитие городского пассажирского транспорта будет осуществляться по двум основным направлениям:

– повышение качества перевозок городским пассажирским транспортом, которое снизит различие между использованием городского пассажирского транспорта и личного автомобиля и, как следствие, обеспечит повышение привлекательности городского пассажирского транспорта и рост объема транспортных услуг, в частности посредством внедрения современного подвижного состава, обеспечивающего повышение комфортности перевозок;

– повышение социально-экономической и финансовой эффективности городского пассажирского транспорта, в частности, за счет привлечения частных инвестиций в развитие скоростного транспорта, которое позволит повысить его темп модернизации и снизить нагрузку на бюджет Санкт-Петербурга.

Также создание линий скоростного городского транспорта будет способствовать решению задач социально-экономического и градостроительного развития Санкт-Петербурга: развитию прилегающих территорий и повышению уровня занятости населения.

## **Заключение**

Одним из путей решения транспортной проблемы является применение городского скоростного транспорта. Альтернативой традиционному городскому транспорту является транспорт на магнитном подвесе – экологически чистый, безопасный, с самой высокой скоростью из всех видов общественного наземного транспорта.

## **Библиографический список**

1. Журавлева Н. А. Экономическая оценка повышения временной и пространственной эффективности железнодорожного транспорта. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» / Труды 2-й Международ. научн. конф., 17–20 июня СПб. 2014 г. – С. 378–390.
2. Зайцев А. А. Транспорт на магнитном подвесе: монография / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. – СПб, ПГУПС, 2010. – 160 с.
3. Федорова М. В. Городской пассажирский транспорт на магнитном подвесе : технико-экономический анализ. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» / Труды 2-й Международ. научн. конф., 29–31 октября СПб. 2013 г. – С. 116–117.
4. Эффект сжатия / Интервью с А. Мишариным // Транспорт России. – 2015. – № 6. – С. 1–3.
5. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / под ред. В.А. Гапановича. – М. : Физматлит, 2014. – 476 с.
6. Лаппо Г. «Агломерации России, инновационный потенциал страны» – Grado журнал о градостроительстве и архитектуре. – 2011. – № 1. – С. 46–49.
7. Frederic P. Miller. JR–Maglev. – 2011. – 124 p.
8. Стратегии экономического и социального развития Санкт-Петербурга на период до 2030 года (утв. Постановлением Правительства Санкт-Петербурга от 13.05.2014. – № 355).

9. Пассажирский форум 2015: материалы выступлений докладчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://passenger-forum.ru/2015/ru/> – Дата обращения : 25.06.2015.

10. Шнейдер М. А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок: управление и экономика: Монография / М.А. Шнейдер, Е. А. Проскурякова. – СПб. : Типография НП-Принт, 2012. – 288 с.

11. Shanghai maglev – all you need to know / Сайт [maglev.net](http://www.maglev.net) [Электронный ресурс]. – Код доступа: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev>. – Дата обращения : 25.05.2015.

12. The emerging intermodal industry / Pike Emily // Container News. – 1990. – 25, № 10. – P. 16–19.

13. Neue Betriebsverfahren im kombinierten verkehr / Boese P., Hansmann A., Nöthlich M. // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. – 1989. – № 11. – С. 699–702, 705–706.

## References

1. Zhuravleva N. A. Ekonomicheskaya ocenka povysheniya vremennoj i prostranstvennoj ehffektivnosti zheleznodorozhnogo transporta [Economic Evaluation of Increasing Temporal and Spatial Efficiency of Rail Transport]. *Trudy 2 Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the 2nd Int. Conf. “Maglev Transport Systems and Technologies”). St. Petersburg, 2014, pp. 378–390.

2. Zaitsev A. A., Talashkin G. N, Sokolova Y. V. *Transport na magnitnom podvese* [Transport magnetic suspension]. St. Petersburg, 2010. 160 p.

3. Fyodorova M. V. Gorodskoj passazhirskij transport na magnitnom podvese: tekhniko-ekonomicheskij analiz [Urban passenger transport on magnetic suspension: feasibility study]. *Trudy 2 Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the 2nd Int. Conf. “Maglev Transport Systems and Technologies”). St. Petersburg, 2014, pp. 116–117.

4. EHffekt szhatiya. Interv'yu s A. S. Misharinym [The effect of compression. Interview with Alexander Misharin]. *Transport Rossii – Transport of Russia*, 2015, no. 6, pp. 1–3.

5. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Maglev transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.

6. Lappo G. *Grado, zhurnal o gradostroitel'stve i arhitekture – Grado, a magazine about urban planning and architecture*, Moscow, 2011, no 1, pp. 46–49.

7. Miller Frederic P. JR–Maglev. NY, 2011. 124 p.

8. Strategii ekonomicheskogo i social'nogo razvitiya Sankt-Peterburga na period do 2030 goda (utverzhdено Postanovleniem Pravitel'stva Sankt-

Peterburga ot 13.05.2014 no 355) [Strategy for Economic and Social Development of St. Petersburg for the period up to 2030 approved by the. (Resolution of the Government of St. Petersburg of 13.05.2014 no 355)].

9. *Passazhirskij forum 2015* (Passenger Forum 2015), available at: <http://passenger-forum.ru/2015/rus> (25/06/2015).

10. Schneider M. A., Proskuryakova E. A. *Rynok prigorod-nyh zheleznodorozhnyh perevozok: upravlenie i ehkonomika* [Market suburban rail transportation: management and economics]. St. Petersburg, 2012. 288 p.

11. Site [maglev.net](http://www.maglev.net), URL: <http://www.maglev.net/shanghai-maglev> (12/06/2015).

12. Pike E. *Container News*, 1990, vol. 25, no. 10, pp. 16–19.

13. Boese P., Hansmann A., Netlikh M. *Eisenbahntechn. Rdsch*, 1989, no. 11, pp. 699–702, 705–706.

**Сведения об авторе:**

ФЁДОРОВА Мария Владимировна, аспирант кафедры «Экономика транспорта», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, тел. 89602682219, E-mail: [tale19quale@mail.ru](mailto:tale19quale@mail.ru)

**Information about author:**

Maria V. FJODOROVA, postgraduate student (Economics), Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, E-mail: [tale19quale@mail.ru](mailto:tale19quale@mail.ru)

## Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 53.537

**А. А. Дёмина, А. В. Сафонов, О. А. Ковальчук, Е. Р. Запретилина,  
И. Ю. Родин, Е. Н. Андреев**

АО Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д. В. Ефремова

### **РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТА ВТСП МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИИ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

Дата поступления 28.07.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В последнее время все чаще рассматриваются перспективы применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в качестве обмоточных токонесущих элементов магнитных систем различного назначения [1], [2], [6]. Особенно привлекательной кажется возможность работы таких систем при температуре жидкого азота.

В предлагаемой статье описывается макет модуля магнитной системы, выполненный на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент ВТСП-2, разработанный для установки и испытаний на действующем макете статической левитации. В действующем макете левитация платформы осуществляется за счет взаимодействия магнитного поля сборки постоянных магнитов, установленных на платформе, с полем аналогичныхборок, расположенных в путевой структуре. Компактный ВТСП модуль замещает две сборки постоянных магнитов, установленных на платформе. Каждый из блоков модуля представляет собой ВТСП-2 обмотку рейтрековой формы с токовыми вводами, силовой структурой, системой позиционирования и раскрепления, размещенную в криостате, обеспечивающем при минимальной толщине стенки требуемую механическую прочность и тепловую изоляцию при азотной температуре.

Макет унифицированного сверхпроводникового модуля успешно прошел предварительные испытания.

**Ключевые слова:** магнитная левитация, катушка, галета, криостат, сверхпроводник.

**A. A. Demina, A. V. Safonov, O. A. Kovalchuk, E. R. Zapretilina,  
I. Yu. Rodin, E. N. Andreev**  
JSC «Efremov's NII-EFA»

## **DEVELOPMENT AND TESTING PROTOTYPE OF HTS MODULE FOR THE SYSTEM OF MAGNETIC LEVITATION OF VEHICLE**

**Abstract:** In recent years increasingly discusses the prospects of application of high-temperature superconductors (HTS) as the winding current-carrying elements of magnetic systems for various purposes. It seems particularly attractive possibility of such systems at liquid nitrogen temperature.

The article describes the prototype of module of the magnetic system which is made on the basis of high-temperature superconducting tapes, designed for the installation and testing on a working model of a static levitation. In the working model levitation of the platform carried by the interaction of the magnetic field of the assembly of permanent magnets mounted on the platform with a field similar to assemblies located in the track structure. Compact HTS module replaces the two assemblies of permanent magnets mounted on the platform. Each block of the module represents HTS racetrack coil with current inputs, power structure, positioning system and bracing which is placed in a cryostat, providing at minimum wall thickness of the required mechanical strength and thermal insulation at liquid nitrogen temperature.

The prototype of unified superconducting module successfully passed preliminary tests.

**Key words:** magnetic levitation, coil, pancake, cryostat, superconductor.

### **Введение**

Макет сверхпроводникового модуля состоит из двух блоков, каждый из которых включает в себя сверхпроводящую (ВТСП-2) катушку рейтрековой формы с силовой конструкцией и системой токовых вводов, а также компактный и облегченный криостат с системой позиционирования и крепления ВТСП катушки. Важной особенностью сверхпроводникового модуля является то, что он разработан для установки и испытаний на действующем макете статической левитации, где предусмотрена система крепления криостатов.

### **Технология изготовления сверхпроводящей (ВТСП-2) катушки**

Сверхпроводящая катушка представляет собой сборку из двух одиночных галет рейтрековой формы, намотанных из двух типов лент. Первая лента производства фирмы American Superconductor, ширина которой равна 4,8 мм, толщина равна 200 мкм, в статическом поле имеет критический ток 100 А при температуре 77 К. Вторая лента производства отечественной фирмы SuperOx, ширина которой равна 4 мм, толщина равна 100 мкм, в статическом поле имеет критический ток 100 А при температуре 77 К. Изготовлению галет предшествовала предварительная изоляция провода поли-

амидной лентой толщиной 20 мкм вполнахлеста на специальном изолирующем станке. Процесс нанесения витковой изоляции на ленту представлен на рис. 1. Внешний вид изолированной галеты представлен на рис. 2.

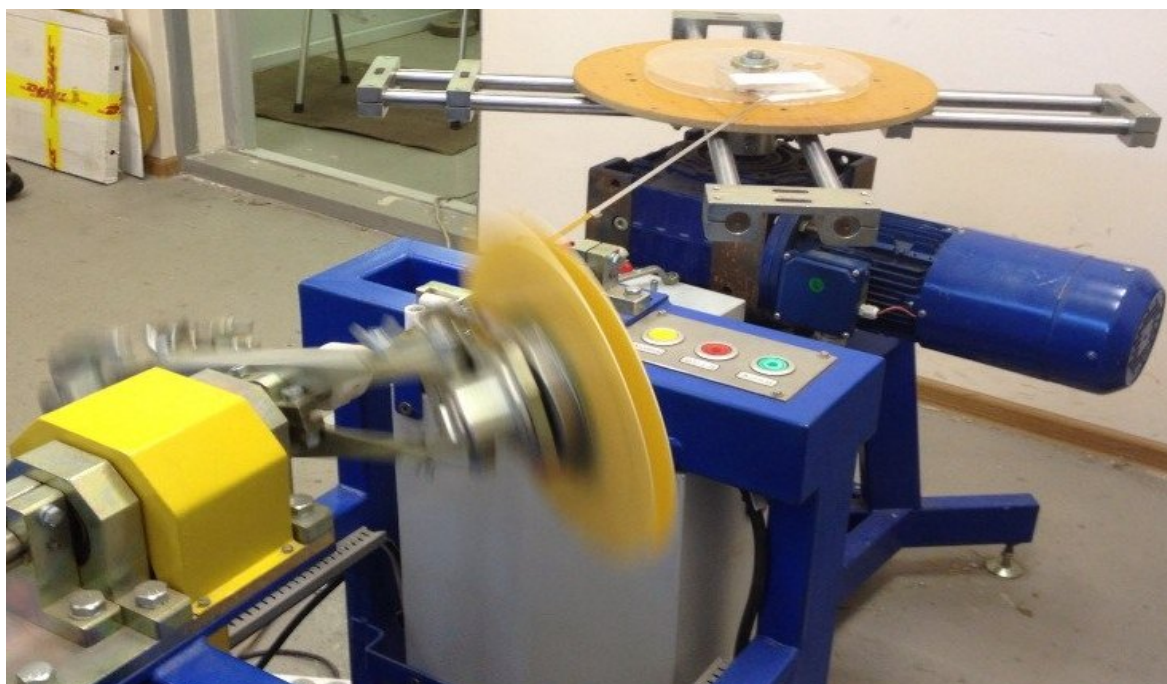


Рис. 1. Процесс нанесения витковой изоляции на ленту



Рис. 2. Внешний вид изолированной ленты

Намотка галеты представлена на рис. 3. Изолированная сверхпроводящая лента наматывается на станке на дюралюминиевые каркасы с предварительным размещением на планшайбе стеклоткани толщиной 20 мкм для бандажа готовой галеты. Внутренний конец ленты до окончания намотки предварительно закреплен на собственном каркасе.

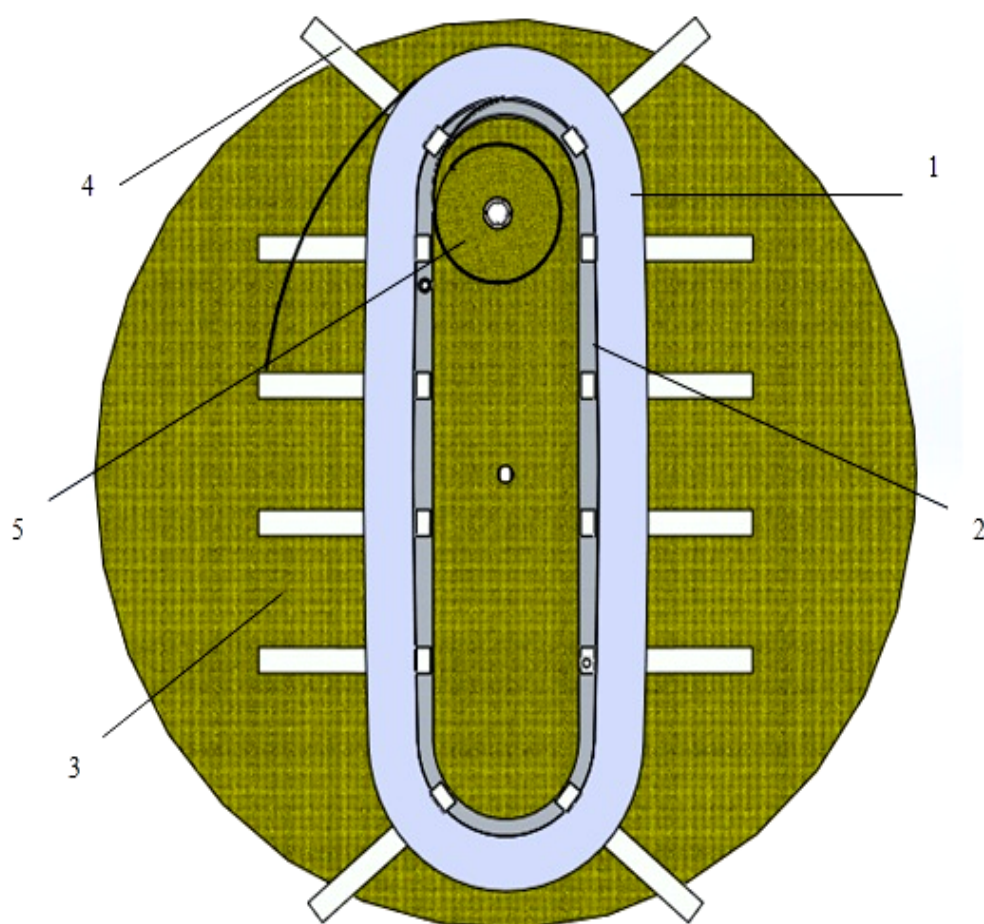


Рис. 3. Намотка галеты:

*поз. 1* – сверхпроводящая лента; *поз. 2* – дюралюминиевый каркас;  
*поз. 3* – планшайба; *поз. 4* – стеклоткань;  
*поз. 5* – каркас для выводного конца ленты

По окончании намотки двух галет осуществлялась сборка катушки с предварительной прокладкой межслоевой изоляции между ними, а также обеспечением соосности и равенства габаритных размеров нижней и верхней галет. Модель сборки галет представлена на рис. 4.

На завершающих этапах производилась разработка и сборка токовых вводов, представленных на рис. 5. Токовый ввод состоит из гнутой по профилю катушки медной перемычки; гибкой средней части, выполненной в виде провода типа ПШЦ; медной пластины и медного стержня. Гибкая средняя часть обеспечивает точное позиционирование относительно крышки криостата, в котором размещается катушка.

На следующем и завершающем этапе сборки осуществлялась пайка токовых вводов, а также замоноличивание полученной катушки с помощью стеклоленты шириной 10 мм и толщиной 100 мкм с промазкой эпоксидным компаундом. Внешний вид готовой катушки представлен на рис. 6.

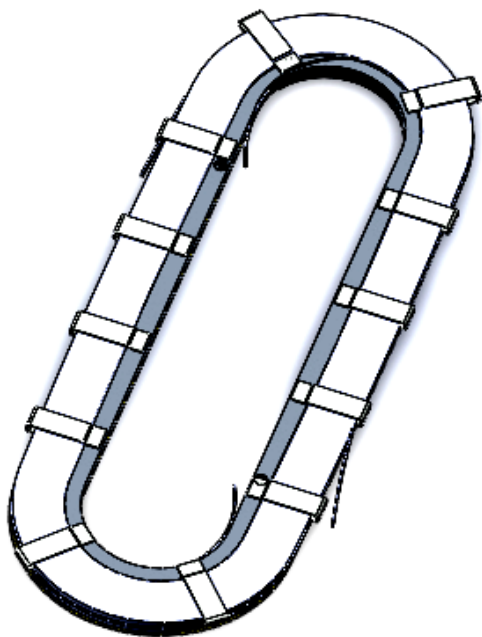


Рис. 4. Модель сборки галет

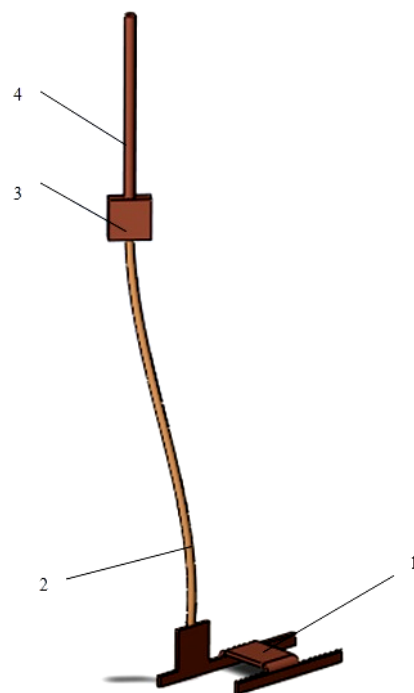


Рис. 5. Внешний вид токового ввода:  
 поз. 1 – медная перемычка; поз. 2 – провод типа  
 ПЩ; поз. 3 – медная пластина;  
 поз. 4 – медный стержень

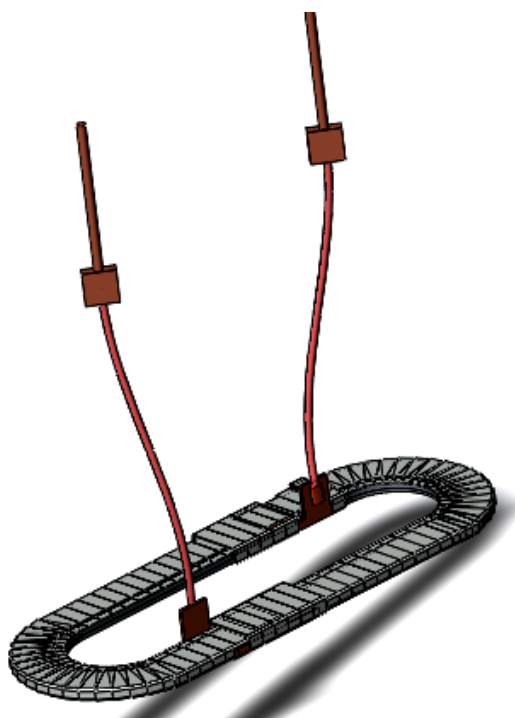


Рис. 6. Внешний вид сверхпроводящей катушки

## Разработка, изготовление и испытание криостата

Для испытания макета ВТСП модуля для системы магнитной левитации транспортного средства было изготовлено два азотных криостата с вакуумной изоляцией. Внешний вид одного из них представлен на рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид азотного криостата

При проектировании данного криостата требовалось выполнить ряд условий. Масса криостата должна быть минимальной; должны строго соблюдаться геометрические размеры, а также должно быть обеспечено минимальное расстояние от сверхпроводящей катушки до «рельса».

Криостат изготовлен из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 1 мм. При откачке вакуумного кожуха криостата возможен прогиб стенок. Во избежание этого на внутренней поверхности вакуумного объема установлены дистанционные ограничители, которые изготовлены из текстолита. Внешний вид ограничителей представлен на рис. 8.

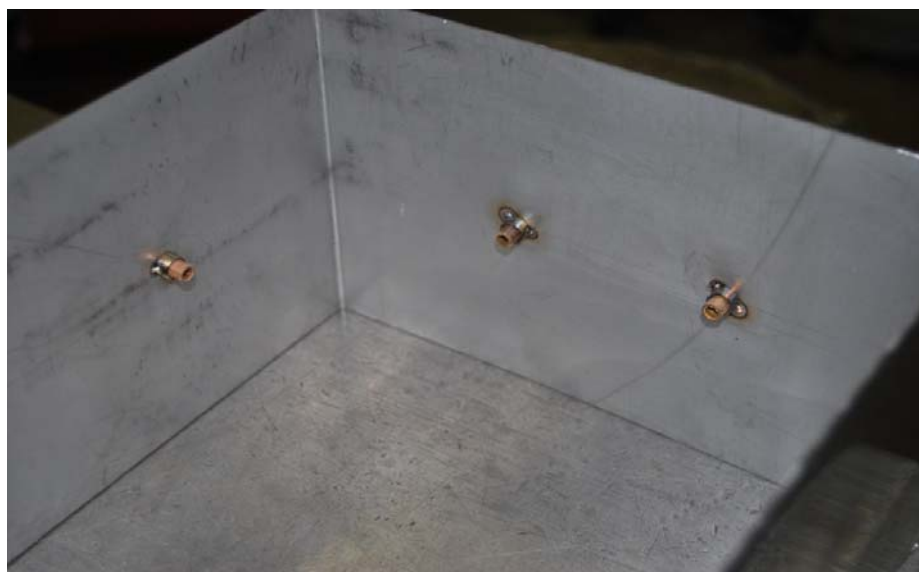


Рис. 8. Текстолитовые дистанционные ограничители

Для расчета распределения температуры между стенками вакуумного кожуха, одна из которых имеет температуру 80 К, а другая 300 К, и текстолитовыми дистанционными ограничителями была разработана конечная элементная модель в программе femm. В результате расчета получено, что при расстоянии между стенками 10 мм, температура наружной поверхности будет около 290 К, что требует установки текстолитового дистанера длиной 10 мм. На рис. 9 представлена расчетная модель для определения распределения температуры в криостате.

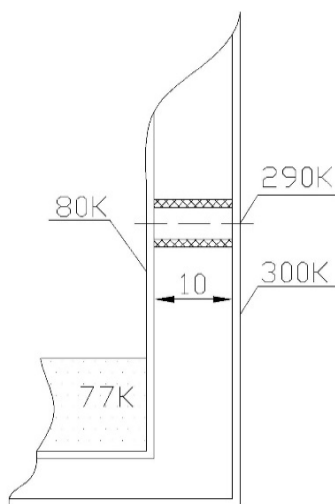


Рис. 9. Расчетная модель для определения распределения температуры в криостате

Также в местах контакта дистанционного ограничителя с наружной стенкой криостата установлена изоляция и предусмотрена дополнительная клейка металлизированной пленки. Такая же изоляция установлена и на крышке криостата, для меньшего обмерзания крышки и препятствия выхода паров газообразного азота. Внешний вид изоляции на крышке криостата представлен на рис. 10.



Рис. 10. Внешний вид изоляции на крышке криостата

После изготовления криостата были проведены испытания на герметичность при помощи гелиевого течеискателя методом обдува. Фотография испытаний приведена на рис. 11. Натекание гелия составило  $5.7 \cdot 10^{-10}$  Па·м<sup>3</sup>/с, что соответствует нормам герметичности для данного типа изделий.



Рис. 11. Испытание на герметичность

Помимо испытаний на герметичность, проведены «холодные» испытания жидким азотом, а затем повторные испытания на герметичность. Фотография «холодных» испытаний приведена на рис. 12.



Рис. 12. «Холодные» испытания жидким азотом

Для уменьшения теплопритока давление в вакуумном кожухе криостата – не более  $10^{-5}$  торр.

## Предварительные испытания

Макет сверхпроводникового модуля успешно прошел предварительные испытания в жидком азоте.

График, представленный на рис. 13, описывает заведение тока в систему. Подъем тока первоначально осуществлялся на 5 А, далее на 2 А. Для затухания индуктивной составляющей напряжения выдерживалась «полочка», равная 1 минуте. Подъем тока осуществлялся до возникновения активной составляющей напряжения, которая, как видно из графика, появилась на 4000 с при токе 50 А.

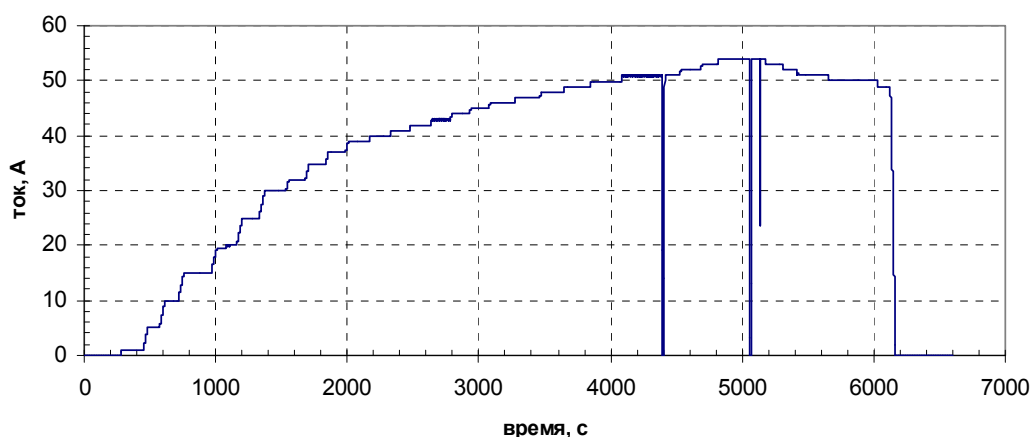


Рис. 13. График заведения тока

График, представленный на рис. 14, описывает изменение напряжения во времени. Пики — это индуктивная составляющая напряжения во время подъема тока, которая затухает при выходе на «полочки». Активная составляющая напряжения появляется после 50 А. Максимально заводимый в систему ток составил 55 А.

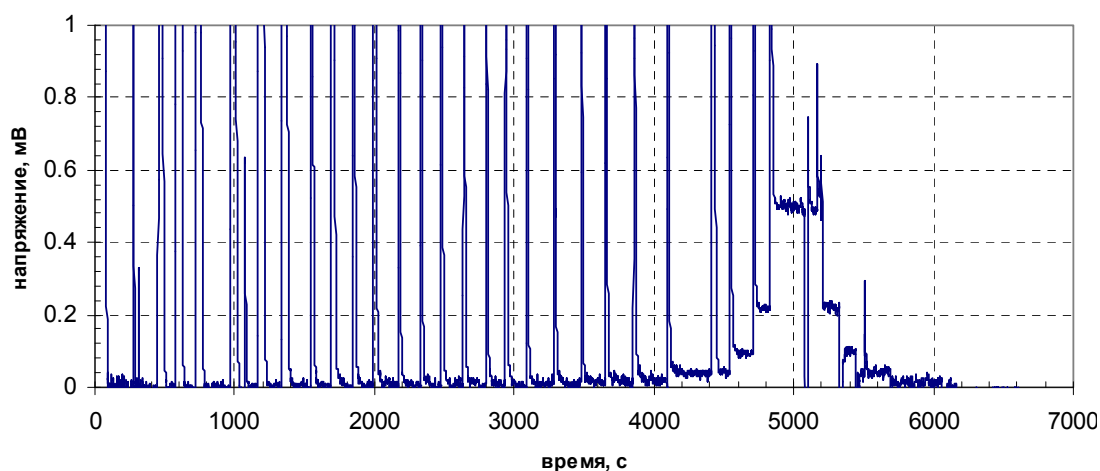


Рис. 14. Изменение напряжения во времени

Испытания подтвердили, что токонесущая способность данной модели соответствует расчетам [4], [7].

Изготовленный макет сверхпроводникового модуля подготовлен для испытаний на действующем демонстрационно-испытательном стенде, где левитация осуществляется за счет взаимодействия магнитного поля сборки постоянных магнитов, установленных на платформе, с полем аналогичных сборок, расположенных в путевой структуре. Компактный ВТСП модуль замещает две сборки постоянных магнитов, установленных на платформе. Модель демонстрационно-испытательного стенда статической левитации представлена на рис. 15.

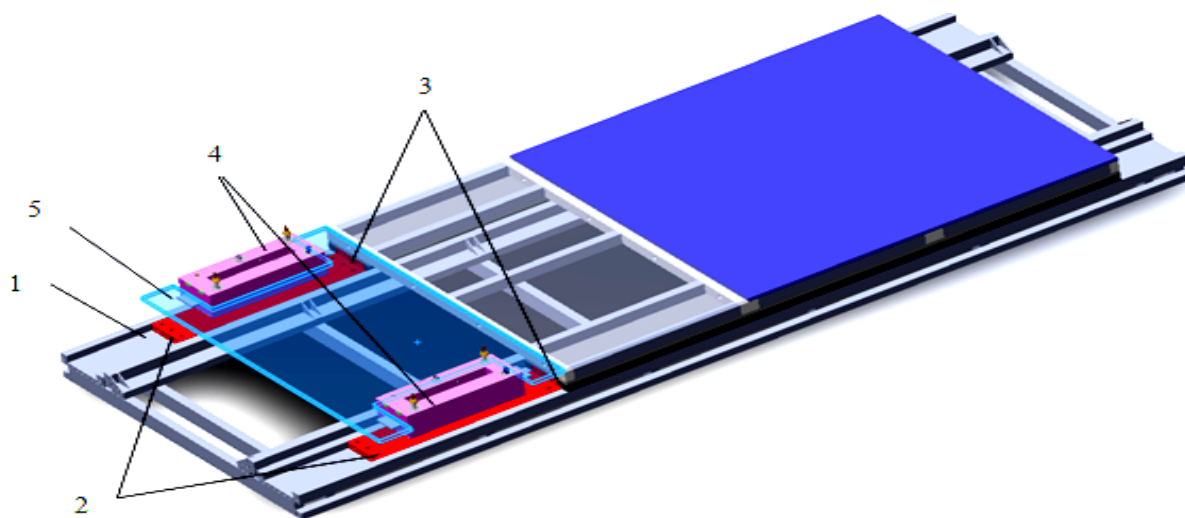


Рис. 15. Модель демонстрационно-испытательного стенда статической левитации:

*поз. 1 – платформа; поз. 2 – постоянные магниты, расположенные на путевой структуре; поз. 3 – постоянные магниты, расположенные на платформе; поз. 4 – компактный ВТСП модуль; поз. 5 – груз*

Работа была выполнена в рамках гранта РФФИ. В ходе проведенной работы была разработана технология и изготовлена пилотная сверхпроводящая ВТСП катушка; разработан, изготовлен и испытан криостат, а также собран и испытан макет сверхпроводникового модуля системы левитации и стабилизации, выполненный на основе высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения (ВТСП-2), работающий при температуре жидкого азота.

Полученные результаты подтверждают возможность создания крупномасштабных прототипов магнитолевитационных систем, использующих сверхпроводниковые модули. Проведенные предварительные испытания подтвердили адекватность используемого для модельного проектирования кода.

Следующим шагом планируется испытание сверхпроводникового модуля на действующем демонстрационно-испытательном стенде статической левитации.

## Библиографический список

1. Tsuchiya, M. Ohsaki, H. (September 2000). «Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductors» (PDF). *Magnetics*, IEEE.
2. H. Kamijo, K. Nemoto, and H. Fujimoto, *Advances in Superconductivity IX* (Tokyo: Springer-Verlag, 1997). – P. 1473.
3. M. Ogata, K. Nagashima, M. Iwamatsu, A. Inoue, Y. Miyazaki, Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train, Dresden, Germany, 2006. – Pp. 275–280.
4. Zhukovsky, A. Schultz, J., Smith, B. et al. (2001). Magnet for the Floating coil of LDX // *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*. Vol. 11, 1873–1876.
5. В. М. Амосков, Д. Н. Арсланова, А. М. Базаров, Г. А. Баранов, А. В. Белов, В. А. Беляков, Т. Ф. Белякова, В. Н. Васильев, Е. И. Гапионов, А. А. Зайцев, М. В. Капаркова, В. П. Кухтин, А. Н. Лабусов, Е. А. Ламзин, М. С. Ларионов, Н. А. Максименкова, В. М. Михайлов, А. Н. Неженцев, И. Ю. Родин, С. Е. Сычевский, А. А. Фирсов, М. В. Хохлов, Н. А. Шатиль. Адаптация вычислительной технологии моделирования установок термоядерного синтеза для анализа и оптимизации магнитных подвесов левитационных транспортных систем // *Вопросы атомной науки и техники, сер. Термоядерный синтез*, М. : НИЦ «Курчатовский институт», 2014. – Т. 37, вып. 4. – С. 84–95.
6. Сверхпроводниковые технологии для создания модуля транспортной системы магнитной левитации / М. С. Астров, Е. Р. Запретилина, О. А. Ковальчук, И. Ю. Родин, С. Б. Федотова // *Известия ПГУПС*, 2014. – № 3. – С. 40–55.
7. Д. Н. Арсланова, Г. А. Баранов, В. А. Беляков, В. Н. Васильев, А. А. Зайцев, Е. А. Ламзин, М. В. Михайлов, И. Ю. Родин, С. Е. Сычевский, А. А. Фирсов, Н. А. Шатиль, В. А. Глухих, Е. А. Ламзин, О. Г. Филатов, А. В. Мизинцев, С. Н. Васильев, Д. А. Овсянников, Детальное моделирование и анализ электродинамических подвесов левитационных грузовых транспортных систем // тезисы к 3-й Международной научной конференции «Магнито-левитационные транспортные системы и технологии», 2015. – С. 34.

## References

1. Tsuchiya M., Ohsaki H., *IEEE Magnetics*, 2000, vol. 37, no. 2
2. Kamijo H., Nemoto K., Fujimoto H. *Advances in Superconductivity IX*. Tokyo, 1997. p. 1473.
3. Ogata M., Nagashima K., Iwamatsu M., Inoue A., Miyazaki Y. Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train. Dresden, 2006, pp. 275–280.
4. Zhukovsky A., Schultz J., Smith B., *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2001, vol. 11, pp. 1873–1876.
5. Amoskov V. M., Arslanova D. N., Bazarov A. M., Baranov G. A., Belov A. V., Belyakov V. A., Belyakov T. F., Vasilyev V. N., Gapionok E. I., Zaitsev A. A.,

Kaparkova M. V., Kuhtin V. P., Labusov A. N., Lamzin E. A., Larionov M. S., Maksimenkova N. A., Mikhailov V. M., Nezhentsev A. N., Rodin I. Yu., Sychevsky S. E., Firsov A. A., Khokhlov M. A., Shatil N. A. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki, seriya Termoyadernyj sintez – Issues of atomic science and technology, a series of Fusion*, Moscow, 2014, vol. 37, no. 4, pp. 84–95.

6. Astroff M. S., Zapretilina E. R., Kovalchuk O. A., Rodin I. Y., Fedotov S. B. *Izvestiya PGUPS – News PGUPS*, St. Petersburg, 2014, no. 3 pp. 40–55.

7. Arslanova D. N., Baranov G. A., Belyakov V. A., Vasiliev V. N., Zaitsev A. A., Lamzin E. A., Mikhailov M. V., Rodin I. Yu., Sychevsky S. E., Firsov A. A., Shatil N. A., Gluhikh V. A., Lamzin E. A., Filatov O. G., Pinky A. V., Vasilyev S. N., Ovsyannikov D. A. Detal'noe modelirovanie i analiz ehlektrodynamiceskikh podvesov levitacionnykh gruzovykh transportnykh sistem [Detailed modeling and analysis of electrodynamic levitation suspensions freight transport system] *Tezisy 3-ej Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii»* (Theses the 3rd Int. Conf. "Maglev transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2015, p. 34.

#### **Сведения об авторах:**

ДЁМИНА Анна Андреевна, инженер – исследователь; АО НИИЭФА, E-mail: demina@sintez.niiefa.spb.su

САФОНОВ А. В., начальник стенда; АО НИИЭФА, E-mail: safonovav@sintez.niiefa.spb.su

АНДРЕЕВ Е. Н., начальник стенда; АО НИИЭФА, E-mail: andreev@sintez.niiefa.spb.su

ЗАПРЕТИЛИНА Е. Р., к. т. н., начальник лаборатории; АО НИИЭФА, E-mail: zapretilina@sintez.niiefa.spb.su

КОВАЛЬЧУК О. А., начальник лаборатории; АО НИИЭФА, E-mail: kovalchuk@sintez.niiefa.spb.su

РОДИН И. Ю., к. т. н., начальник отдела; АО НИИЭФА, E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

#### **Information about authors:**

DEMINA Anna, an engineer – the researcher, E-mail: demina@sintez.niiefa.spb.su

SAFONOV A. V., head of the stand; JSC Efremov, E-mail: safonovav@sintez.niiefa.spb.su

ANDREEV E. N., Head of the stand; JSC Efremov, E-mail: andreev@sintez.niiefa.spb.su

ZAPRETILINA E. R., Ph.D., chief of the laboratory; JSC Efremov, E-mail: zapretilina@sintez.niiefa.spb.su

KOVALCHUK O. A., chief of the laboratory; JSC Efremov, E-mail: kovalchuk@sintez.niiefa.spb.su

RODIN I. Yu., Ph.D., head of the department; JSC Efremov, E-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su

---

© Дёмина А. А., Сафонов А. В., Ковальчук О. А., 2015

© Запретилина Е. Р., Родин И. Ю., Андреев Е. Н., 2015

УДК 629.3.022

**Д. Г. Бейн, Е. А. Исполова, Ю. Б. Житков, Р. А. Сахаров**  
Акционерное общество «Научно-внедренческий центр «Вагоны»

## **КОНСТРУКЦИЯ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТЕЛЕЖКИ**

Дата поступления 19.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В настоящей работе изложены результаты разработки металлоконструкции опытного образца магнитолевитационной тележки для перевозки контейнеров с использованием технологии магнитодинамической левитации «Inductrack». Представлено описание вариантов конструкции и результаты расчета на прочность.

**Ключевые слова:** магнитная левитация, расчет на прочность, метод конечных элементов, перевозка контейнеров.

**D. G. Beyn, E. A. Ispolova, Y. B. Zhitkov, R. A. Sakharov**  
Joint stock company «Scientific Implementation center «Wagons»  
DESIGN AND ASSESSMENT OF STRENGTH MAGNETO-LEVITATION  
BOGIE

**Abstract:** The article presents the results of the prototype magneto-levitation bogie for the transport of containers using the technology of magneto-dynamic levitation «Inductrack».

The main elements of the prototype bogie are:

- supporting welded steel frame, which is attached to the container stops, blocks, magnets, support and guide wheels;
- the magnets are combined into blocks according to the scheme «an Array of Halbach»;
- shunting wheel required for pre-acceleration of the bogie (with levitation wheels not touching the track structure);
- guide wheels, which serve for centering the bogie on the road when driving on a plot of acceleration.

Cart design was developed taking into account the possibility of placing massive superconductors instead of permanent magnets.

Carts are designed to carry containers of various types, it does not require additional devices for connecting the carriages together.

To assess the strength of the construction was taken following calculation modes:

- the moving bogie, when you turn on linear synchronous motor, a trolley supported by shunting wheel and operate the inertial load;
- braking when the bogie is in magneto-levitation flight support with the maneuvering of the wheel is missing, there are inertial load;

- support bogie magnets on when the bogie is in magneto-levitation flight;
- support the trolley on the shunting wheel, the linear synchronous motor is turned off.

The calculation was carried out by finite element method using the design package «Ansys Workbench».

**Keywords:** magnetic levitation, strength analysis, finite element method, transport of containers.

## Введение

В монографии [1] отмечено, что создание и внедрение инновационных технологий в сфере транспортной инфраструктуры являются жизненно важными вопросами для экономики Российской Федерации.

Актуальным направлением инновационного развития транспортной инфраструктуры является внедрение технологии магнитодинамической левитации в область грузовых перевозок, в частности для перевозки контейнеров.

Перспективной магнитолевитационной технологией для перевозки контейнеров является технология магнитодинамической левитации «Inductrack».

В технологии магнитодинамической левитации «Inductrack» используются постоянные магниты [2], при этом для их работы не требуется криогенное охлаждение. Преимуществом указанной технологии является высокий зазор между активной частью путевой структуры и магнитами, установленными на транспортном средстве (до 100 мм) [3].

Путевая структура при использовании технологии «Inductrack» состоит из участков разгона, необходимого для набора предлевитационной скорости, стоянки, торможения и активной части. Активная часть путевой структуры состоит из двух треков левитации и боковой стабилизации и расположенного между ними статора тягового линейного синхронного двигателя [3].

В настоящей работе поставлены следующие задачи:

- выбор рациональной несущей системы и разработка проекта опытной магнитолевитационной тележки для перевозки стандартизированных контейнеров [4];
- анализ возможных нагрузок на магнитолевитационную тележку при использовании технологии магнитодинамической левитации «Inductrack»;
- расчет на прочность опытной конструкции тележки методом конечных элементов (МКЭ).

### 1. Выбор рациональной несущей системы и разработка конструкции опытной тележки

В результате конструктивных проработок компоновки тележки под известные геометрические параметры путевой структуры была разработана несущая система в виде Н-образной рамы (рис. 1), состоящей:

- из основной несущей балки прямоугольного сечения;
- продольных балок для маневровых колес и продольных балок для направляющих колес;
- кронштейнов для крепления блоков с магнитами.

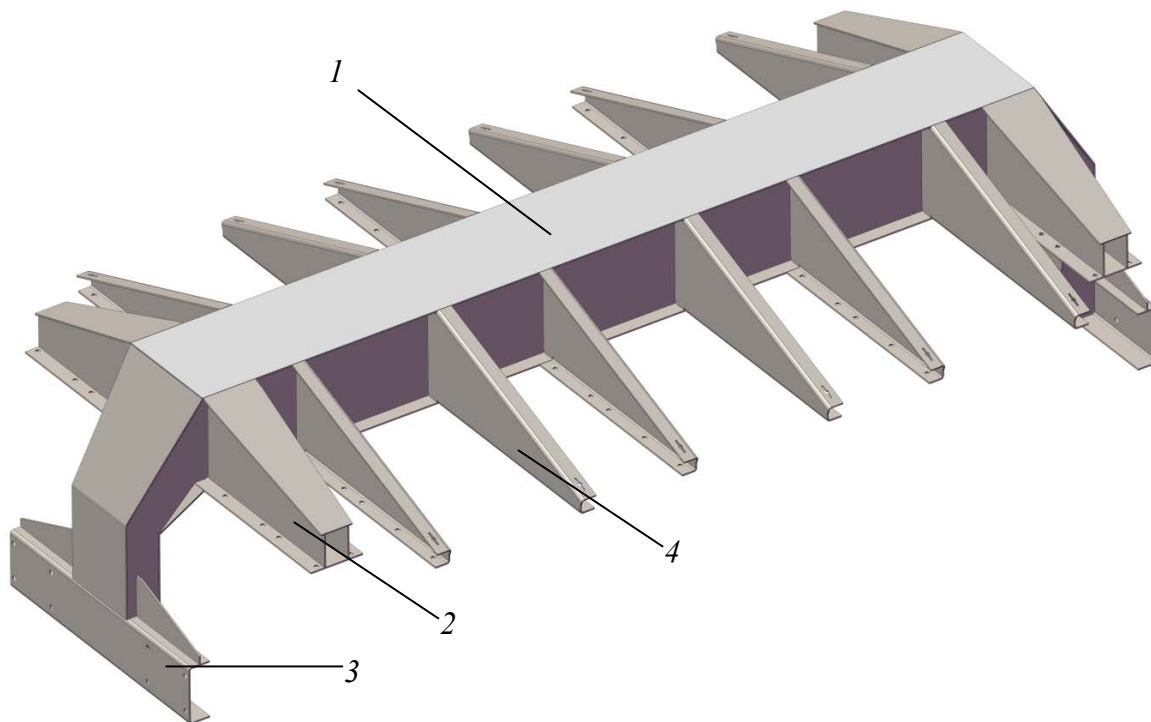


Рис. 1. Рама опытного образца магнитолевитационной тележки:

- 1 – основная несущая балка прямоугольного сечения;
- 2 – продольные балки для маневровых колес;
- 3 – продольные балки для направляющих колес;
- 4 – кронштейны для крепления блоков с магнитами

Конструкция тележки разработана с учетом возможности размещения массивных сверхпроводников взамен постоянных магнитов для использования технологии «МагТранСити» (сверхпроводниковая модификация технологии «Inductrack» [3]).

Основными элементами опытного образца тележки являются (рис. 2):

- несущая сварная стальная рама, к которой крепятся фитинговые упоры, блоки с магнитами, маневровые и направляющие колеса;
- магниты, объединенные в блоки по схеме «Массив Хальбаха» [5];
- маневровые колеса, необходимые для предварительного разгона тележки (при левитации колеса не касаются путевой структуры);
- направляющие колеса, которые служат для центрирования тележки при движении на участке разгона.

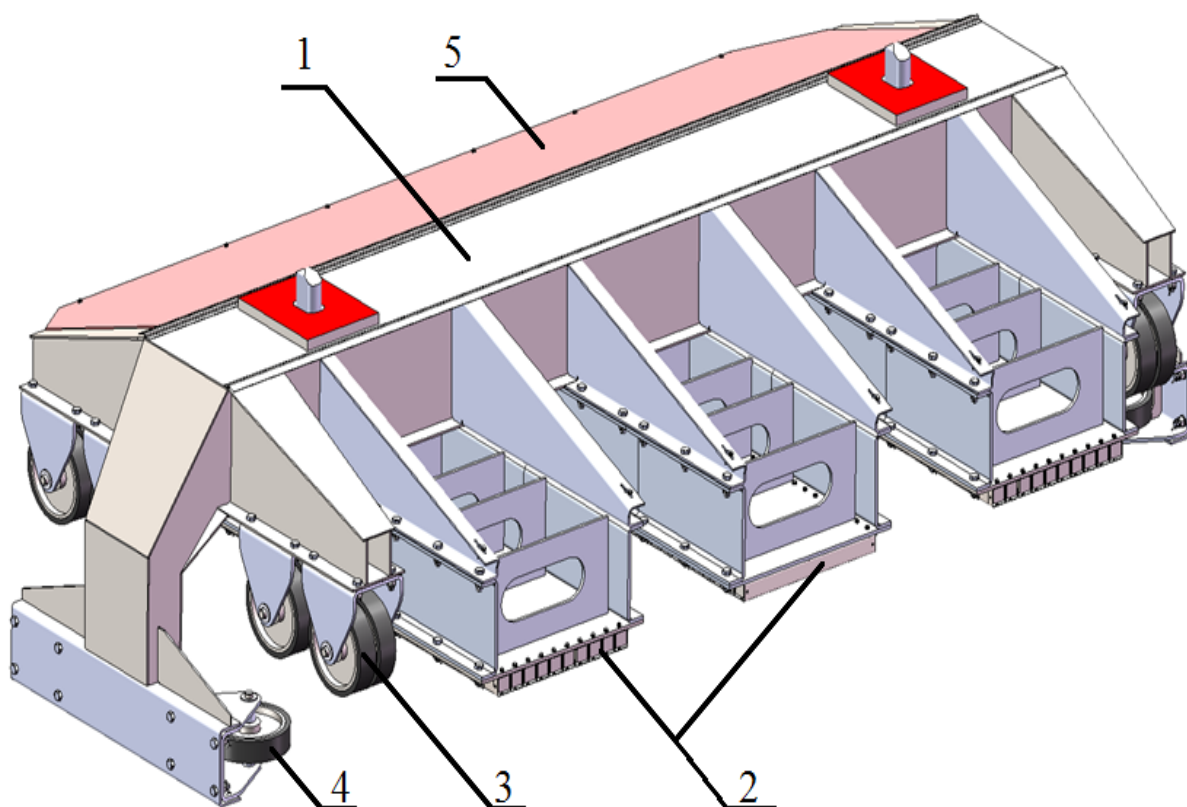


Рис. 2. Общий вид опытного образца магнитолевитационной тележки:

1 – рама; 2 – блоки с магнитами; 3 – маневровые колеса;  
4 – направляющие колеса; 5 – защитный кожух

Геометрические характеристики поперечных сечений несущих элементов рамы оптимизированы по критерию наименьшей металлоемкости с использованием методов оптимального проектирования конструкций [6].

Для перевозки контейнеров с учетом наличия кривых участков в путевой структуре предложено конструктивное исполнение магнитолевитационной тележки (рис. 3), отличающееся от вышеописанной наличием поворотной опорной площадки. Опорная площадка представляет собой лист, на котором установлены фитинговые упоры, пятник и скользуны.

Передача вертикальных нагрузок от контейнера на раму тележки с поворотной опорой осуществляется через скользуны, передача поперечных и продольных нагрузок – через пятниковый узел.

Для предотвращения свободного вращения поворотной опоры в поперечном состоянии предусмотрены ограничители.

Основные параметры и размеры опытной магнитолевитационной тележки представлены в табл. 1.

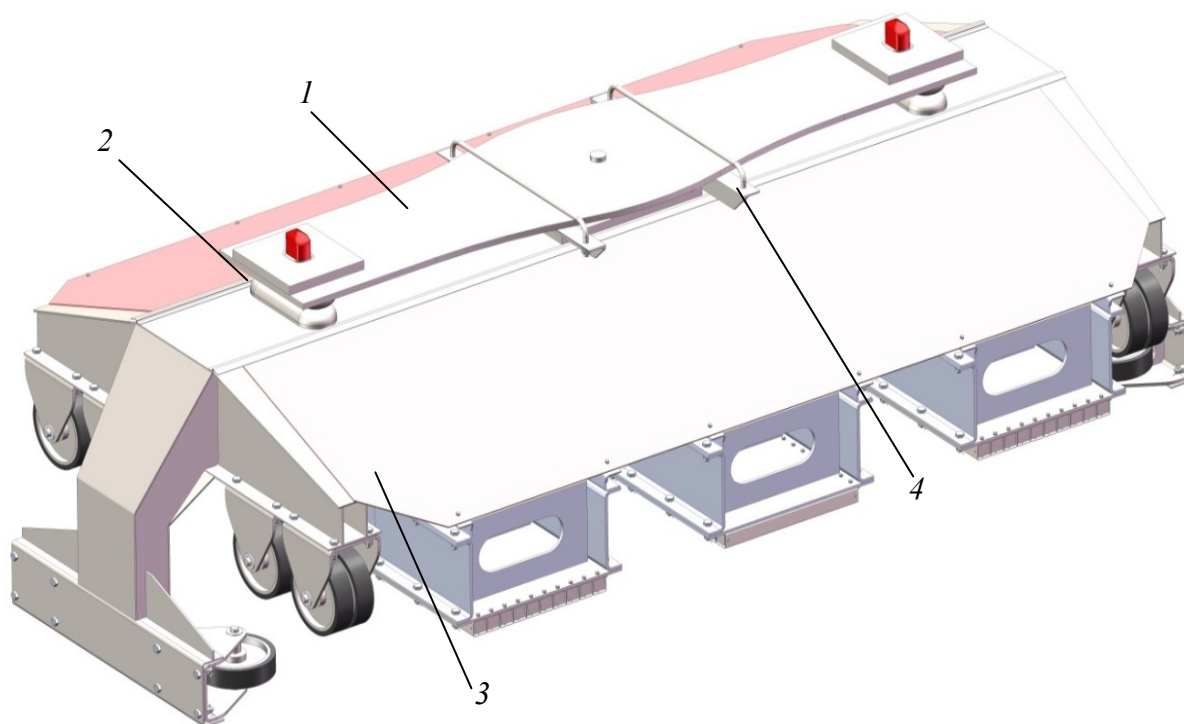


Рис. 3. Общий вид проекта магнитолевитационной тележки с поворотной площадкой:

1 – лист; 2 – фитинговый упор; 3 – скользяные; 4 – ограничитель

**Таблица 1. Основные параметры и размеры опытной магнитолевитационной тележки**

| Наименование                                                                                             | Величина |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Масса тары тележки, не более, кг                                                                         | 3000     |
| Высота тележки от опорной поверхности для маневровых колес до опорной поверхности фитинговых упоров, мм: |          |
| – тележка без поворотной опоры (рис. 2)                                                                  | 710      |
| – тележка с поворотной опорой (рис. 3)                                                                   | 840      |
| Длина тележки, мм                                                                                        | 2000     |
| Ширина тележки, не более, мм                                                                             | 3730     |

Основные элементы тележки выполнены из стали 09Г2С, элементы крепления магнитов выполнены из алюминия марки АМг5.

Тележки предназначены для перевозки контейнеров различных типов (рис. 4), при этом не требуется дополнительных устройств для соединения тележек между собой.

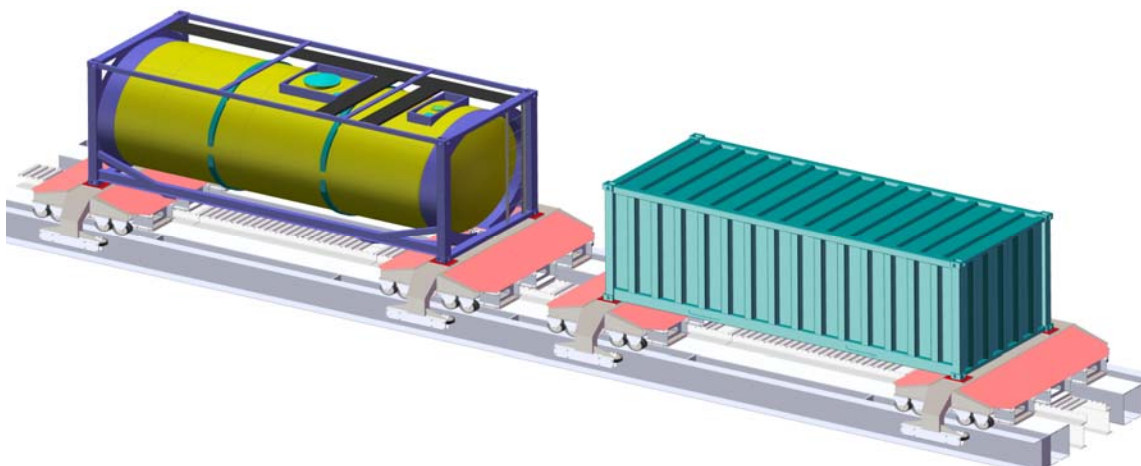


Рис. 4. Пример перевозки контейнеров на магнитолевитационных тележках

## 2. Анализ возможных нагрузок на магнитолевитационную тележку

В качестве расчетных режимов принимались:

- трогание тележки с места, когда включается линейный синхронный двигатель, тележка опирается на маневровые колеса и действуют инерционные нагрузки;
- торможение, когда тележка находится в состоянии магнитолевитационного полета, опирание на маневровые колеса отсутствует, действуют инерционные нагрузки;
- опирание тележки на магниты, когда тележка находится в состоянии магнитолевитационного полета;
- опирание тележки на маневровые колеса, при этом линейный синхронный двигатель выключен.

При расчете тележки на трогание с места и на торможение принималось следующее сочетание нагрузок:

- сила тяжести тележки;
- продольная сила инерции тележки;
- сила тяжести контейнера с грузом, действующая на фитинговые упоры;
- продольная сила инерции контейнера с грузом, действующая на фитинговые упоры;
- вертикальная динамическая добавка от действия продольной силы инерции контейнера с грузом.

Продольная сила инерции тележки определена путем умножения массы тележки на величину продольного ускорения. Величина продольного ускорения принималась равной 2 g. При расчете по МКЭ к тележке прикладывалось ускорение.

Продольная сила инерции контейнера составила  $N_u = 0,67$  МПа и прикладывалась к двум фитинговым упорам.

Вертикальная динамическая добавка от действия продольной силы инерции контейнера  $P_z$  определялась по формуле «Норм...» [7]

$$P_z = N_u \cdot \frac{h_k}{2 \cdot l_k},$$

где  $N_u$  – продольная сила инерции контейнера с грузом,  $N_u = 2 mg$ ;

$h_k$  – высота контейнера;

$l_k$  – длина контейнера.

При расчете тележки на вертикальное нагружение (при опирании на магниты или на маневровые колеса) принималось следующее сочетание нагрузок:

- сила тяжести тележки;
- сила тяжести контейнера с грузом, действующая на фитинговые упоры.

### 3. Расчет прочности магнитолевитационной тележки

Расчет производился по МКЭ с использованием расчетного пакета «Ansys Workbench», версия 12.1 [8, 9, 10]. Допускаемые напряжения принимались 0,9 от предела текучести  $[\sigma]_T$ , для стали 09Г2С  $[\sigma]_T = 345$  МПа.

Для расчета была разработана объемная конечно-элементная модель тележки. Элементы расчетной модели имитировались объемными квадратичными конечными элементами с тремя степенями свободы в каждом узле. Общий вид конечно-элементной модели тележки представлен на рис. 5.

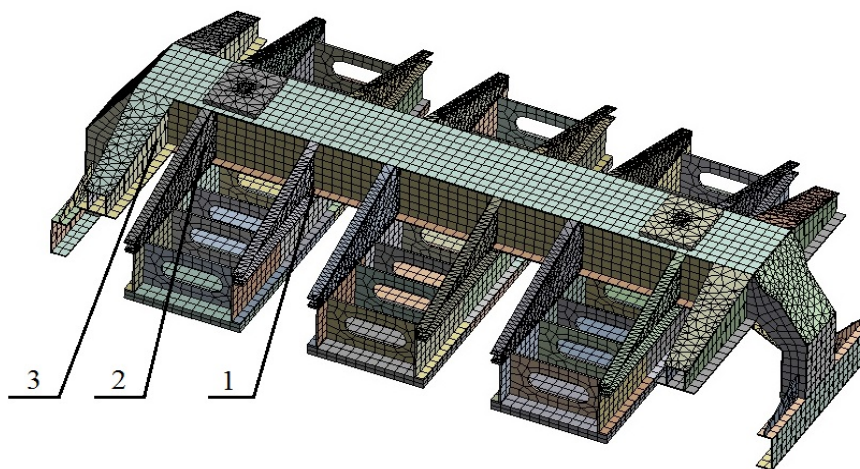


Рис. 5. Объемная конечно-элементная модель тележки с указанием точек замера эквивалентных напряжений

Расчетные режимы и максимальные эквивалентные напряжения в конструкции тележки представлены в табл. 2. Точки замера эквивалентных напряжений представлены на рис. 5.

Расчетами установлено, что конструкция тележки способна выдержать удвоенную вертикальную нагрузку от контейнера массой брутто 34 тонны и продольные силы инерции, действующие от контейнера при продольном ускорении 2 g.

**Таблица 2. Расчетные режимы и максимальные эквивалентные напряжения в конструкции тележки**

| Расчетный режим                      | Зона максимальных напряжений по рис. 5 | Значение максимальных напряжений, МПа |
|--------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Трогание тележки с места             | Точка 1                                | 246                                   |
| Торможение                           | Точка 1                                | 212                                   |
| Опираие тележки на магниты           | Точка 2                                | 39                                    |
| Опираие тележки на маневровые колеса | Точка 3                                | 81                                    |

## Заключение

1. Разработана конструкция опытного образца магнитолевитационной тележки, позволяющая устанавливать постоянные магниты при использовании технологии магнитодинамической левитации «Inductrack» или массивные сверхпроводниковые элементы при использовании технологии «МагТранСити».

2. Установлены основные режимы нагружения магнитолевитационной тележки для проведения прочностных расчетов.

3. Проведены расчеты на прочность методом конечных элементов по установленным режимам нагружения. По результатам расчетов конструкция тележки способна выдержать удвоенную вертикальную нагрузку от контейнера массой брутто 34 тонны и продольные силы инерции, действующие от контейнера при продольном ускорении 2 g.

## Библиографический список

1. Высокоскоростной железнодорожный подвижной состав : монография / В. А. Гапанович, В. Е. Андреев, Д. В. Пегов и др. ; под ред. В. А. Гапановича. – СПб. : Издательство ООО «Типография «НП-Принт», 2014. – 304 с.
2. FTA Low-Speed Urban Maglev Research Program. [http://www.fta.dot.gov/documents/FTA\\_LowSpeedMaglev\\_LessonsLearned.pdf](http://www.fta.dot.gov/documents/FTA_LowSpeedMaglev_LessonsLearned.pdf). U.S. Department of Transportation (Federal Transit Administration). Low Speed Maglev Technology Development Program – Final Report, FTA-CA-26-7025-02.1, March 2002.

3. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Зайцев, А. А. Зайцев ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
4. Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и номинальные характеристики (Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings): ISO 668:2013.
5. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material // Nuclear Instruments and Methods. – V. 169, № 1. – P. 1–10.
6. Булычев М. А. Математическое моделирование и оптимизация кузовов полувагонов с несущим полом: монография / М. А. Булычев, Д. Г. Бейн; под ред. В. П. Лозбинева. – Брянск : БГТУ, 2014. – 183 с.
7. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 320 с.
8. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 640 с. – (Сер. «Проектирование»).
9. Tadeusz Stolarski. Engineering Analysis with ANSYS Software: Tadeusz Stolarski, Y. Nakasone, S. Yoshimoto. – Elsevier, 2010. – 480 pp.
10. Kent L. Lawrence. ANSYS Workbench Tutorial Release 11: Kent L. Lawrence. – Schroff Development Corporation, 20. – 236 pp.

## References

1. Gapanovich V. A., Andreev V. E., Pegov D. V. *Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj podvizhnoj sostav* [High-speed rail rolling stock: monograph]. St. Petersburg, 2014. 304 p.
2. Department of Transportation (Federal Transit Administration). Low Speed Maglev Technology Development Program, Final Report, FTA-CA-26-7025-02.1, USA, 2002.
3. Antonov Y. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magneto-levitation transportation]. Moscow, 2014. 476 p.
4. ISO 668:2013. Series 1 freight containers: Classification, dimensions and ratings.
5. Halbach K. *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 169, no.1, pp. 1–10.
6. Bulychev M. A., Beyn D. G. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciya kuzovov poluvagonov s nesushchim polom* [Mathematical modeling and optimization of the gondola body with weight-bearing floors]. Bryansk, 2014. 183 p.
7. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznih dorog MPS kolei 1520 mm [Standards for the calculation and design of cars of the Ministry of Railways of 1520 mm]. Moscow, 1996. 320 p.

8. Basov K. A. *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. User manual]. Moscow, 2014. 640 p.

9. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software* Elsevier, 2010. 480 p.

10. Lawrence Kent L. *ANSYS Workbench, Tutorial Release 11* Schroff Development Corporation, 2010. 236 p.

**Сведения об авторах:**

БЕЙН Дмитрий Григорьевич, к. т. н., заместитель начальника отдела грузовых вагонов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: dgbain@mail.ru

ИСПОЛОВА Екатерина Алексеевна, начальник отдела расчетов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: ispolova\_ekaterina@pochta.ru

ЖИТКОВ Юрий Борисович, инженер-конструктор 2 категории отдела грузовых вагонов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: zhitkov-nvc@ya.ru

САХАРОВ Роман Александрович, инженер-конструктор отдела грузовых вагонов проектно-конструкторского бюро АО «НВЦ «Вагоны», E-mail: sakharok@mail.ru

**Information about authors:**

BEYN Dmitri Gr., Candidate of Technical Sciences, JSC «Wagons», Design Bureau, Freight cars Department, Deputy Director, E-mail: dgbain@mail.ru

ISPOLOVA Ekaterina Al., JSC «Wagons», Design Bureau, Computation Department, Director, E-mail: ispolova\_ekaterina@pochta.ru

ZHITKOV Yuri, JSC «Wagons», Design Bureau, Freight cars Department, design engineer, E-mail: zhitkov-nvc@ya.ru

SAKHAROV Roman Al., JSC «Wagons», Design Bureau, Freight cars Department, design engineer, E-mail: sakharok@mail.ru

УДК 621.338.38

**Н. Н. Пашков**

Московский государственный университет путей сообщения

## **УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Дата поступления 10.08.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В работе рассматривается задача управления траекторией движения магнитолевитационного экипажа относительно программной траектории движения вдоль путевой структуры с учетом возмущения гравитационных и магнитных полей систем левитации, боковой стабилизации и тяги. Экипаж представлен как система твердых тел, движение которых подчиняется гравитационным и электромагнитным силам. При составлении расчетных уравнений динамики экипажа в качестве инерциальных координат центров масс твердых тел выбраны пространственные перемещения, ограниченные силами левитации и боковой стабилизации относительно дискретной путевой структуры. Для приведения точек приложения внешних сил к центру инерции экипажа выполнены преобразования координат произвольной точки на экипаже в локальной системе координат в систему координат, связанную с центром инерции экипажа. Общая модель динамики экипажа составлена на основе уравнения Лагранжа-Максвелла, которое связывает действующие на массы внешние силы тяготения, управляющие электромагнитные силы, силы инерции и трения. Кинетическая энергия механической системы определена в виде квадратичной формы проекций скоростей на оси неподвижной системы координат. Изменение потенциальной энергии магнитной левитации и боковой стабилизации при деформации объекта, или при смещении и вращении центра масс экипажа в трехмерном пространстве, моделируется магнитоупругими связями экипажа с путевой структурой. Для определения управляющих сил по заданной траектории движения экипажа решена обратная задача динамики. Уравнения движения магнитолевитационного экипажа линеаризованы относительно вектора приращений координат центров масс экипажа и представлены в форме уравнений фазового пространства состояний.

**Ключевые слова:** Магнитолевитационный экипаж, программная траектория движения, профиль дискретной путевой структуры, адаптивное управление.

**Nikolai N. Pashkov**

Moscow State University of Railway Transport

EQUATION OF MOTION MAGNETIC LEVITATION ROLLING STOCK

**Abstract:** This article deals with the problem of control the trajectory of the crew magnetic levitation relative trajectory of the software regarding the track structure of the perturbation of the gravitational and magnetic fields levitation systems, lateral stabilization

and traction. The crew is presented as a system of rigid bodies, whose motion is subject to gravitational and electromagnetic forces. The spatial displacement with limited powers of levitation and lateral stabilization regarding a discrete track structure are selected by drawing up the estimated equations of the dynamics of the crew as inertial coordinates of the centers of mass of solids. The coordinates of any point on the carriage in a local coordinate system are converted in the coordinate system associated with the center of mass of the crew to bring the point of application of external force to the center of mass of the crew. A general model of the dynamics of the crew is based on the equation of Lagrange-Maxwell which binds to the active mass of the external forces of gravity that govern the electromagnetic force, the force of inertia and friction. The kinetic energy of the mechanical system is defined by the velocity projections on the axis of the fixed coordinate system as a quadratic form. The crew simulated magneto elastic coupling with the track structure changing the potential energy of magnetic levitation and lateral stabilization at the deformation of the object or the displacement and rotation of the center of mass of the crew in three-dimensional space. The inverse problem of dynamics is solved to determine the control forces for a given trajectory of the crew magnetic levitation. The equations of motion the crew on a magnetic cushion are linearized regarding increments relative coordinates of the centers of mass of the crew vector and presented in the form of equations of the phase space of states.

**Keywords:** The crew magnetic levitation, the trajectory of the program, the profile of the discrete track structure, the adaptive management.

## Введение

Одним из этапов проектирования систем управления движением магнитолевитационного транспорта является решение задачи оптимального управления исполнительными подсистемами левитации, боковой стабилизации и тяги [1, 2, 3]. В работе рассматривается задача синтеза программной траектории для централизованного управления взаимосвязанными исполнительными подсистемами магнитолевитационного экипажа (МЛЭ).

Множество траекторий движения МЛЭ определяется внешней средой и профилем путевой структуры между станцией отправления и станцией назначения. В том случае, если известны характеристики профиля дискретной путевой структуры, то комфортные программные траектории движения можно задать вдоль всего пути следования на этапе проектирования системы управления.

Однако на траекторию движения МЛЭ, наряду с действием неконтролируемых внешних факторов, ощутимо влияют кривые участки пути, уклоны и другие особенности путевой инфраструктуры, которые возбуждают собственные и вынужденные колебания экипажа в шести степенях подвижности. Среди наиболее опасных для устойчивости движения МЛЭ являются сложные формы колебаний «виляния», «галопирования» и «боковой качки» [4, 5].

В общем случае задача планирования и разделения траекторий движения по степеням подвижности МЛЭ при синтезе законов управления ис-

полнительными подсистемами может не иметь аналитических решений, или иметь множество неоднозначных решений, среди которых есть единственное оптимальное решение.

В настоящей работе рассматривается аналитическое решение задачи управления магнитолевитационным экипажем. Для синтеза законов автоматического управления исполнительными подсистемами разработан общий алгоритм вычисления траекторий движения МЛЭ в поле потенциальных сил.

## Общая модель динамики магнитолевитационного экипажа

Для составления расчетных уравнений динамики представим МЛЭ как систему твердых тел, движение которых подчиняется гравитационным и электромагнитным силам.

Выберем в качестве инерциальных координат центров масс твердых тел  $m_i$  пространственные перемещения  $q_{ix}, q_{iy}, q_{iz}$ , ограниченные силами левитации относительно дискретной путевой структуры и силами боковой стабилизации с коэффициентами жесткости  $p_{ij} (i, j = 1, \dots, n)$  и  $p_k$ . На массы действуют внешние силы тяготения, управляющие силы  $u_i$  и силы трения. Движение МЛЭ также зависит от внутренних процессов диссипации и сил инерции.

Кинетическая энергия механической системы определяется в виде квадратичной формы проекций скоростей на оси неподвижной системы координат  $x, y, z$ :

$$K(\dot{q}) = 0,5 \sum_{i=1}^n m_i (\dot{q}_{ix}^2 + \dot{q}_{iy}^2 + \dot{q}_{iz}^2) = 0,5 \dot{q}^T A \dot{q}, \quad (1)$$

где  $q = [q_{1x}, q_{1y}, q_{1z}, \dots, q_{ix}, q_{iy}, q_{iz}, \dots, q_{nz}]^T$  –  $3n$ -мерный вектор проекций перемещений  $n$  масс на инерциальные оси;

$A = \text{diag}\{m_1, m_1, m_1, \dots, m_i, m_i, m_i, \dots, m_n\} > 0$  – матрица инерции соответствующей размерности (диагональная, положительно определенная).

## Потенциальная энергия связей

При деформации объекта массы  $m_i, m_j$  смещаются в трехмерном пространстве из состояний равновесия  $A_0, B_0$  вдоль векторов  $q_i, q_j$ , занимая положения  $A, B$ , соответственно. При этом изменение потенциальной энергии магнитной левитации и боковой стабилизации, линеаризованное

по приращениям  $(x_i^0 - x_j^0)$ ,  $(x_i - x_j)$ ,  $(y_i^0 - y_j^0)$ ,  $(y_i - y_j)$ ,  $(z_i^0 - z_j^0)$ ,  $(z_i - z_j)$ , может быть определено следующим образом:

$$\Pi(\mathbf{q}) = 0,5 \sum_1^h \{\Pi_{ij}^{\text{лин}}(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j)\}_1 + 0,5 \sum_{k=1}^s \Pi_k^{\text{лин}}(\mathbf{q}_k) = 0,5 \mathbf{q}^T \mathbf{C} \mathbf{q}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_{ij}\}$ ,  $\mathbf{C}_{ij} = \mathbf{C}_{ji} = -\mathbf{P}_{ij}$ ,  $\mathbf{C}_{ii} = \mathbf{P}_i + \sum_{j=1, i \neq j}^n \mathbf{P}_{ij}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ ;

$\mathbf{C} \geq 0$  –  $(3n \times 3n)$ -мерная матрица коэффициентов электромагнитной упругости;

$h$  – число катушек дискретной путевой структуры подвеса;  $s$  – число катушек боковых стабилизаторов;

$\Pi_{ij}^{\text{лин}}(\mathbf{q}_i, \mathbf{q}_j) = 0,5(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)^T \mathbf{P}_{ij}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)$  – потенциальная энергия  $ij$ -го магнитного подвеса;

$\Pi_k^{\text{лин}}(\mathbf{q}_k) = 0,5 \mathbf{q}_k^T \mathbf{P}_k \mathbf{q}_k$  – потенциальная энергия  $k$ -го магнитного стабилизатора;

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} p_{ij}^{xx} & p_{ij}^{xy} & p_{ij}^{xz} \\ p_{ij}^{xy} & p_{ij}^{yy} & p_{ij}^{yz} \\ p_{ij}^{xz} & p_{ij}^{yz} & p_{ij}^{zz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P}_k = \begin{bmatrix} p_k^{xx} & p_k^{xy} & p_k^{xz} \\ p_k^{xy} & p_k^{yy} & p_k^{yz} \\ p_k^{xz} & p_k^{yz} & p_k^{zz} \end{bmatrix},$$

–  $(3n \times 3n)$ -мерные симметричные матрицы приведенных параметров  $ij$ -х магнитных подвесов и  $k$ -х боковых стабилизаторов.

### Силы сопротивления движению

Диссипативная функция внешних сил с коэффициентами  $d_{ix}, d_{iy}, d_{iz} \geq 0$  при проекциях скоростей  $\dot{q}_{ix}, \dot{q}_{iy}, \dot{q}_{iz}$  масс  $m_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), равна:

$$\mathbf{R}_d(\dot{\mathbf{q}}) = 0,5 \sum (d_{ix} \dot{q}_{ix}^2 + d_{iy} \dot{q}_{iy}^2 + d_{iz} \dot{q}_{iz}^2) = 0,5 \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{R}_d \dot{\mathbf{q}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{R}_d = \text{diag}\{d_{1x}, d_{1y}, d_{1z}, \dots, d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}, \dots, d_{nx}\}$ ,  $\mathbf{R}_d \geq 0$  – диагональная матрица коэффициентов внешних сил сопротивления движению, а  $d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}$  не обязательно различные.

Диссипативная функция внутренних сил в пространственных связях с коэффициентами  $b_{ij} \geq 0$  при скоростях деформаций левитационных зазоров  $(\dot{q}_i - \dot{q}_j)$  и с коэффициентами  $b_k \geq 0$  при скоростях деформаций зазоров стабилизаторов  $(\dot{q}_k - \dot{q}_0)$  представляется в виде суммы:

$$\mathbf{R}_b(\dot{q}) = 0,5 \sum_{l=1}^h \{(\dot{q}_i - \dot{q}_j)^T \mathbf{R}_{ij} (\dot{q}_i - \dot{q}_j)\}_l + 0,5 \sum_{k=1}^s \dot{q}_k^T \mathbf{R}_k \dot{q}_k = 0,5 \dot{q}^T \mathbf{R}_b \dot{q}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{R}_b \geq 0$ ,  $\mathbf{R}_{ij}$ ,  $\mathbf{R}_k$  –  $(3n \times 3n)$ -мерные матрицы приведенных коэффициентов диссипации  $ij$ -й пространственной связи и  $k$ -го стабилизатора. Структура матриц диссипации аналогична расчетным структурам матриц  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{P}_{ij}$ ,  $\mathbf{P}_k$ .

Вектор обобщенных сил  $\mathbf{U}$  составляется из проекций на инерциальные оси приложенных к массам  $m_i$  внешних сил  $\mathbf{u}_i (i = 1, \dots, n)$ , включая управления:

$$\mathbf{U} = [u_{1x}, u_{1y}, u_{1z}, \dots, u_{ix}, u_{iy}, u_{iz}, \dots, u_{nz}]^T. \quad (5)$$

### Линейная модель динамики МЛЭ

Уравнение Лагранжа-Максвелла для механического объекта с кинетической и потенциальной энергиями (1), (2), диссипативными функциями (3), (4) и обобщенными силами (5) имеет векторно-матричный вид [6]:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial 0,5(\dot{q}^T \mathbf{A} \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] = \mathbf{U} - \frac{\partial 0,5(q^T \mathbf{C} q)}{\partial q} - \frac{\partial 0,5[\dot{q}^T (\mathbf{R}_d + \mathbf{R}_b) \dot{q}]}{\partial \dot{q}}. \quad (6)$$

Это уравнение движения МЛЭ относительно переменных задачи, приводится к  $3n$ -мерной системе линейных дифференциальных уравнений второго порядка с интервально неопределенными элементами матриц  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{C}$ :

$$\mathbf{A} \ddot{q} + \mathbf{R} \dot{q} + \mathbf{C} q = \mathbf{U}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{C}$  –  $(3n \times 3n)$ -мерные симметричные матрицы;

$\mathbf{A} > 0$  – матрица масс;

$\mathbf{R} = \mathbf{R}_d + \mathbf{R}_b \geq 0$  – матрица параметров диссипации;

$\mathbf{C} \geq 0$  – матрица коэффициентов магнитоупругости.

## Выбор локальных систем координат

Для приведения точек приложения внешних сил к центру инерции МЛЭ, необходимы преобразования координат произвольной точки на МЛЭ в локальной системе координат в систему координат, связанную с центром инерции МЛЭ. Закрепим в центрах масс  $m_i$  МЛЭ правые декартовые системы координат  $O_i x_i y_i z_i$  следующим образом: начало координат  $O_i$  совместим с центром инерции массы  $m_i$ , оси  $z_i$  направим параллельно оси  $z_0$  инерциальной системы координат. Оси  $x_i$  направим перпендикулярно к осям  $z_{i-1}$  и  $z_i$  (вдоль продольной оси симметрии массы МЛЭ) с положительным направлением от массы  $i-1$  к массе  $i$ , ось  $y_i$  дополняет систему координат  $O_i x_i y_i z_i$  до правой декартовой системы координат.

При помощи такого ортогонального преобразования движение твердого тела  $m_i$  разделяется на поступательное и вращательное. Перемещение  $i$ -й системы относительно  $i-1$ -й характеризует движение  $i$ -й массы относительно  $i-1$ -й. Это движение массы  $m_i$  состоит из поступательного перемещения  $s_{xi}, s_{yi}, s_{zi}$  вдоль осей  $x_i y_i z_i$  и вращательного относительно центра массы  $m_i$ . Матрицы вращения вокруг осей декартовой системы координат на углы  $a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}$  в трехмерном пространстве известны [7]:

$$\begin{aligned}\tau_{xi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_{xi} & -\sin a_{xi} \\ 0 & \sin a_{xi} & \cos a_{xi} \end{bmatrix}, \\ \tau_{yi} &= \begin{bmatrix} \cos a_{yi} & 0 & \sin a_{yi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a_{yi} & 0 & \cos a_{yi} \end{bmatrix}, \\ \tau_{zi} &= \begin{bmatrix} \cos a_{zi} & -\sin a_{zi} & 0 \\ \sin a_{zi} & \cos a_{zi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Итоговая матрица поворотов осей  $i$ -й системы координат относительно  $i-1$ -й определится произведением матриц вращения:

$$\tau_i = \tau_{xi} \tau_{yi} \tau_{zi}.$$

Таким образом, связь между локальными координатами  $x_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$  некоторой точки в  $i$ -й и  $i-1$  системах координат определяется преобразованием:

$$x_{i-1} = \tau_{i-1,i} x_i + s_{i-1,i},$$

где  $x_i$  – координаты точки в  $i$ -й системе координат;  
 $x_{i-1}$  – координаты точки в  $i-1$ -й системе координат;  
 $\tau_{i-1,i}$  – матрицы поворотов осей  $i-1$ -й системы координат относительно  $i$ -й;  
 $s_{i-1,i}$  – вектор переноса.

Координаты точек приложения внешних сил в основной системе координат  $O, x_0, y_0, z_0$  определяются по формулам:

$$x_0 = \tau_{0,i} x_i + \sum_{j=1}^i s_{j-1,j},$$

$$\tau_{0,i} = \prod_{j=1}^i \tau_{j-1,j}, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где  $\tau_{0,i}$  – матрица поворотов  $i$ -й системы координат относительно основной;  
 $\sum_{j=1}^i s_{j-1,j}$  – вектор переноса начала координат  $i$ -й системы относительно основной.

Однородные координаты точки  $x_i$  в инерциальной системе координат  $O, x_0, y_0, z_0$ , связанной с основанием МЛЭ, определяются по формуле:

$$x_i = T_{0i} \cdot q_i,$$

где  $T_{0i}$  – матрица перехода от  $i$ -й системы координат к  $O, x_0, y_0, z_0$ ;  
 $T_{i-1,i} = T_{i,i-1}^{-1}$  – матрицы обратного перехода из  $i$  в  $i-1$  систему координат.

В однородных координатах матрицы переходов имеют блочную структуру:

$$T_{i,i-1} = \begin{bmatrix} \tau_{i,i-1} & s_{i,i-1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}.$$

## Оптимальная траектория движения МЛЭ

Для комфортного движения МЛЭ, имеющего шесть степеней подвижности, необходимо задать желаемую пространственную траекторию движения с учетом особенностей дискретной путевой структуры. В качестве обобщенных координат выберем фазовые координаты  $\mathbf{x}$  пространства состояний МЛЭ. Для определения управляющих сил, исходя из желаемой траектории движения МЛЭ с помощью матриц ортогонального преобразования  $\mathbf{T}_{0i}$ , необходимо решить обратную задачу динамики.

Решение обратной задачи состоит в решении системы трансцендентных уравнений, относительно вектора фазовых координат  $\mathbf{x}$ , по заданным инерциальным координатам пространственных перемещений  $\mathbf{q}$  центра масс МЛЭ с помощью системы трансцендентных уравнений:

$$\mathbf{q} = \mathbf{F}(\theta), \quad (8)$$

где  $\mathbf{F}(\theta)$  – вектор функций нелинейных связей физических переменных  $\theta$  с пространственными перемещениями  $\mathbf{q}$ .

Общего метода аналитического решения систем трансцендентных уравнений нет. В этой связи множество решений обратной задачи динамики найдем из линеаризованной системы уравнений относительно приращений вектора пространственных перемещений  $\mathbf{q}$  и физических переменных  $\theta$ :

$$\mathbf{q} = \mathbf{J}(\theta) \cdot \theta, \quad (9)$$

где  $\mathbf{J}(\theta) = \frac{\partial \mathbf{F}(\theta)}{\partial \theta^T}$  – матрица Якоби. Эта система уравнений всегда разрешима в силу избыточности уравнений (9) и независимости обобщенных координат  $\theta$ .

Из уравнений (9) по заданной в инерционных координатах траектории движения МЛЭ  $\mathbf{q}(t)$ :

$$\mathbf{J}^{-1}(\theta) \cdot \mathbf{q}(t) = \theta(t), \quad t \in \Delta_t = [t_0, t_i], \quad (10)$$

можно определить законы управления физическими переменными.

### Уравнение движения МЛЭ в пространстве состояний

Важным свойством уравнения (7) является положительная определенность матрицы  $\mathbf{A}$ . Это свойство гарантирует существование единственной обратной матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$ , с помощью которой уравнение (7) можно разрешить относительно старшей производной и записать его в виде:

$$\ddot{q} = A^{-1} [U - (R\dot{q} + Cq)]. \quad (11)$$

Уравнения модели динамики МЛЭ (11) в обобщенных координатах  $\theta$  с учетом (9) преобразуются к системе дифференциальных уравнений:

$$\frac{d^2}{dt^2} [J(\theta) \cdot \theta] = A^{-1} \left[ U - \left( R \frac{d}{dt} [J(\theta) \cdot \theta] + C J(\theta) \cdot \theta \right) \right]. \quad (12)$$

Введем обозначения для переменных состояния  $x_1 = \theta$ ,  $x_2 = \dot{\theta}$  и, полагая значения элементов матрицы  $J(\theta)$  в точке линеаризации постоянными, преобразуем уравнения (12) к нормальной форме Коши:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ J^{-1}(\theta) A^{-1} C J(\theta) & J^{-1}(\theta) A^{-1} R J(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ J^{-1}(\theta) A^{-1} \end{bmatrix} \cdot U. \quad (13)$$

где  $B$  – оператор динамической модели тягового линейного электропривода [8].

## Заключение

Из структуры уравнений (13) следует, что систему управления переменными состояниями МЛЭ  $x_2 = \dot{\theta}$  целесообразно строить адаптивными методами [9]. Цель автоматического адаптивного управления в этом случае достигается непрерывной настройкой параметров матрицы управления  $J^{-1}(\theta) A^{-1}$  модели (13) вдоль траектории  $\theta(t)$ , или подавлением возмущений траектории движения МЛЭ относительно программной траектории оптимальными управляющими силами.

## Библиографический список

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев; под ред. В. А. Гапановича. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
2. Braunbek W. Frieschwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld // Physikalische Zeitschrift. 1939. Bd. 112. – S. 753.
3. Sotelo, G. G. MagLev Cobra: Test Facilities and Operational Experiments / G. G. Sotelo, D. H. N. Dias, R. A. H. de Oliveira, A. C. Ferreira, R. De Andrade Jr, R. M. Stephan // Journal of Physics Conference Series 05/2014; 507(3).

4. Вериго М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М. : Транспорт, 1986. – 559 с.
5. Dias D. H. N. Dynamical Tests in a Linear Superconducting Magnetic Bearing / D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, F. Sass, E. S. Motta, R. de Andrade Jr, R. M. Stephan // *Physics Procedia* 12/2012 36:1049-1054.
6. Борцов Ю. А. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением / Ю. А. Борцов, Н. Д. Поляхов, В. В. Путов. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.
7. Пашков Н. Н. Аналитический синтез оптимальных траекторий программного движения многозвенных манипуляторов / Мехатроника. Автоматизация. Управление. – М. : 2008, № 9, Робототехнические комплексы. – С. 10–15.
8. Пашков Н. Н. Система адаптивного управления тяговым асинхронным электроприводом / Труды Международной научно-техн. конф. «Подвижной состав XXI века». – Хабаровск: ДВГУПС, 2008. – С. 52–56.
9. Пашков Н. Н. Ассоциативный принцип адаптации управления магнитолевитационным транспортом / Труды 2-й Международной научной конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» МТСТ'14 // Под ред. Ю. Ф. Антонова. – Киров : МЦНИП, 2014. – С. 287–295.

## References

1. Antonov Y. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magneto-levitation transportation]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Braunbek W. *Phisikalische Zeitschrift – Physical magazine*, 1939, vol. 112, p. 753.
3. Sotelo G. G., Dias D. H. N., de Oliveira R. A. H., Ferreira A. C., de Andrade R. Jr., Stephan R. M. *Journal of Ph. Conf. Series* 05/2014, Rio de Janeiro, vol. 507, no. 3.
4. Verigo M. F., Cogan A. J. *Vzaimodejstvie puti i podvizhnogo sostava* [Interaction track and railway rolling stock]. Moscow, 1986. 559 p.
5. Dias D. H. N., Sotelo G. G., Sass F., Motta E. S., De Andrade R. Jr., Stephan R. M. *Physics Procedia* 12/2012, no. 36, pp. 1049–1054.
6. Bortsov Yu. F., Polyakhov N. D., Putov V. V. *EHlektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nyim upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal control]. Leningrad, 1984. 216 p.
7. Pashkov N. N. *Mekhatronika. Avtomatizaciya. Upravlenie – Mechatronics. Automation. Control*, Moscow, 2008, no. 9, pp. 10–15.
8. Pashkov N. N. Sistema adaptivnogo upravleniya tyagovym asinhronnym ehlektroprivodom [Adaptive Control traction asynchronous electric drive] *Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*

"*Podvizhnoj sostav XXI veka*" (Proc. of the Int. Sc. and Techn.Conf. "The rolling stock of the XXI century"). Khabarovsk, 2008, pp. 52–56.

9. Pashkov N. N. Associativnyj princip adaptacii upravleniya magnitolevitacionnym transportom [Associative principle of magnetic levitation adaptation of transport]. *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii" MTST'14* (Proc. of the 2nd Int. Sc. Conf. "Magnetic levitation

**Сведения об авторе:**

ПАШКОВ Николай Николаевич, д. т. н., профессор кафедры «Логистические транспортные системы и технологии», Институт управления и информационных технологий (ИУИТ) Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), E-mail: pashkovnn@gmail.com

**Information about author:**

Nikolai N. PASHKOV, Ph. D., professor of «Logistic transport systems and technologies», Institute of Management and Information Technology (IUIT) Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), E-mail: pashkovnn@gmail.com

УДК 537.624.9, 537.634

**М. П. Волков, А. А. Проскурин**

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

## **ЛЕВИТАЦИОННЫЙ ЗАЗОР ПРИ ПОДВЕСЕ ВТСП ПОД ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ**

Дата поступления 26.08.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** Проведено экспериментальное исследование левитации ВТСП диска над постоянным магнитом NdFeB и подвеса ВТСП диска под магнитом и показано, что при подвесе под магнитом наблюдается существенно большее расстояние (просвет) между магнитом и диском. Рассмотрение процесса намагничивания ВТСП диска при левитации и при подвесе на основе модели критического состояния позволило объяснить наблюдающееся различие в просвете для этих двух вариантов бесконтактного вешивания ВТСП диска.

**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, постоянный магнит, магнитная левитация, магнитный подвес, левитационный зазор, намагниченность, модель критического состояния.

**M. P. Volkov, A. A. Proscurin**

A. F. Ioffe Physical-Technical Institute

## **LEVITATION GAP IN SUSPENSION OF HTSC UNDER THE PERMANENT MAGNET**

**Abstract:** an experimental study of HTSC disc levitation above the permanent NdFeB magnet and suspension of HTSC disc under the HTS magnet. It was shown that when the suspension under the magnet is observed at significantly greater distance (clearance) between the magnet and the disc. Consideration of the magnetization of the HTSC disc in the levitation and suspension on the basis of the critical state model enabled us to explain the observed differences in the clearance for these two variants of contactless suspension.

**Keywords:** high-temperature superconductor, permanent magnet, magnetic levitation, magnetic suspension, levitation gap, magnetization, critical-state model.

## **Введение**

Для создания надежных транспортных систем на основе магнитной левитации (Маглев) с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) необходимо решить ряд технических задач. Одна из та-

ких задач – увеличение величины просвета между полотном дороги и экипажем. При малом расстоянии равновесной левитации экипажа над полотном возрастают требования к гладкости полотна и к отсутствию на полотне небольших посторонних предметов. Возможное решение задачи увеличения просвета в системах Маглев состоит в замене левитации экипажа над полотном к подвеске экипажа под транспортным полотном. При подвеске экипажа под полотном исчезает опасность столкновения экипажа со случайными предметами, упавшими на полотно (в частности, со снежными наносами или льдом на путях), а также появляется возможность существенного увеличения просвета между полотном дороги и экипажем.

В связи с технической важностью вопросам левитации сверхпроводников посвящено большое количество работ, однако рассмотрению устойчивого подвеса сверхпроводников под магнитом уделено меньшее внимание. Эксперименты по подвесу сверхпроводников под магнитом стали проводиться вскоре после открытия ВТСП материалов [1]. В это же время появились и работы по теории этого эффекта [2]. Наиболее подробно левитация и подвес сверхпроводников были рассмотрены в работах Е. Н. Brandt [3, 4].

В настоящей работе с использованием модельной системы – ВТСП диск («экипаж») и постоянный магнит NdFeB («путепровод») проведено экспериментальное исследование левитации диска над магнитом и подвеса диска под магнитом и показано, что при подвесе под магнитом наблюдается существенно большее расстояние (просвет) между магнитом и диском. Рассмотрение процесса намагничивания ВТСП диска при левитации и при подвесе на основе модели критического состояния позволило объяснить наблюдающееся различие в просвете для этих двух вариантов бесконтактного вывешивания ВТСП диска.

## Эксперимент и обсуждение

В работе использовались постоянные магниты NdFeB в виде массивных дисков диаметром до 10 см и толщиной до 1,5 см и диски из ВТСП материала  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  диаметром до 4 см и толщиной до 5 мм. Объёмные монокристаллические ВТСП диски были изготовлены методом частичного плавления в МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва), имели критические температуры порядка 89 К, высокие плотности критического тока при температуре жидкого азота (до  $5 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ ) и большие «замороженные» поля (до 1 Т) [5]. Эти ВТСП диски успешно используются в магнитных опорах роторных систем [6]. ВТСП диск плотно вставлялся в легкий небольшой контейнер из пенопласта, контейнер заливался жидким азотом до полного охлаждения ВТСП диска. В данной работе использовалась и будет обсуждаться только процедура «охлаждения без поля» (ZFC – zero field cooling). После перехода в сверхпроводящее состояние диск медленно подводился к постоянному магниту и вывешивался

либо над магнитом («левитация») или под магнитом («подвес»), при этом диск удерживал и контейнер с жидким азотом. Зазор между левитирующим или подвешенным магнитом зависел от размеров использованных дисков (ВТСП и постоянного магнита), но во всех случаях зазор при подвесе был значительно больше, чем при левитации ВТСП диска. Так, при использовании большого постоянного магнита ( $d = 10$  см) и ВТСП диска с  $d = 4$  см зазор при подвесе был примерно втрое больше, чем при левитации.

Сила, действующая на образец в магнитном поле, пропорциональна произведению магнитного момента образца и градиента магнитного поля при условии, что магнитное поле слабо меняется на размерах образца. Хотя в нашем случае это условие не выполняется и поле постоянного магнита существенно меняется на размерах ВТСП диска при малых расстояниях между магнитом и сверхпроводником, тем не менее для качественной оценки сил мы будем пользоваться этим соотношением. При удалении от постоянного магнита вдоль оси симметрии как магнитное поле, так и градиент магнитного поля уменьшаются, поэтому наблюдавшееся различие в зазорах должно объясняться различием магнитного состояния ВТСП диска при левитации и при подвесе.

Рассмотрим процесс намагничивания жесткого сверхпроводника в рамках модели критического состояния. Применимость модели критического состояния к нашим образцам ВТСП качественно была проверена при измерении распределения поля по диаметру диска датчиками Холла при температуре жидкого азота. Эти измерения показали, что градиент магнитного поля по диаметру диска при увеличении и при уменьшении магнитного поля соответствует представлениям модели критического состояния об образовании градиентов плотности магнитного потока в жестких сверхпроводниках 2 рода. С помощью вибрационного магнитометра, входящего в автоматизированную измерительную систему PPMS [7], была измерена зависимость магнитного момента сверхпроводящего образца от магнитного поля при  $T = 77$  К, представленная на рис. 1 (направление изменения поля указано стрелками).

Эта зависимость  $M(H)$  представляет собой типичную для жесткого сверхпроводника 2 рода гистерезисную кривую [8]. Начальному (практически линейному) участку 1-2 кривой намагничивания соответствует мейснеровское состояние образца, при дальнейшем увеличении (по модулю) магнитного поля (участок 2-3) магнитный момент начинает уменьшаться, что соответствует проникновению магнитного потока в объем сверхпроводника. При уменьшении внешнего магнитного поля по абсолютной величине (участок 3-4) магнитный момент сначала изменяется только за счет экранирующих токов, текущих вблизи поверхности образца, и график практически линейен с примерно таким же угловым коэффициентом, что и на начальном участке 1-2, затем (участок 4-5) намагниченность возрастает.

Полезно отметить, что наибольшее значение намагниченности  $M$  достигается в малом поле (а не в большом поле, как это наблюдается для ферромагнитных материалов).

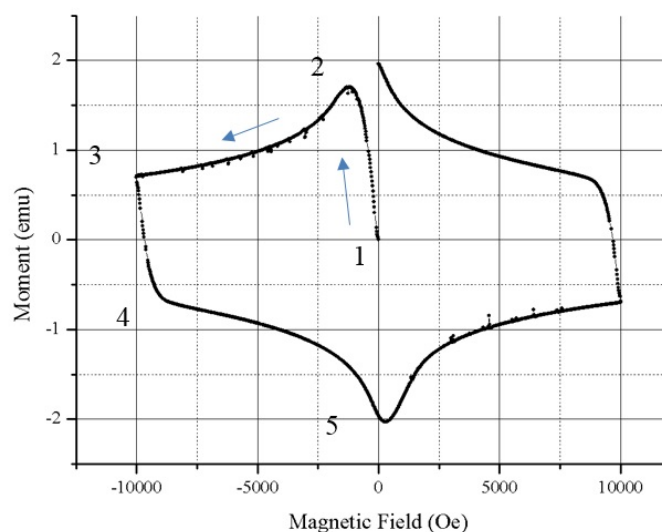


Рис. 1. Зависимость магнитного момента сверхпроводящего образца  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  от магнитного поля, измеренная вибрационным магнитометром при  $T = 77 \text{ K}$

На рис. 2 схематически изображена часть кривой намагниченности ВТСП диска. При первоначальном увеличении магнитного поля линейный участок соответствует полному выталкиванию магнитного потока, которое при дальнейшем увеличении магнитного поля сменяется смешанным состоянием с ненулевым градиентом плотности магнитного потока по диаметру ВТСП диска.

С использованием рис. 2 рассмотрим, как меняется силовое взаимодействие ВТСП диска, охлажденного до  $T = 77 \text{ K}$ , при постепенном приближении к постоянному магниту сверху. При приближении к магниту магнитное поле и градиент магнитного поля возрастают, увеличивается (по модулю) отрицательный магнитный момент ВТСП диска и возрастает сила отталкивания между ВТСП диском и магнитом. Допустим, что, преодолевая силу отталкивания, мы довели ВТСП диск до такого расстояния от постоянного магнита, на котором поле равно  $H_A$  (точка А), и отпустили ВТСП диск. Диск поднимется немного вверх и устойчиво зависнет на некотором расстоянии от магнита, где поле равно  $H_L$  (точка L – *levitation*), а произведение магнитного момента образца на градиент магнитного поля равно весу ВТСП диска. При этом намагниченность образца изменится вдоль частной петли гистерезиса, начальный наклон которой примерно равен наклону прямой мейснеровского состояния, так как при уменьшении поля от точки А изменения намагниченности будут вызываться изменением плотности экранирующих токов около поверхности диска. Точка L является точкой устойчи-

вого равновесия диска, так как при смещении диска вверх намагниченность диска уменьшается (по абсолютной величине), сила отталкивания уменьшается и диск опускается обратно. При случайном же приближении диска к магниту поле возрастает, увеличивается намагниченность, возрастает сила отталкивания и диск поднимется обратно в точку равновесия.

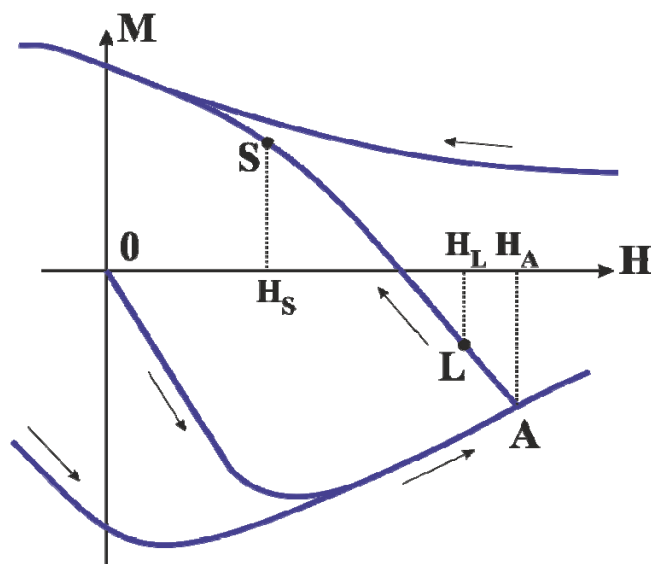


Рис. 2. Фрагмент кривой намагниченности ВТСП диска

Теперь рассмотрим, как меняется силовое взаимодействие ВТСП диска при постепенном приближении к постоянному магниту снизу. Как и в первом случае, при приближении к магниту магнитное поле и градиент магнитного поля возрастают, увеличивается (по модулю) отрицательный магнитный момент ВТСП диска и возрастает сила отталкивания между ВТСП диском и магнитом. Доведем опять ВТСП диск до такого расстояния от постоянного магнита, на котором поле равно  $H_A$  (точка А), и отпустим ВТСП диск. Диск начнет опускаться вниз, его намагниченность будет уменьшаться (по абсолютной величине) и на некотором расстоянии от магнита поменяет знак. Начиная с этого момента отталкивание диска сменится на притяжение к магниту и в некоторой точке  $S$  (*suspension*) сила притяжения будет равна весу образца. Точка  $S$  также является точкой устойчивого равновесия, так как при смещении диска вниз (в область меньших полей  $H < H_S$ ) магнитный момент диска увеличивается и увеличившаяся сила притяжения возвращает диск обратно. Аналогично при приближении диска к магниту намагниченность уменьшается, и сила притяжения уменьшается.

Из рассмотренной картины изменения намагниченности ВТСП диска видно, что при одинаковых стартовых условиях (точка А) поле устойчивого подвеса диска  $H_S$  много меньше поля устойчивой левитации  $H_L$ , то есть подвес реализуется на существенно больших расстояниях от магнита, чем

левитация. Для количественной оценки полей  $H_S$  и  $H_L$  необходимо знать точно необратимую намагниченность ВТСП диска (включая вид частных петель гистерезиса), определить магнитное поле постоянного магнита в интересующей нас области, а для вычисления силы взаимодействия между магнитом и ВТСП диском надо учитывать конечные размеры диска [9, 10].

## Заключение

Проведено экспериментальное исследование левитации ВТСП диска над постоянным магнитом и подвеса ВТСП диска под магнитом. Измеренное распределение плотности магнитного потока по диаметру ВТСП диска согласуется с моделью критического состояния жестких сверхпроводников. Анализ процесса намагничивания ВТСП диска при левитации и при подвесе на основе модели критического состояния позволил качественно объяснить наблюдающийся экспериментально существенно больший зазор между ВТСП диском и магнитом при устойчивом подвесе диска под магнитом, чем при левитации над магнитом. Большая величина зазора при подвесе ВТСП элементов под магнитом должна учитываться при проектировании систем бесконтактного подвешивания типа Маглев.

## Библиографический список

1. C. Y. Huang, Y. Shapira, E. J. McNiff, Jr., P. N. Peters, et al. «Magnetic hysteresis of high-temperature  $YBa_2Cu_3O_x$ -AgO superconductors: explanation of magnetic suspension», Mod. Phys. Letters B2, 869, (1988).
2. A. Sezginer «Explanation of the superconducting suspension effect», Phys. Rev. B 39, N 13, p. 9598–9600, (1989).
3. E. H. Brandt «Levitation in physics», Science 243, 349–355, (1989).
4. E. H. Brandt «Rigid levitation and suspension of high-temperature superconductors by magnets», Am. J. Phys. 55 (1). – P. 43–49, (1990).
5. Полущенко О. Л. «Получение объемных монокристаллов YBCO ВТСП и разработка устройств на их основе», 1-я Национальная конференция по прикладной сверхпроводимости, НКПС-2011, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.
6. Полущенко О. Л. «Роторная система с магнитными опорами на основе объемных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП)» / О. Л. Полущенко, Н. А. Нижельский, М. А. Сысоев. – Известия ВУЗов, Машиностроение. – № 3 (612). – 2011.
7. Physical Property Measurement System (PPMS), Quantum Design, <http://www.qdusa.com/products/ppms.html>.
8. Rudolph P. Huebener «Magnetic Flux Structures in Superconductors», Springer Science & Business Media, 2013.

9. O. Ozogul «Calculation of Levitation Force Using a Critical State Model», Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 25. – P. 221–225, (2012).

10. Kamel Boughrara, Rachid Ibtouen, «MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION AND LEVITATION FORCE CALCULATION IN HTSC-PMG MAGLEV VEHICLES», Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 55, 63–86, 2013.

## References

1. Huang C. Y., Shapira Y., McNiff E. J. Jr., Peters P. N. Mod. Phys., 1988, letters B2, 869 p.

2. Sezginer A. Phys. Rev., B 39, 1989, no.13, pp. 9598-9600.

3. Brandt E. H. Levitation in physics, 1989, pp. 349–355.

4. Brandt E. H. Am. J. Phys., 1990, no. 55 (1), pp. 43–49.

5. Poluchshenko O. L. Poluchenie ob'emnyh monodomennyh YBCO VTSP i razrabotka ustrojstv na ih osnove [Bulk single-domain HTSC YBCO preparation and their use for the device creation] Trudy 1-j Nacional'noj konferencii po prikladnoj sverhprovodimosti, NKPS-2011 (Proc. of the 1st National Conf. on Applied Superconductivity, NKPS 2011). Moscow, 2011.

6. Poluchshenko O. L., Nizhelskii N. A., Sysoev M. A. Izvestiya VUZov, Mashinostroenie – Izvestiya VUSov, Machine building, 2011, no. 3 (612).

7. Physical Property Measurement System (PPMS), Quantum Design, URL: <http://www.qdusa.com/products/ppms.html> (27/04/2015).

8. Huebener Rudolph P. Magnetic Flux Structures in Superconductors. Berlin, 2013.

9. Ozogul O. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2012, no. 25, pp. 221–225.

10. Boughrara K., Ibtouen R. Progress in Electromagnetics Research B, 2013, vol. 55, pp. 63–86.

### Сведения об авторах:

ВОЛКОВ Михаил Павлович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, E-mail: [m.volkov@mail.ioffe.ru](mailto:m.volkov@mail.ioffe.ru)

ПРОСКУРИН Алексей Алексеевич, студент, Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого, E-mail: [aprosc@gmail.com](mailto:aprosc@gmail.com)

### Information about authors:

Mikhail P. VOLKOV, PhD, head of the laboratory, A. F. Ioffe Physical-Technical Institute (Saint-Petersburg, Russia), E-mail: [m.volkov@mail.ioffe.ru](mailto:m.volkov@mail.ioffe.ru)

Alexei A. PROSCURIN, student, Saint-Petersburg's Peter the Great Politekhical University, E-mail: [aprosc@gmail.com](mailto:aprosc@gmail.com)

УДК 621.313

**А. С. Адалёв<sup>1,2</sup>, В. Г. Кучинский<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ОАО «НПО «Русский Электропривод»»

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## **ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ГРУЗОВОЙ МАГНЕТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Дата поступления 24.08.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В работе представлена конструкция тягового электропривода на базе линейного синхронного двигателя (ЛСД) с возбуждением от постоянных магнитов. Электропривод служит для линейного перемещения грузовой транспортной платформы (ГТП), подвешенной с помощью магнитного поля. Модульная конструкция статора двигателя, а также секционирование электропитания его обмоток позволяют использовать его для создания полномасштабного макета с произвольной величиной хода ГТП.

**Ключевые слова:** Линейный синхронный двигатель; высококоэрцитивные постоянные магниты; тяговый электропривод.

**A. S. Adalev<sup>1,2</sup>, V. G. Kuchinskiy<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> OJSC «Research and Production Association “Russian Electric Drive”»

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

## **LINEAR ELECTRIC MOTOR WITH PM EXCITATION FOR A FREIGHT MAGNETOLEVITATION PLATFORM**

**Abstract:** The paper presents the design of a traction electric drive based on a linear synchronous motor with permanent magnets (PM) excitation. The electric drive is a part of the demonstration mock-up and is intended for the linear movement of a freight platform that is suspended in the air by means of the magnetic field. The drive performs a smooth movement of the platform with a required speed, platform stop, and changing of the direction of the movement. The motor inductor with permanent magnets is fixed on the platform whereas the motor stator is placed on the ground being supplied with power through a semiconductor converter. The stator consists of the independent modules that are sequentially connected to the converter as the inductor moves. Commutation of the modules and commutation the windings inside the active module is performed by the signals from some optical sensors attached to the inductor. Modular design of the motor stator and sectional feeding of its windings from the same converter allow to create a levitation mock-up with an arbitrary length of the motion path. At that all the technical solutions adopted in the drive design are directed to reducing of the drive production cost.

**Keywords:** Linear synchronous motor, high-coercivity permanent magnets, traction electric drive.

## Введение

Развитие промышленности и рост городского населения в большинстве стран мира приводят к необходимости решения проблемы увеличения объемов грузовых и пассажирских перевозок, а также повышения скоростей движения транспортных средств. Необходимо отметить, что в настоящее время ограничение скорости именно грузовых перевозок выступает на первый план, поскольку большой вес единичной железнодорожной платформы (в груженом состоянии) не позволяет увеличить скорость грузового состава выше 160 км/ч без повышенного разрушающего воздействия на путь. В то же время скорость регулярных пассажирских перевозок уже приближается к значению 300–350 км/ч.

Перспективным направлением развития высокоскоростного транспорта является применение вместо колес магнитного подвеса. Для создания силы тяги при этом возможно использование линейных асинхронных двигателей или синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

При создании электропривода (ЭП) возникают две основные проблемы, определяющие конечное число вариантов его реализации. Это источник электроэнергии на платформе и стоимость активной путевой структуры, вдоль которой движется платформа, длина которой может составлять (в перспективе) несколько тысяч километров. Из анализа этих проблем напрашиваются два основных варианта решения задачи. Так, если первичный элемент двигателя (получающий электроэнергию от источника) расположен на платформе, то целесообразно привод строить на базе асинхронного двигателя, выполняя активную путевую структуру в виде электропроводящей полосы (вторичного элемента, получающего энергию от первичного). Достоинством такой компоновки электродвигателя является низкая стоимость путевой структуры, а недостатком – необходимость подвода основной, используемой для создания тяги, энергии к движущейся с большой скоростью платформе. Необходимо отметить, что последнее, в отличие от традиционного рельсового электротранспорта, приходится реализовать в двухпроводном варианте, поскольку токоподвод через рельсы отсутствует.

Второй вариант решения задачи связан с выполнением первичного элемента в виде активной путевой структуры. В этом случае стоимость путевой структуры существенно возрастет, но подвода электроэнергии к движущейся платформе можно избежать, используя в качестве источника собственных нужд аккумуляторы, подзаряжаемые во время движения от дополнительных генераторных обмоток, размещенных на платформе. При этом вторичный элемент тягового электродвигателя размещается на платформе и в случае асинхронного двигателя представляет собой электропроводящую полосу, а в случае синхронного – индуктор, состоящий из постоянных магнитов и магнитопровода.

Имея худшие удельные показатели, асинхронный двигатель проигрывает синхронному по объему, КПД и коэффициенту мощности. И, кроме того, наличие возбуждения в синхронном двигателе позволяет работать на больших воздушных зазорах между платформой и путевой структурой, что облегчает работу магнитного подвеса и снижает требования к величине погрешности монтажа активной путевой структуры.

В данной статье рассматривается тяговый электропривод разработки ОАО «НПО «Русский Электропривод»» на базе линейного синхронного двигателя (ЛСД), индуктор которого размещен на платформе, а активная путевая структура выполнена в виде статора, получающего энергию от статического полупроводникового преобразователя. Электропривод является составной частью макета, демонстрирующего основные принципы создания магнитолевитационных платформ, и служит для линейного перемещения грузовой транспортной платформы (ГТП), подвешенной с помощью магнитного поля.

## **Основные технические характеристики электропривода**

Разрабатываемый электропривод используется в составе демонстрационного макета и предназначен для линейного перемещения ГТП в пределах зоны, определяемой магнитным подвесом. В состав электропривода входят: линейный синхронный двигатель, а также система питания и управления электропривода.

Основные параметры ЭП:

- |                                        |          |
|----------------------------------------|----------|
| • развиваемое тяговое усилие, не менее | 10 кН;   |
| • напряжение питания                   | 3×380 В; |
| • частота напряжения питающей сети     | 50 Гц.   |

Управление ЭП должно быть реализовано от местного пульта управления, расположенного в непосредственной близости от ЛСД. ЭП должен обеспечивать следующие основные требования по назначению:

- плавное перемещение ГТП вдоль путевой структуры со скоростью, позволяющей продемонстрировать процесс движения для его визуальной оценки;
- остановку ГТП;
- изменение направления движения ГТП.

## **Описание конструкции электродвигателя**

Линейный синхронный двигатель (см. рис. 1) состоит из двух основных узлов: статора и индуктора. Статор двигателя укладывается вдоль путевой структуры на фундамент, а индуктор устанавливается на ГТП таким образом, чтобы воздушный зазор между статором и индуктором составлял 10–25 мм.

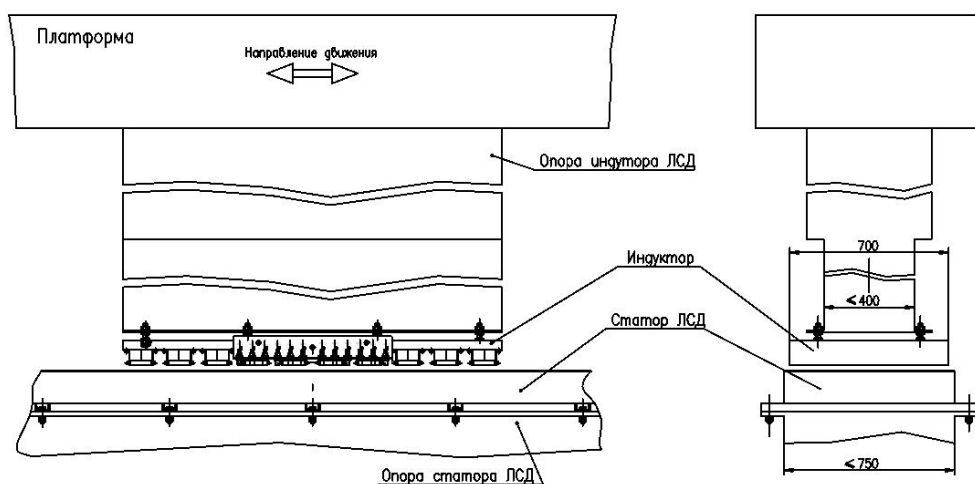


Рис. 1. Расположение двигателя на платформе

Статор двигателя состоит из конструктивных модулей, механически связанных между собой с помощью болтовых соединений и сварки. Общая длина (в направлении хода) статора зависит от требуемого хода платформы. Активную зону статора образуют 12 полюсов, находящихся в данный момент под индуктором. Общее число полюсов статора при этом должно быть больше 12 и кратно числу фаз (18, 24 и т. д.). Для иллюстрации на рис. 2 представлен общий вид модуля статора на 18 полюсов, который позволяет перемещаться ГПТ в пределах 0,84 м (величина хода на каждые 6 полюсов статора). При необходимости подобные модули могут быть состыкованы с формированием статора требуемой длины.

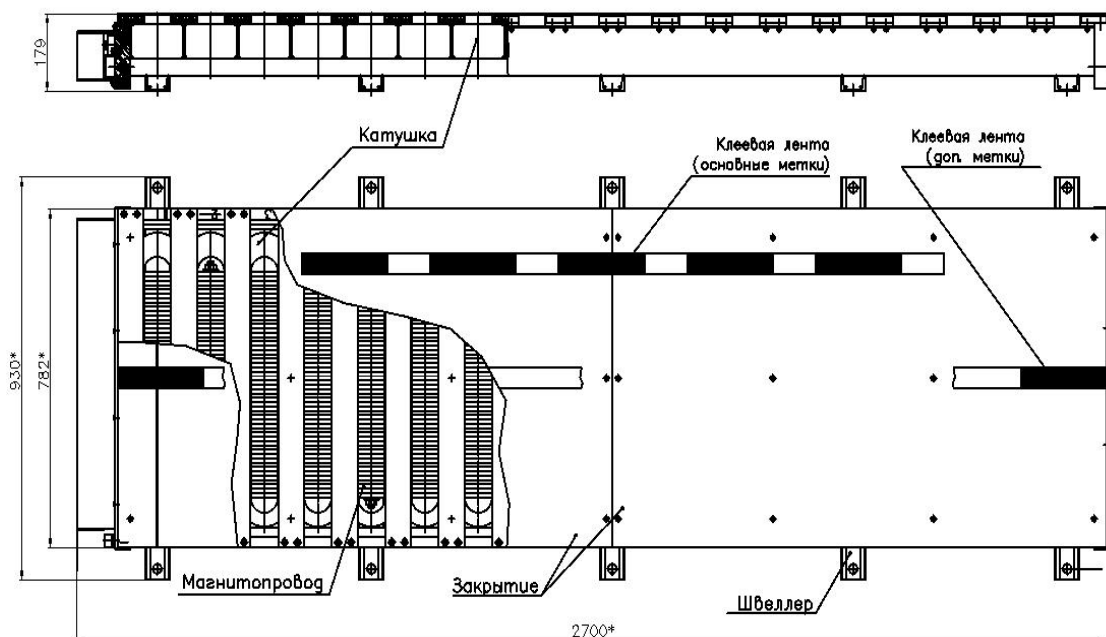


Рис. 2. Общий вид модуля статора на 18 полюсов (ход платформы 0,84 м)

Магнитопровод модуля статора состоит из окрашенных листов конструкционной ферромагнитной стали СТ10 (СТ20) толщиной 10 мм. Листы электротехнического железа собраны в пакет, стянутый шпильками. Спинка магнитопровода приварена к опорным швеллерам.

На каждый полюс магнитопровода установлена катушка, намотанная изолированным проводом типа АПВ. Корпусная изоляции катушки не требуется. Катушки в пазах закреплены стеклотекстолитовыми пластинами (рис. 4 слева). После установки катушки соединяются проводом типа АПВ согласно схеме соединений с образованием шести фаз, начало и конец которых выводится в клеммную коробку.

Сверху на магнитопровод статора устанавливается закрытие, выполненное из стеклотекстолитовых листов. Боковые зоны катушек статора также защищены закрытиями, к одному из которых прикреплена клеммная коробка, обеспечивающая ввод кабелей из системы питания.

Общий вес модуля статора на 18 полюсов составляет около 1100 кг.

Индуктор (см. рис. 3) представляет собой массивную плиту толщиной 40 мм из конструкционной ферромагнитной стали (СТ10, СТ20), на которой закреплены 10 полюсов с постоянными магнитами. Полярность полюсов чередуется. Каждый полюс представляет собой пару одинаковых магнитных модулей (см. рис. 4 справа), прижатых к плите с помощью пластин (наконечников полюсов) из конструкционной ферромагнитной стали.

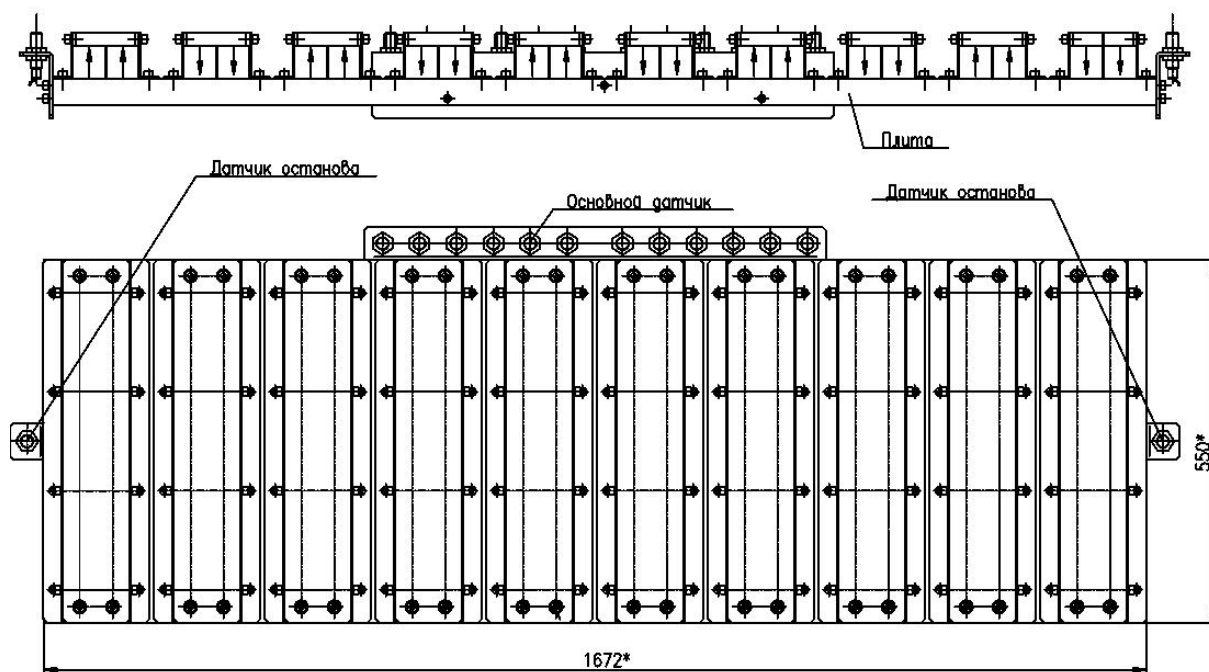


Рис. 3. Общий вид индуктора

Магнитный модуль состоит из нержавеющей трубы квадратного поперечного сечения длиной 500 мм, внутри которой размещены десять маг-

нитов кубической формы с одинаковым направлением намагниченности. На концах трубы установлены заглушки для защиты и фиксации магнитов. В заглушках проделаны отверстия, обеспечивающие фиксацию. Передача тягового (сдвигающего) усилия с полюса на массивную плиту осуществляется с помощью алюминиевых уголков, прикрепленных к плите вдоль боковых сторон полюса (рис. 4).

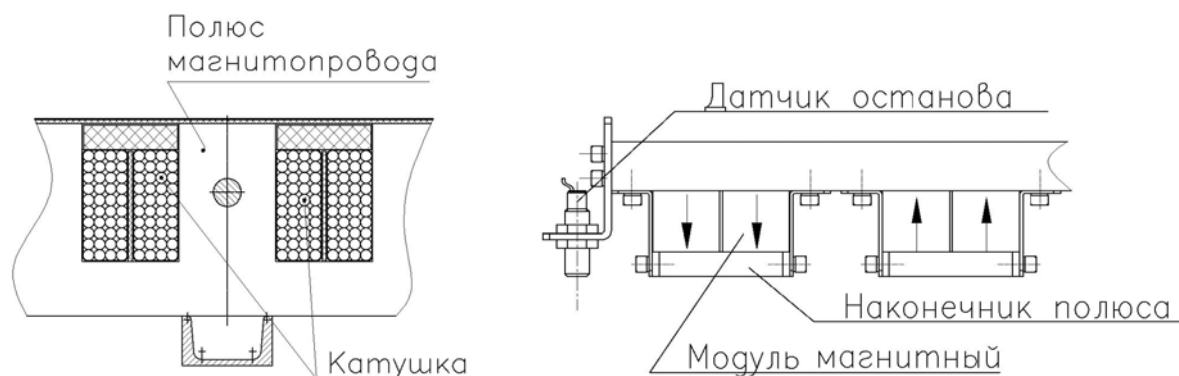


Рис. 4. Элементы активной зоны статора и индуктора

Общий вес индуктора составляет около 600 кг (из них магнитов марки N35 – около 190 кг).

## Устройство и работа системы питания электропривода

Система питания (СП), используемая в электроприводе (ЭП), предназначена для передачи электрической энергии от питающей сети переменного напряжения к приводному электродвигателю. В электроприводе применено независимое питание обмоток фаз ЛСД.

В зависимости от требуемого хода платформы (длины статора) электропитание двигателя можно реализовать по разному: либо питать всю обмотку статора целиком, включая все неактивные катушки, либо питать только секции обмотки, находящиеся в непосредственной близости от индуктора и подключение дополнительных секций осуществлять по мере продвижения платформы. Для снижения энергопотребления, а также удешевления оборудования СП целесообразно остановиться на втором варианте.

Поскольку длина запитанной секции должна быть больше 12-ти активных (находящихся под индуктором) полюсов статора и кратна числу фаз, то есть шести, то целесообразно остановиться на минимальной секции, состоящей из 18-ти катушек, то есть катушек, установленных в пределах одного модуля статора (рис. 2).

Ниже представлено описание схемы СП секции обмотки на 18 катушек. Для создания полномасштабного макета с большим ходом потребует-

ся два комплекта такого оборудования, которые подключаются к двум последовательным секциям обмотки – активной (над катушками которой находится индуктор) и следующей за ней. По мере вывода секции из статуса активной, оборудование, питающее ее, подключается к секции, следующей за активной. Для реализации подключений секций обмотки потребуются дополнительные контакторы, число которых зависит от общего количества секций (требуемого хода платформы). Активацию контакторов в автоматическом режиме можно реализовать по сигналам оптических датчиков, аналогичных используемым в составе СП секции (см. ниже).

В качестве источников питания секции обмотки статора предлагаются сварочные выпрямители, работающие в режиме источников тока. Упрощенная функциональная схема базового варианта СП приведена на рис. 5.

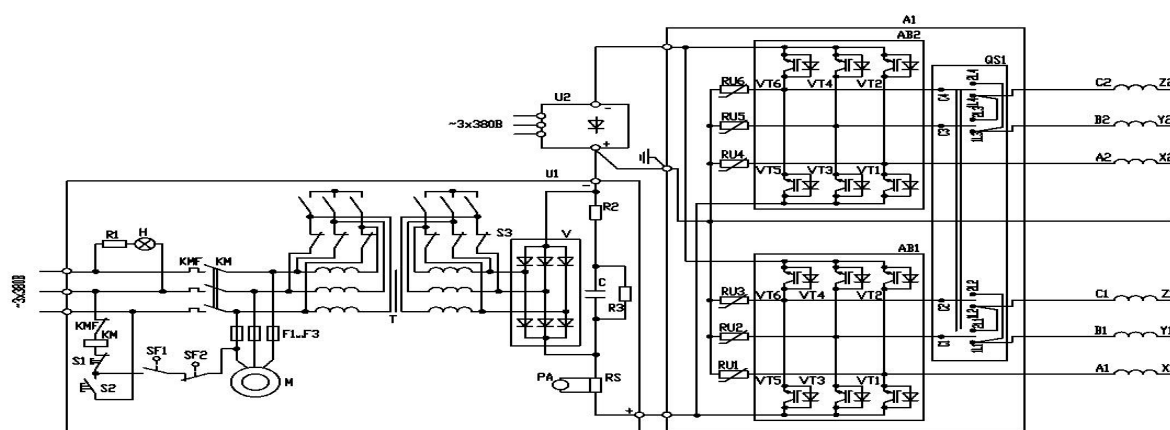


Рис. 5. Функциональная схема СП секции обмотки статора

Система питания секции содержит следующие основные устройства и элементы:

- U1, U2 – сварочные выпрямители типа ВД-306;
- AB1, AB2 – транзисторные мосты типа СМ150ТУ-12F;
- RU1-RU6 – варисторы;
- QS1 – переключатель направления движения.

Входной сварочный выпрямитель ВД-306 состоит из трансформатора с крутопадающей ВАХ и диодного выпрямителя. Сварочный выпрямитель обеспечивает гальваническую развязку СП от питающей сети и согласование уровней питающего сетевого напряжения с рабочим напряжением СП. Регулирование напряжения выпрямителя (фактически, крутизны ВАХ) осуществляется за счет изменения индуктивности рассеяния трансформатора перемещением обмоток друг относительно друга, или, в зависимости от конструкции, перемещением магнитного шунта. Плавное регулирование напряжения (тока) возможно в пределах двух диапазонов тока, переключение между которыми осуществляется переключателем соединения первичной обмотки трансформатора Y/Δ.

Два сварочных выпрямителей U1 и U2, соединенных последовательно, формируют биполярный источник, позволяющий с помощью пары транзисторных ключей, подсоединенных к фазе, подавать на фазу либо положительный, либо отрицательный потенциал источника (другой вывод фазы всегда подключен к общей точке двух сварочных выпрямителей (нейтрали). При этом каждый выпрямитель одновременно питает две фазы. Транзисторные ключи сгруппированы в два типовых IGBT моста AB1, AB2.

Варистор, подключенный параллельно фазе, позволяет защитить транзисторные ключи от перенапряжений, возникающих при отключении фазы с током от источника.

Управление двигателем (коммутация токов в обмотках) осуществляется по сигналам оптических датчиков положения индуктора (ДПИ). Узел ДПИ состоит из трех частей: 12-ти основных оптических датчиков, расположенных на боковой части индуктора на кронштейне, двух оптических датчиков останова, закрепленных на своих кронштейнах по торцам индуктора, и меток, нанесенных на две клеевые ленты (см. рис. 2). Активный сектор (белый) на ленте обеспечивает включение датчика метки, пассивный (черный) – его отключение.

Формирование сигналов управления транзисторными ключами обеспечивается с помощью:

- двух драйверов управления IGBT мостами ДР6120П-А;
- 12-ти основных датчиков метки ODB A44A-49N-25C2-LE (в составе ДПИ);
- 12-ти нормально открытых электромагнитных реле типа РЭС;
- основной системы меток на статоре.

Для формирования сигналов управления транзисторными ключами одной фазы используются сигналы двух основных оптических датчиков метки, один из которых отвечает за ток положительной полярности, а другой – за ток отрицательной полярности.

Основная система меток представляет собой клеевую ленту чередующихся цветов. Лента расположена вдоль всей длины статора (в направлении движения). Последовательность и шаг расположения датчиков и меток обеспечивает подачу на фазу биполярных прямоугольных импульсов напряжения длительностью 120°.

Сигналы с включенных датчиков питают электромагнитные реле, которые, замыкаясь, подают управляющие сигналы на драйверы транзисторных мостов (использование промежуточного элемента – реле требуется из-за разного уровня управляющих напряжений датчиков и драйверов). Транзисторные мосты подключают выводы сварочных выпрямителей на выходы тех фаз, датчики которых в данный момент активны. ГТД начинает движение.

Как только датчик перемещается из активной зоны в пассивную, подача питания на соответствующее замыкающее реле прекращается. Управ-

ляющий сигнал с транзисторного ключа мгновенно снимается, подача напряжения на фазу прекращается. Ток фазы быстро снижается, замыкаясь через параллельный варистор.

Для остановки платформы предусмотрены два дополнительных оптических датчика метки (датчика останова), установленных на разных торцах индуктора, и дополнительная система меток на статоре (рис. 2). Дополнительная система меток также представляет собой клеевую ленту, белый цвет на которой отмечает рабочую зону, в пределах которой может перемещаться индуктор (платформа). Участки ленты вне рабочей зоны окрашены в черный цвет, обозначая зону, где питание обмоток двигателя блокируется. Сигнальные выводы дополнительных датчиков через трехпозиционный тумблер (ЛЕВО-СТОП-ПРАВО) соединены с питанием дополнительного электромагнитного реле типа РЭС, контакты которого подключают источник постоянного напряжения 15 В в цепь питания 12-ти основных электромагнитных реле. Таким образом, основные реле подают управляющие сигналы на драйверы только, если замкнуты контакты дополнительного реле. Последнее наблюдается, если выполнены два условия: трехпозиционный тумблер находится в положении ПРАВО (ЛЕВО) и правый (левый) дополнительный датчик находится над белой меткой.

Длина дополнительных меток, а также напряжение на выходе сварочных выпрямителей подбирается в ходе пуско-наладочных работ так, чтобы силы инерции не приводили к чрезмерным ударам платформы об ограничительные буферы.

Для того, чтобы после остановки обеспечить движение двигателя в противоположном направлении, необходимо:

- 1) перевести трехпозиционный тумблер в положение «СТОП»;
- 2) переключить пакетный переключатель QS1 типа ПП4-100/Н2 МЗ, в результате чего меняется порядок подачи напряжения на обмотки двигателя (чередование фаз);
- 3) перевести трехпозиционный тумблер в положение нужного движения («ЛЕВО» или «ПРАВО»).

Конструктивно СП секция выполнена в виде двух отдельных серийных шкафов сварочных выпрямителей и шкафа коммутатора с общим весом около 312 кг.

## **Результаты расчетов электропривода**

В данном разделе представлены результаты расчета работы активной секции электропривода, обеспечивающей ход платформы в пределах 0,84 м. Выполняется электрический расчет силовой цепи согласно рис. 5, где каждая фаза ЛСД представляет собой последовательное соединение трех катушек (всего в секции 18 катушек). В каждой катушке 40 витков.

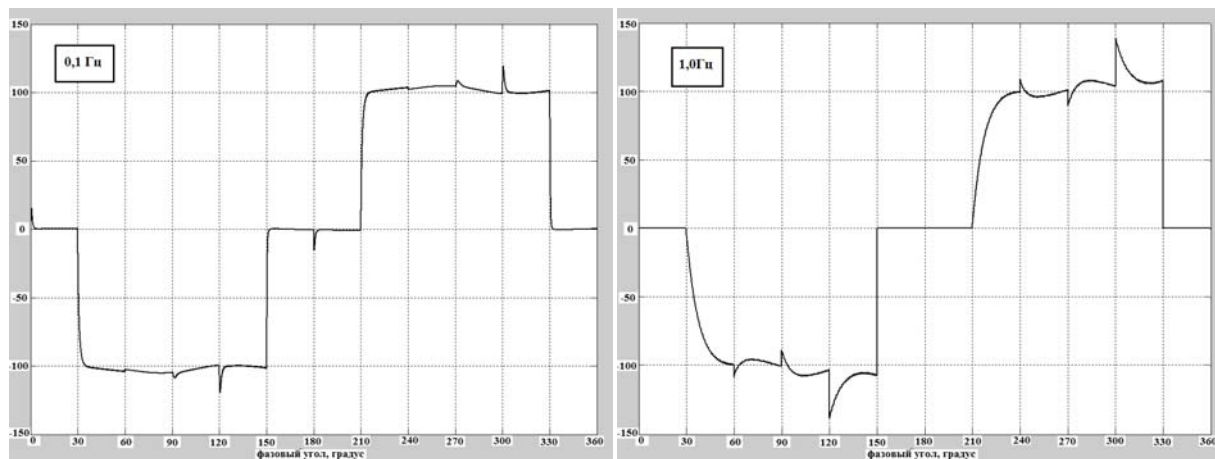
Модель электродвигателя, используемая при расчете силовой цепи включает в себя полную матрицу индуктивностей шестифазной цепи и шесть источников ЭДС фаз. Указанные параметры определяются в результате проведения электромагнитного расчета ЛСД.

Параметры выпрямителя, полученные из анализа его типовых внешних характеристик для диапазона больших токов, указаны в табл. 1.

**Таблица 1. Характеристики выпрямителя в диапазоне больших токов**

|                                                         |                                                 |         |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------|
| Выпрямленное напряжение на х.х., В                      | $E_{dxx}$                                       | 65      |
| Вторичное напряжение трансформатора (амплитуда), В      | $E_{2m} = \frac{\pi}{3\sqrt{3}} E_{dxx}$        | 39      |
| Ток короткого замыкания, А                              | $I_{кз}$                                        | 140–450 |
| Индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора, мОм | $x_{\sigma} = \frac{E_{2m}}{I_{кз}}$            | 87–279  |
| Индуктивность рассеяния трансформатора, мкГн            | $L_{\sigma} = \frac{x_{\sigma}}{2\pi \cdot 50}$ | 276–887 |

Ток фазы в характерных режимах пуска (0,1 Гц) и хода (1 Гц) представлен на рис. 6. При этом желаемый уровень тока на площадке (~100 А) получен при индуктивности рассеяния трансформатора, равной 327 мкГн, что говорит о достаточном запасе по регулировке источника (см. табл. 1).



**Рис. 6. Ток фазы (в амперах) в рабочем режиме**

Анализ кривых на рис. 6 позволяет заметить, что предложенная система питания электродвигателя обладает свойством самоограничения скорости движения платформы. Действительно, по мере набора скорости движения (частоты), время нарастания тока в фазе после подачи напряжения становится все более существенным, по сравнению с требуемой дли-

тельностью его протекания по фазе. Это приводит к снижению среднего тока за импульс и снижению тягового усилия, что ограничивает ускорение платформы. Скорость, соответствующая стационарному режиму (равновесию), задается в ходе пуско-наладочных работ за счет регулирования выпрямителя, с учетом реальных сил сопротивления движению платформы.

Полученный в электрическом расчете ток фазы использовался в проверочном электромагнитном расчете для определения окончательных значений тяговой силы. На рис. 7 показано распределение модуля индукции магнитного поля по сечению активной зоны двигателя в рабочем режиме. Видно, что железо магнитопровода хорошо использовано (уровень индукции достигает 1,8–1,9 Тл).

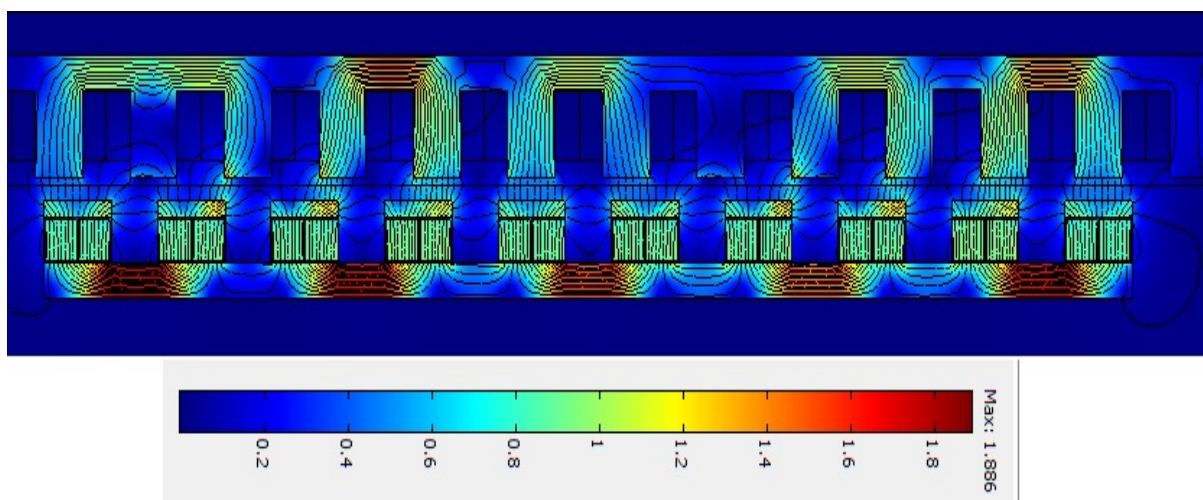


Рис. 7. Распределение модуля индукции магнитного поля в активной зоне двигателя (рабочий режим)

В таблице 2 представлены основные характеристики двигателя в рабочих режимах, рассчитанных для форм фазного тока, указанных на рис. 6 (величина тягового усилия в этих режимах сохраняется одинаковой). Из таблицы видно, что в конструкцию электропривода заложен двукратный запас по тяговому усилию. Это позволяет гарантировать работу электропривода в широком диапазоне эксплуатационных условий, а также компенсировать возможные неточности при разработке и изготовлении системы магнитного подвеса, например, в части определения сопротивления линейному движению, некоторому увеличению рабочего зазора и т. п.

Ввиду того, что предполагается кратковременная работа двигателя, наиболее критическим по температуре элементом является обмотка. Для оценки предельной длительности работы возможно рассматривать наихудший случай адиабатического нагрева (нагрева в условиях отсутствия охлаждения) обмотки.

**Таблица 2. Характеристики режимов и вес активной зоны**

| Наименование характеристики                                                                                                                               | Значение                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Расчетное тяговое усилие, кН                                                                                                                              | 21,0                            |
| Сила тяжения индуктора к статору, кН                                                                                                                      | 84,7                            |
| Ток фазы, А:<br>– площадь<br>– амплитуда первой гармоники<br>– действующее значение                                                                       | ~100<br>113<br>83               |
| Угол режима, градус                                                                                                                                       | –0,7                            |
| Действующее значение плотности тока в витке катушки, А/мм <sup>2</sup>                                                                                    | 5,19                            |
| Мощность тепловыделений в обмотке, кВт                                                                                                                    | 13,2                            |
| Действующее значение линейной токовой нагрузки, кА/м                                                                                                      | 47,4                            |
| Удельная электромагнитная сила (на площадь индуктора), кН/м <sup>2</sup>                                                                                  | 25,1                            |
| Вес активных элементов двигателя (на секцию из 18 катушек), кг<br>– алюминий<br>– магниты<br>– магнитопровод статора<br>– магнитопровод ротора<br>– всего | 50<br>190<br>920<br>340<br>1500 |

Рассматривая в качестве предельного уровня превышения температуры обмотки  $\Delta T = 70^{\circ}\text{C}$  (при  $20^{\circ}\text{C}$  окружающей среды абсолютная температура обмотки составит  $90^{\circ}\text{C}$ ), получим следующую оценку допустимого времени непрерывной работы:

$$\Delta t = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{P} = \frac{903 \cdot 50 \cdot 70}{13000} = 243 \text{ с} \approx 4 \text{ мин},$$

где  $c$ ,  $m$  – удельная теплоемкость и суммарная масса алюминия, а  $P$  – тепловыделения в обмотке (см. табл. 2).

Очевидно, что полученное предельное время работы двигателя существенно превышает необходимое для демонстрации. Поскольку разумно предположить, что рациональным временем преодоления расстояния, соответствующего длине секции двигателя из 18-ти катушек (0,84 м), является время не более 10 с.

### Заключение

В настоящей статье представлены результаты разработки электропривода на основе двигателя с постоянными магнитами для линейного пе-

ремещения с заданным тяговым усилием не менее 10 кН грузовой транспортной платформы (ГПТ), подвешенной в магнитном поле.

Результаты расчетов подтвердили реализуемость данного электропривода, причем предлагаемая конструкция электропривода обеспечивает по расчетам, по крайней мере, двукратный запас по тяговому усилию, что позволит компенсировать возможные упущения при разработке системы магнитного подвеса в части определения сопротивления линейному движению (например, повышенное трение в стабилизирующих роликах) или некоторое увеличение рабочего зазора и др.).

Предложенная в статье концепция построения линейного электропривода позволяет за счет простоты и модульности конструкции двигателя, а также секционированного способа электропитания его обмоток (что минимизирует затраты на преобразователь) в кратчайшие сроки и при минимуме затрат создать полномасштабный макет с произвольной величиной хода ГПТ.

### Библиографический список

1. Зайцев А. А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации. – «Транспорт Российской Федерации» № 1 (50), 2014.
2. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев ; под ред. В. А. Гапановича. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.
3. Chan-Bae Park, Hyung-Woo Lee and Ju Lee. Performance Analysis of the Linear Induction Motor for the Deep-Underground High-Speed GTX. – JEET Vol. 7. – No 2. – Pp. 200–206, 2012.
4. J. F. Gieras Permanent magnet motor technology : design and applications. – CRC Press, 2010. – 603 p.
5. J. Puranen Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study / Doctor of Science Thesis. – Lappeenranta University of Technology, 2006. – 150 p.
6. K. Sudheer, K.Sakthidhasan and P.Musthafa. Comparative study of PMSM and IM Based on Direct Torque Control Method. – IJERA Vol. 1, Issue 3. – Pp. 418–426.
7. Электрическая машина. Евразийский патент № 014511, 2010.
8. Магнитный модуль. Евразийский патент № 014728, 2011.
9. Закс М. И. Сварочные выпрямители. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
10. J. L. Volakis, A. Chatterjee, L. C. Kempel. Finite Element Method Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits, and Scattering Applications. – Wiley-IEEE Press, 1998. – 368 p.

## References

1. Zaytsev A. A. Transport Rossiskoi Federatsii – Transport of the Russian Federation, St. Petersburg, 2014, no. 1 (50), pp. 8–11
2. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. Magnitolevitatsionnaya transportnaya tehnologiya [Magnitolevitatsionnaya transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.
3. Chan Bae Park, Hyung Woo Lee, Ju Lee Underground High-Speed GTX, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 200–206.
4. Gieras J. F. CRC Press, 2010, 603 p.
5. Puranen J. Induction motor versus permanent magnet synchronous motor in motion control applications: a comparative study. Lappeenranta, 2006. 150 p.
6. Sudheer K., Sakthidhasan K., Musthafa P. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2011, vol. 1, no. 3, pp.418–426.
7. Electric Machine. Patent no. 014511, 2010.
8. Magnetic module. Patent no. 014728, 2011.
9. Zaks M. I. Svarochnie vipryamiteli. Leningrad, 1983. 96 p.
10. Volakis J. L., Chatterjee A., Kempel L. C. Finite Element Method Electromagnetics: Antennas, Microwave Circuits & Scattering Applications. New Jersey, 1998. 368 p.

### Сведения об авторах:

АДАЛЕВ Алексей Сергеевич, к. т. н., доцент кафедры «Теоретическая электротехника и электромеханика» ИЭиТС ФГАОУ ВО «СПбПУ», нач. расчетного сектора ОРЭ ОАО «НПО «Русский Электропривод»», E-mail: adalev@mail.ru

КУЧИНСКИЙ Владимир Георгиевич, д. т. н., профессор кафедры «Электротехника и электроэнергетика» ИЭиТС ФГАОУ ВО «СПбПУ», генеральный директор ОАО «НПО «Русский Электропривод»», E-mail: info@ruselprivod.ru

### Information about authors:

Alexei S. ADALEV, PhD, is an associate professor in the Theoretical Electrotechnics and Electromechanics Department of Piter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University and is a head of the computational sector of the Design Department in the OJSC «Research and Production Association “Russian Electric Drive”», E-mail: adalev@mail.ru

Vladimir G. KUCHINSKII, Doctor of Science, is a professor in the Electrotechnics and Electroenergetics Department of Piter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University and is the director general of the OJSC «Research and Production Association “Russian Electric Drive”», E-mail: info@ruselprivod.ru

**О. А. Шилова<sup>1,2</sup>, И. Н. Цветкова<sup>1</sup>, Л. Н. Красильникова<sup>1</sup>,  
Е. Ю. Ладилина<sup>3</sup>, Т. С. Любова<sup>3</sup>, И. Ю. Кручинина<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

<sup>3</sup> Институт металлоорганической химии им. Г. А. Разуваева РАН

## **СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ, АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ ГИБРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Дата поступления 27.07.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В работе предложен подход к формированию антиобледенительных наноструктурированных покрытий для нанесения на металлы с целью защиты от обледенения и коррозии различных металлоконструкций. Разработана методика получения супергидрофобных покрытий из золь-гель композиций с использованием фторсодержащих диалкоксисиланов и гидрофобизированного наполнителя. Синтезированы золи на основе метилтриэтоксисилана, которые использованы для получения пленкообразующих композиций посредством смешивания с фторсодержащими гидрофобизаторами и порошком аэросила. Физическо-химическими методами исследованы степень гидрофобности и адгезионные свойства. Методом цифровой обработки видеоизображений сидячей капли на исследуемой поверхности изучены динамики изменения углов смачивания. Адгезия покрытия к подложке оценивалась методом решетчатого надреза и составила 1 балл. Определение физических свойств путем измерения углов смачивания и скатывания капли воды с поверхности показало, что покрытия имеют высокий краевой угол смачивания (более 150°), а угол скатывания не превышает 10°, что подтверждает наличие супергидрофобности и предполагает антиобледенительные свойства у покрытий. Выявлено, что существенное влияние на гидрофобные и супергидрофобные свойства оказывает гидрофобный аэросил.

**Ключевые слова:** супергидрофобность, антиобледенительные покрытия, золь-гель метод, фторсодержащие полисилоксановые покрытия, фторсодержащие мономеры, аэросил.

**O. A. Shilova<sup>1,2</sup>, I. N. Tsvetkova<sup>1</sup>, L. N. Krasilnikova<sup>1</sup>, E. YU. Ladilina<sup>3</sup>,  
T. S. Lyubova<sup>3</sup>, I. Yu. Kruchinina<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

<sup>3</sup> G. A. Razuvaev Institute of Organometallic Chemistry of the Russian Academy of Sciences

**SYNTHESIS AND RESEARCH OF SUPERHYDROPHOBIC, ANTI-ICING  
HYBRID COATINGS**

**Abstract:** An approach to the formation of anti-icing nanostructured coatings for use on metal to protect against freezing and corrosion of various metal structures was presented in this work. A method for preparing superhydrophobic coatings using the sol-gel compositions with fluorinated dialkoxysilanes and hydrophobized filler was developed. Synthesized methyltriethoxysilane sols were used for film forming compositions by mixing with the fluorine-containing powder and hydrophobizing aerosil. The hydrophobicity and adhesion properties were investigated by physical and chemical methods. The method of digital image processing of sessile drops on the surface was used to study the dynamics of change in contact angles. The adhesion of the coating to the substrate was evaluated by method of a lattice cut and made up 1 point. Determination of physical properties by measuring the contact angles and roll-off of water drops from the surface showed that the coatings have a high contact angle (over 150 °), and the sliding angle less than 10 degrees. That could confirm the superhydrophobicity and assume anti-freezing properties. It was revealed that aerosil has a significant impact to hydrophobic and superhydrophobic properties.

**Key word:** superhydrophobic, anti-icing coatings, sol-gel method, fluorine-containing polysiloxane, fluoropolymer, aerosol, contact angle.

## Введение

С развитием скоростного и высокоскоростного железнодорожного движения обледенение оборудования подвижного состава может обернуться серьезными эксплуатационными проблемами. Становится еще более актуальной проблема создания нового типа композиций, которые позволяют защитить от обледенения и коррозии современный железнодорожный транспорт, находящийся в условиях пониженных температур.

Один из путей решения этой проблемы – это применение антиобледенительной композиции, которая позволяет непосредственно ослабить силы сцепления льда с поверхностью, снизить энергетические затраты на его удаление, продлить срок службы защищенных поверхностей и уменьшить ежегодные расходы на эксплуатацию.

Данная работа посвящена разработке и исследованию покрытий, обладающих наноструктурированной поверхностью, отличающихся супергидрофобными свойствами и повышенной антиобледенительной способностью.

Для достижения поставленной цели были определены следующие требования к супергидрофобным антиобледенительным покрытиям:

- высокая адгезия к защищаемым материалам;
- низкая адгезия льда к покрытию;
- краевой угол смачивания водой не ниже 150°;
- угол скатывания воды с покрытия не более 10°.

## Методика исследования

Для получения супергидрофобных композиций был использован низкотемпературный золь-гель метод синтеза наноразмерных соединений в среде гидрофобного связующего с дополнительным введением гидрофо-

бизированного наполнителя – аэросила [1]. Введение фторсодержащих органосилоксанов позволяет усилить водоотталкивающий эффект и получить покрытие с хорошим уровнем физико-механических показателей. В работе были использованы фторсодержащие мономеры, синтезированные по методике [2]:

метил-(3,3,3-трифторпропил)-диметоксисилан  $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}(\text{OMe})_2$  (**1**),  
метил-(3,3,3-трифторпропил)-бис-(2,2,2-трифторэтоксисилан  $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}(\text{OCH}_2\text{CF}_3)_2$  (**2**)

и метил-(2,2,2-трифтор-1-трифторметил-этоксиметил)-бис-(2,2,2-трифтор-1-трифторметил-этоксисилан  $(\text{CF}_3)_2\text{CHOCH}_2\text{SiMe}(\text{OCH}(\text{CF}_3)_2)_2$  (**3**).

Фторкремнийорганические соединения вводили на стадии гидролиза метилтриэтоксисилана (МТЭОС) в количестве до 10 масс. %. Полученный золь наносили аэрографом методом распыления через 4 и 40 суток с момента их приготовления; нанесенные покрытия высушивали при  $100^\circ\text{C}$  в течение 1 часа. Степень гидрофобности оценивали по величине краевого угла смачивания ( $\theta^\circ$ ) и углу скатывания капли воды с покрытия ( $\varphi^\circ$ ). Результаты измерения приведены в таблице.

Незначительное увеличение значений углов смачивания для составов № 1–3 в сравнении с золей № 4 (см. табл., рис. 1) без фторсодержащих модифицирующих добавок объясняется наличием фторкремнийорганической компоненты в составе матрицы. Покрытие № 2 можно считать гидрофобным, а покрытия № 1 и № 3 – близкими к гидрофобным, однако угол скатывания у всех этих покрытий остается чрезвычайно высоким.

**Таблица. Основные гидрофобные свойства покрытий**

| № золь-гель композиции на основе МТЭОС | Фторсодержащий гидрофобизатор                                             | Аэросил R-972 | Возраст золь 4 суток |                 | Возраст золь 40 суток |                 |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
|                                        |                                                                           |               | $\theta^\circ$       | $\varphi^\circ$ | $\theta^\circ$        | $\varphi^\circ$ |
| 1                                      | $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}(\text{OMe})_2$              | –             | 84                   | >90             | 84                    | >90             |
| 2                                      | $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}(\text{OCH}_2\text{CF}_3)_2$ | –             | 90                   | >90             | 90                    | >90             |
| 3                                      | $(\text{CF}_3)_2\text{CHOCH}_2\text{SiMe}[\text{OCH}(\text{CF}_3)_2]_2$   | –             | 88                   | >90             | 89                    | >90             |
| 4                                      | –                                                                         | –             | 82                   | >90             | –                     | –               |
| 5                                      | $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}(\text{OMe})_2$              | +             | 155                  | 9–15            | 153                   | 9               |
| 6                                      | $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}(\text{OCH}_2\text{CF}_3)_2$ | +             | 158                  | 5–15            | 156                   | 5               |
| 7                                      | $(\text{CF}_3)_2\text{CHOCH}_2\text{SiMe}[\text{OCH}(\text{CF}_3)_2]_2$   | +             | 165                  | 2               | 163                   | 2               |
| 8                                      | –                                                                         | +             | 151                  | 20              | –                     | –               |

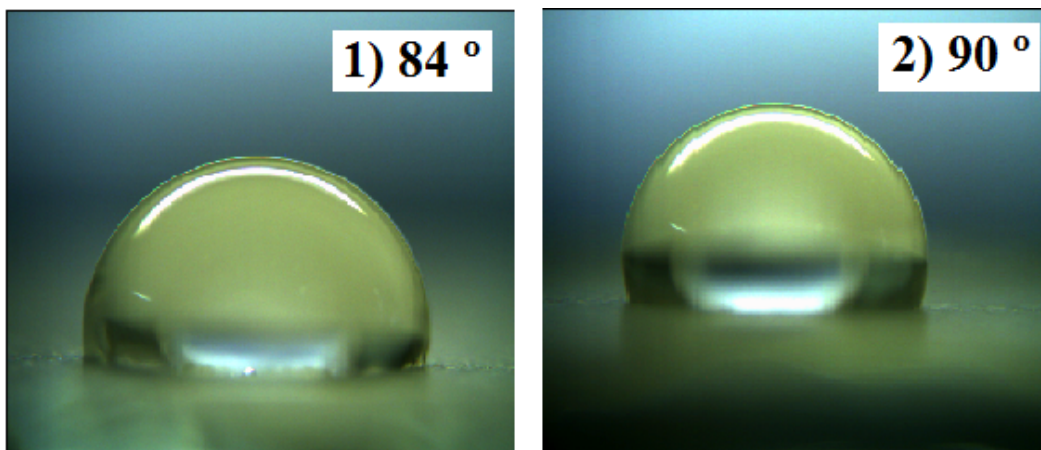


Рис. 1. Фотография капли воды и величина краевого угла смачивания на гидрофобном покрытии **2** и близком к гидрофобному **1**

Особый рельеф поверхности покрытия, сформированный с помощью текстурирующего наполнителя аэросил R-972, который к тому же имеет поверхностные гидрофобные метильные группы, позволило увеличить значение краевого угла смачивания свыше  $150^\circ$  (см. в табл. № 5–8, рис. 2, 3). Наибольший эффект достигается при одновременном использовании фторсодержащего компонента (табл., образцы № 5–7).

Это можно объяснить на примере модели смачиваемости Касси-Бакстера [3–7]. Гидрофобный слой понижает поверхностное натяжение покрытия, препятствуя растеканию капли воды, а созданная за счет сформированной высокоразвитой морфологии структуры (впадины и выступы) шероховатость уменьшает площадь контакта из-за присутствия воздушных зазоров между каплями воды и гидрофобизированной поверхностью и, как следствие, снижает адгезионные силы.

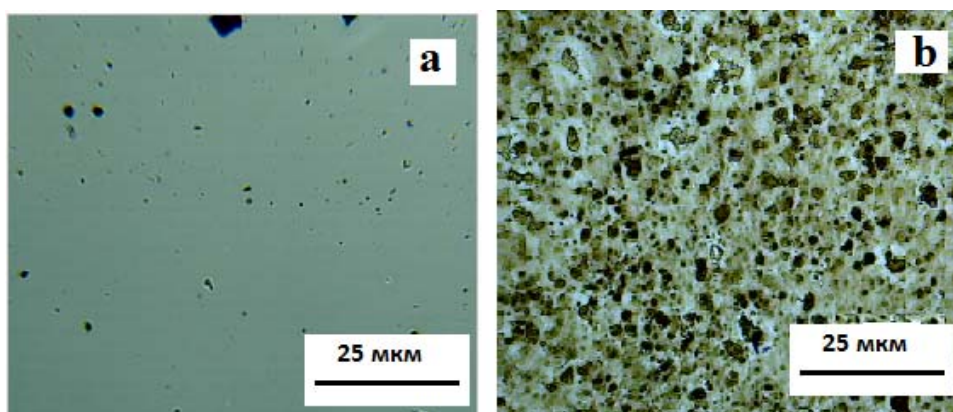


Рис. 2. Микрофотографии покрытий:  
*a* – из золь № 2, модифицированного соединением **2**;  
*b* – из золь № 6, модифицированного соединением **2** и аэросилом R-972

Определение физических свойств путем измерения углов смачивания и скатывания капли воды с поверхности показало, что покрытия имеют высокий краевой угол смачивания (более  $150^\circ$ ), и угол скатывания не превышает  $10^\circ$  (см. табл.), что подтверждает наличие супергидрофобности и предполагает антиобледенительные свойства у покрытий.

Ранее проведенные исследования [8] показали существенное влияние гидрофобизированного аэросила, в том числе со фторсодержащими группами, на увеличение величины угла смачивания. Однако, как было показано выше, совместное введение в золь-гель композицию гидрофобизированного аэросила и фторсодержащей модифицирующей добавки (гидрофобизатора) резко повышает величину угла смачивания. По-видимому, в этом случае можно говорить о явлении синергизма.

Адгезия покрытия к подложке оценивалась методом решетчатого надреза и составила 1 балл. При 4-кратном увеличении отмечены ровные и четкие значения надрезов без сколов и крошения.

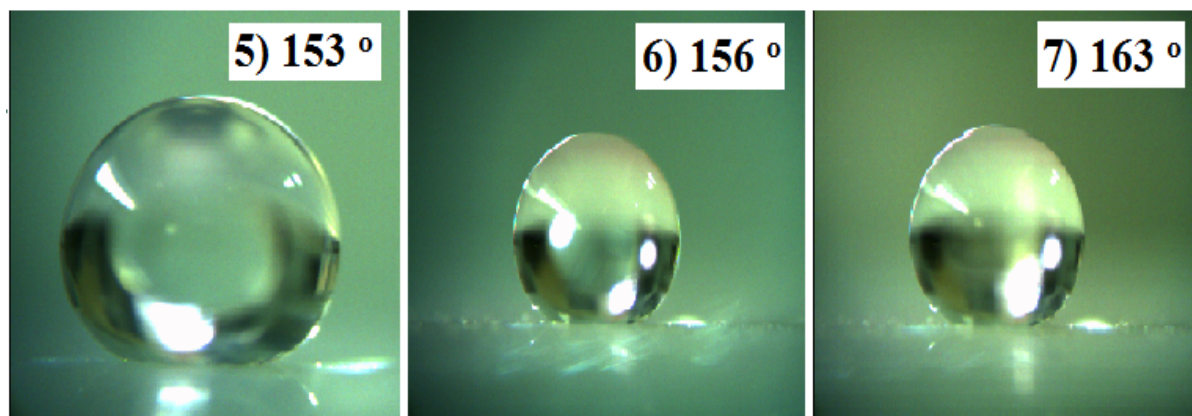


Рис. 3. Фотография капли воды и величина краевого угла смачивания на супергидрофобных покрытиях (№ 5–7), полученных с использованием соединений 1–3 и аэросила R-972

Механизм антиобледенительного действия непосредственно связан с гидрофобностью поверхностного слоя, которая регулируется поверхностной энергией и поверхностной структурой. Считается, что гидрофобность можно наблюдать на твердой поверхности с низким значением поверхностной энергии на границе твердое тело/газ [3]. Известно, что поверхностная энергия функциональных групп уменьшается в следующем порядке  $-\text{CH}_2 > -\text{CH}_3 > \text{CF}_2 > -\text{CF}_2\text{H} > -\text{CF}_3$  [4, 9]. Как видно из таблицы, с увеличением количества фтороуглеродных групп в модифицирующем соединении (гидрофобизаторе) увеличивается краевой угол смачивания, а следовательно, улучшаются гидрофобные свойства покрытия и уменьшается его поверхностная энергия (становясь меньше поверхностной энергии воды).

В идеале капли, попадающие на супергидрофобную поверхность, должны иметь минимальную площадь контакта с поверхностью. При отрицательных температурах капли воды, замерзая, формируют приконтактный слой льда, который образует не сплошной ледяной слой с высокой адгезией, а рыхлый нижний слой со структурой, повторяющей форму капель воды. Минимальная площадь контакта должна обеспечивать слабую адгезию льда к покрытию [10]. Вследствие этого при механической деформации траектория развития трещины в ледяном слое будет проходить по границе льда с покрытием в зоне слабых сил взаимодействия, и ледяной покров будет растрескиваться, приводя к самоочищению поверхности металла. Таким образом, минимальная адгезия к металлическим конструкциям позволит предотвратить последствия обледенения, обеспечит их очистку и позволит снизить вероятность эксплуатационных проблем на железной дороге.

## **Заключение**

Предложен принцип формирования антиобледенительного покрытия для металлов и сплавов золь-гель методом за счет придания поверхности супергидрофобных свойств. Сформированное покрытие отличается особым иерархически организованным рельефом поверхности. Перспективными прекурсорами для получения супергидрофобных покрытий методами золь-гель технологии являются кремнийорганические бифункциональные мономеры с концевыми фторидными группами и гидрофобизированный наноразмерный кремнезем, обеспечивающий субмикронную шероховатость поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОХНМ РАН № 2 «Инновационные разработки металлических, керамических, стекло-, композиционных и полимерных материалов». Проект «Разработка новых наноструктурных композиционных материалов и функциональных покрытий для инновационного метода снижения потерь метана и увеличения ресурса работы эксплуатационного оборудования».

## **Библиографический список**

1. Шилова О. А. Золь-гель синтез и гидрофобные свойства антифрикционных покрытий для использования в высокооборотных минитурбогенераторах / О. А. Шилова, О. И. Проскурина, В. Н. Антипов, Т. В. Хамова, Н. Е. Есипова, К. Э. Пугачев, Е. Ю. Ладилина, И. Ю. Кручинина // Физика и химия стекла, 2014. – Т. 40. – № 3. – С. 419–425.
2. Ладилина Е. Ю. Фторсодержащие диалкоксисиланы. Образование комплексов с аминопропилтриэтоксисиланом и получение прозрачных

пленок / Е. Ю. Ладилина, Т. С. Любова, В. В. Семенов, Ю. А. Курский, О. В. Кузнецова // Изв. АН. Сер. хим., 2009. – № 5. – С. 990–997.

3. Бойнович Л. Б. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л. Б. Бойнович, А. М. Емельяненко // Успехи химии, 2008. – Т. 77. – № 7. – С. 619–638.

4. R. V. Lakshmi, T. Bharathidasan / Fabrication of superhydrophobic and oleophobic sol–gel nanocomposite coating // Surface & Coatings Technology, 2011. – No 24. – V. 257. – P.7.

5. M. Nosonovsky, B. Bhushan /Superhydrophobic Surfaces and Emerging Applications: Nonadhesion, Energy, Green Engineering // Current Opinions Coll. Interface Sci, 2009. – No 14. – P. 270–280.

6. Shirtcliffe N. J., McHale G., Newton M. I., Perry C. C. / Intrinsically Superhydrophobic Organosilica Sol-Gel Foams // Langmuir, 2003. – V 19. – No 14. – P. 5626–5631.

7. Venkateswara Rao A., Latthe S.S., Nadargi D.Y., Hirashima H., Ganesan V. / Preparation of MTMS based transparent superhydrophobic silica films by sol-gel method // J. Colloid Interf. Sci, 200. –V. 332. – No 2. – P. 484–490

8. Хамова Т. В. Золь-гель синтез и исследование гидрофобности покрытий, полученных с использованием модифицированных аэросилов / Т. В Хамова, О. А. Шилова, Л. Н. Красильникова, Е. Ю. Ладилина, Т. С. Любова, М. А Батенькин, И. Ю. Кручинина // Физика и химия стекла, 2016. – Т. 42. – № 1 (в печати).

9. A. A. Thorpe, J. R. Smith, V. Peters / Poly (methylpropenoxyfluoroalkylsiloxane)s: a class of fluoropolymers capable of inhibiting bacterial adhesion onto surfaces // J. Fluor. Chem, 2000. – No 104. – P. 37–45.

10. Кожухова М. И. Комплексное силоксановое покрытие для гидрофобизации бетонных поверхностей / М. И. Кожухова, И. Флорес-Вивиан, С. Рао, В. В., Строкова, К. Г. Соболев // Строительные материалы, 2014. – № 3. – С. 26–30.

## References

1. Shilova O. A., Proskurina O. I., Antipov V. N., Hamova T. V., Yesipova N. E., Pugachev K. E., Ladilina E. Yu., Kruchinina I. Yu. *Fizika i himiya stekla – Glass Physics and Chemistry*, Saint Petersburg, 2014. vol. 40, no. 3. pp. 419–425.

2. Ladilina E. Yu., Lyubov T. S., Semyonov V. V., Kursky Yu. A., Kuznetsova O. V. *Izvestiya Akademii Nauk Seriya himicheskaya – Russian Chemistry Bulletin*, Moscow, 2009, no. 5, pp. 990–997.

3. Boynovich L. B., Emelyanenko A. M. *Uspekhi himii – Achievements of Chemistry*, Moscow, 2008, vol. 77, no. 7, pp. 619–638.
4. Lakshmi R. V., Bharathidasan T. *Surface & Coatings Technology*, Netherlands, 2011, no. 24, vol. 257, p. 7.
5. Nosonovsky M., Bhushan B. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, no. 14, pp. 270–280.
6. Shirtcliffe N. J., Mchale G., Newton M. I., Perry C. C. *Langmuir*, 2003, vol. 19, no. 14, pp. 5626–5631.
7. Venkateswara Rao A., Latthe S. S., Nadargi D. Y., Hirashima H., Ganesan V. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2000, vol. 332, no. 2, pp. 484–490.
8. Hamova T. V., Shilova O. A., Krasilnikova L. N., Ladilin E. Yu., Lyubova T. S., Batenkin M. A., Kruchinina I. Yu. *Fizika i himiya stekla – Glass Phys. Chemistry*, 2016, vol. 42, no.1 (in press).
9. Thorpe A. A., Smith J. R., Peters V. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2000, no. 104, pp. 37–45.
10. Kozhukhova M. I., Flores-Vivian I., Rao S., Strokova V. V., Sobolev K. G. *Stroitel'nye materialy – Construction Materials*, 2014, no. 3. pp. 26–30.

**Сведения об авторах:**

КРУЧИНИНА Ирина Юрьевна, д. т. н., заместитель директора по научной работе ИХС РАН, E-mail: [ikruch@isc.nw.ru](mailto:ikruch@isc.nw.ru)

ШИЛОВА Ольга Алексеевна, д. х. н., профессор, заведующая лабораторией ИХС РАН, E-mail: [olgashilova@bk.ru](mailto:olgashilova@bk.ru)

ЦВЕТКОВА Ирина Николаевна, к. х. н., н. с., ИХС РАН, E-mail: [its1@mail.ru](mailto:its1@mail.ru)

КРАСИЛЬНИКОВА Лариса Николаевна, н. с., ИХС РАН, E-mail: [its1@mail.ru](mailto:its1@mail.ru)

ЛАДИЛИНА Елена Юрьевна, к. х. н., ИМХ РАН, с. н. с., E-mail: [eladilina@gmail.com](mailto:eladilina@gmail.com)

ЛЮБОВА Татьяна Сергеевна, ИМХ РАН, м. н. с., E-mail: [lyubovat@rambler.ru](mailto:lyubovat@rambler.ru)

**Information about authors:**

KRUCHININA Irina, Ph. D., IHS RAS, Deputy. Director for Science, E-mail: [ikruch@isc.nw.ru](mailto:ikruch@isc.nw.ru)

SHILOVA Olga, D. Sc., Professor, Head. lab. IHS RAS, E-mail: [olgashilova@bk.ru](mailto:olgashilova@bk.ru)

Irina TSVETKOVA, Ph. D., NS, IHS RAS, E-mail: [its1@mail.ru](mailto:its1@mail.ru)

KRASIL'NIKOVA Larisa, NS, IHS, RAS, E-mail: [its1@mail.ru](mailto:its1@mail.ru)

LADILINA Elena, Ph. D., IMW of Sciences, Senior Researcher, E-mail: [eladilina@gmail.com](mailto:eladilina@gmail.com)

LYUBOVA Tatyana S., IMW of Sciences, junior researcher, E-mail: [lyubovat@rambler.ru](mailto:lyubovat@rambler.ru)

---

© Шилова О. А., Цветкова И. Н., Красильникова Л. Н., 2015

© Ладилина Е. Ю., Любова Т. С., Кручинина И. Ю., 2015

## Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 629.4.023.14

Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков

Уральский государственный университет путей сообщения

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО СТОЛКНОВЕНИЯ ПОЕЗДА НА МАГНИТНОЙ ПОДУШКЕ С ПРЕПЯТСТВИЕМ

Дата поступления 18.07.2015

Решение о публикации 01.08.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** В течение последних десятилетий большое внимание было сосредоточено на повышении пассивной безопасности автомобильных, авиационных, железнодорожных и судостроительных транспортных средств за счет разработки специальных устройств поглощения энергии (УПЭ). Принцип действия таких устройств заключается в поглощении кинетической энергии соударения с препятствием путем контролируемой необратимой деформации собственной конструкции [1]. В статье предлагается внедрить данные устройства системы пассивной безопасности и провести оценку их эффективности. Решение такой задачи осуществлялось посредством разработанной авторами методики численного моделирования аварийного столкновения подвижного состава с препятствием [2–4]. В статье представлен проект аварийной крэш-системы пассажирского поезда на магнитной подушке. Она состоит из торцевого и подвагонного крэш-модулей. Первый устанавливается на торцевую часть головного вагона поезда для поглощения энергии столкновения с крупным препятствием в случае аварии. Второй предназначен для снижения последствий столкновения с препятствиями относительно малых размеров, способных пробить пол или повредить подвагонное оборудование при высокой скорости движения. Различные виды конструкций и материалов изготовления УПЭ были теоретически исследованы с применением разработанной модели аварийного столкновения. В результате была произведена оценка работоспособности спроектированной аварийной крэш-системы в соответствии с существующими нормативными требованиями по безопасности движения.

**Ключевые слова:** аварийное столкновение; устройства поглощения энергии; метод конечных элементов; поезд на магнитной подушке.

**Eldar M. Ryazanov, Alexander Ed. Pavlyukov**

Ural State University of Railway Transport

## **SIMULATION OF EMERGENCY COLLISION OF A MAGNETIC LEVITATION TRAIN WITH AN OBSTACLE**

**Abstract:** In the last decades much attention has been focused on improving the passive safety of automobile, aviation, railway and shipbuilding vehicles by means of development of special energy-absorbing devices (EAD). The operation principle of such devices is to absorb the kinetic energy of the collision with the obstacle by means of the controlled irreversible deformation of its own design [1]. The article proposes to implement these devices and passive safety systems to assess their effectiveness. The solution of this issue was carried out by the authors' methods of numerical simulation of emergency collision of a rolling stock with an obstacle [2–4]. The article demonstrates the simulated emergency crash system of the passenger magnetic levitation train. It consists of a front and undercar crash-modules. The first is mounted on the end part of the head car of the train to absorb the collision energy with a large obstacle in case of an accident. The second is designed to reduce the consequences of collisions with obstacles of relatively small sizes, able to break the floor or damage undercar equipment at high speed. Various designs and materials used for manufacturing of EAD were theoretically investigated using the developed model of emergency collision. In the result the assessment of work effectiveness of the designed emergency crash-system in accordance with the existing regulatory requirements for traffic safety was carried out.

**Keywords:** emergency collision; energy-absorbing devices; finite element method; magnetic levitation train.

### **Введение**

Магнитолевитационный транспорт является одним из наиболее безопасных видов транспорта в мире. В отличие от железнодорожного подвижного состава, поезд на магнитной подушке фактически не может сойти с направляющих рельсов, благодаря левитации и конструкции тележки, расположенной по периметру путевой структуры. Тем не менее аварийные столкновения представляют серьезную угрозу для пассажиров и персонала любого транспортного средства. Они могут возникать вследствие нарушения правил движения, внезапных отказов и явлений непреодолимой силы. Так, 22 сентября 2006 года на севере Германии поезд «Трансрапид» на магнитной подушке, совершавший экспериментальный пробег, столкнулся с ремонтной платформой по обслуживанию пути на скорости свыше 200 км/ч [5]. После почти годичного расследования было выявлено, что причиной аварии послужил человеческий фактор. Авария, повлекшая за собой гибель 21 человека и ранение еще 10, послужила фактором, значительно уменьшающим вероятность коммерческого успеха проекта.

Совокупность устройств и технических решений в конструкции железнодорожного подвижного состава, называемая системой пассивной безопасности, может обеспечить снижение рисков нанесения ущерба здо-

ровью для пассажиров и персонала поезда в случае аварийного столкновения. К этой системе относят аварийную крэш-систему, которая в случае столкновения подвижного состава с препятствием уменьшает ускорение объектов столкновения за счет поглощения кинетической энергии путем контролируемой необратимой деформации УПЭ, входящих в ее состав.

В статье представлена спроектированная авторами аварийная крэш-система магнитолевитационного поезда и проанализирована эффективность данной системы при аварийном столкновении с использованием разработанной методики моделирования аварийного столкновения подвижного состава с препятствием.

## 1. Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран условный пассажирский поезд на магнитной подушке. Конструкция остова кузова головного вагона поезда, представлена на рис. 1. Она состоит из алюминиевых прессованных профилей, а также алюминиевых пластин, которые образуют конструктивные узлы: нижнюю раму, боковую и торцевую стенки и крышу. Продольные несущие балки и боковые стенки проходят до передних боковых стоек кузова, расположенных рядом с кабиной машиниста. К нижней раме кузова крепятся несущие части тележек, аналогичные тележкам поезда «Трансрапид».

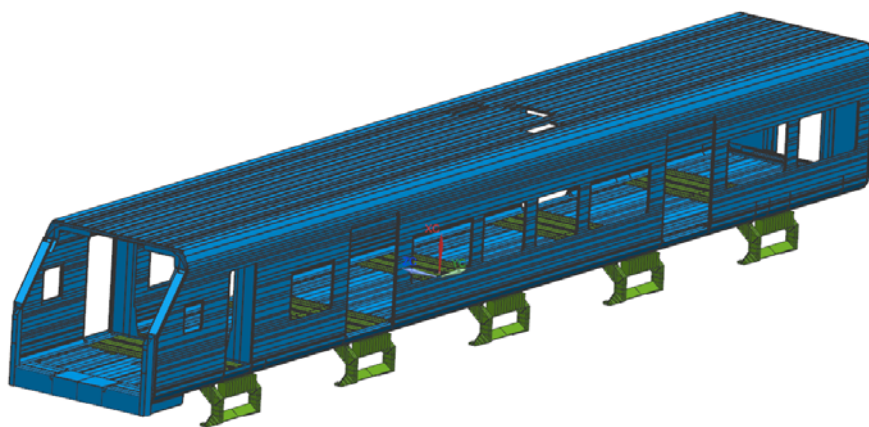


Рис. 1. Модель остова кузова и тележек поезда на магнитной подушке

Столкновение поезда на магнитной подушке с другим крупногабаритным объектом, например, деревом, крупным животным или другим транспортным средством придется на торцевую часть головного вагона. Негативные последствия такого столкновения способен уменьшить крэш-модуль, установленный на передние стойки остова кузова, как показано на рис. 2-а. В статье рассмотрено два варианта исполнения крэш-модуля: пер-

вый, состоящий из исключительно тонкостенной стальной конструкции (рис. 2-б), а второй – с добавлением ячеистой структуры (рис. 2-в). Конструкция УПЭ состоит из корпуса 1, переднего блока 2, воспринимающего на начальном этапе нагрузку аварийного столкновения, диафрагм 3, обеспечивающих стабильное деформирование крэш-модуля и ячеистых структур 4, повышающих энергоемкость устройства.

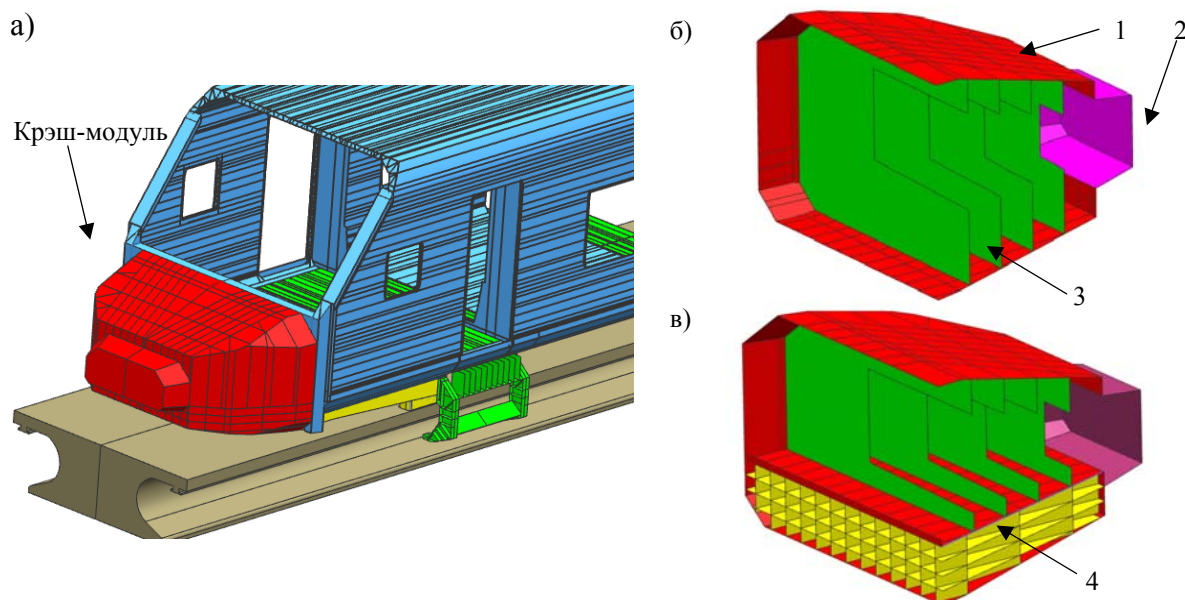


Рис. 2. Торцевой крэш-модуль:

*а* – расположение в вагоне; *б* – первое исполнение; *в* – второе исполнение

*1* – корпус; *2* – передний блок; *3* – диафрагмы; *4* – ячеистая структура

На данный момент требования к подобным устройствам на магнитолевитационном транспорте не нормированы, поэтому оценка работоспособности торцевого крэш-модуля производилась по европейскому стандарту EN 15227:2008 [6], содержащему требования к пассивной безопасности железнодорожного транспорта. В данных нормативных требованиях ограничиваются значения ускорений единиц подвижного состава, которые не должны превышать  $7,5\text{ g}$  ( $\text{g}$  – ускорение свободного падения), и величины деформации кузовов вагонов. Оценка выполнения заданных требований аварийной крэш-системы выполняется по определенному расчетному случаю аварийного столкновения. В статье за основу выбран случай столкновения, аналогичный столкновению подвижного состава с грузовым вагоном массой 80 т. В сравнении со сценарием, установленным стандартом EN 15227:2008, взятый за основу аварийный случай имеет следующие отличия: скорость подвижного состава на момент столкновения имеет значение не 36 км/ч, а 110 км/ч, препятствие не имеет буферов и не может деформироваться при ударе.

Если объекты столкновения по размеру малые, но имеют значительный вес, например камни, то они могут проникнуть через зазор между транспорт-

ным средством и путевой структурой и при высокой скорости движения могут пробить пол или повредить подвагонное оборудование. Для такого случая предлагается использовать крэш-модуль, расположенный под вагоном, как показано на рис. 3-а. Разработанный крэш-модуль аналогичен УПЭ, установленному в поезде «Трансрапид» [7]; он состоит из корпуса (1), выполненного из алюминиевых листов, путеочистителя (2) и энергопоглощающего материала (3). В отличие от типового крэш-модуля, используемого в подвижном составе поезда «Трансрапид», энергопоглощающий материал выполнен не из алюминиевой сотовой конструкции, а из вспененного алюминия. Такой материал обладает высокой удельной прочностью и эффективно поглощает энергию удара.

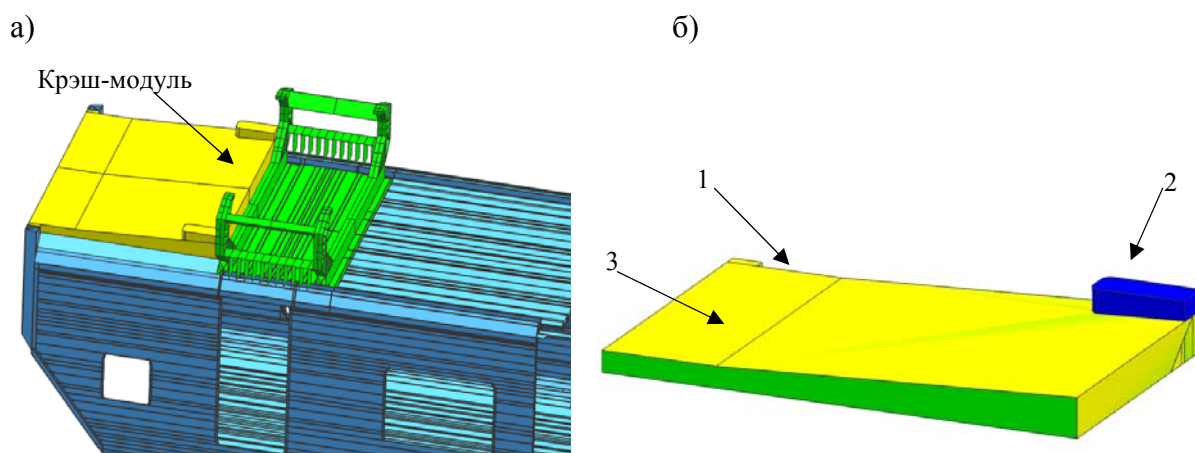


Рис. 3. Подвагонный крэш-модуль:

*а* – расположение в вагоне; *б* – составные элементы

*1* – корпус; *2* – путеочиститель; *3* – энергопоглощающий материал

Технические требования по безопасности поезда на магнитной подушке при столкновении с малогабаритными объектами определяются нормами безопасности высокоскоростных магнитолевитационных поездов [8] и приведены ниже:

- максимальные средние ускорения в салоне вагона при скорости движения 500 км/ч не должны превышать  $15 \text{ м/с}^2$ ;
- не допускается отцепление каких-либо компонентов оборудования поезда при столкновении;
- не допускается отрыв магнитов от конструкции транспортного средства;
- не допускается повреждение кабельных каналов, способных привести к нарушению функций безопасности магнитолевитационного транспортного средства;
- деформации при соударении должны быть ограничены головной частью транспортного средства;

– после столкновения магнитолевитационного поезда он должен доставить людей до ближайшей станции и направиться в сервисный центр для осмотра, ремонта или замены поврежденных компонентов.

В качестве расчетного сценария столкновения в статье был использован аварийный случай, применяемый разработчиками поезда «Трансрапид» при проектировании аварийной крэш-системы. Этот сценарий подразумевает столкновение транспортного средства со сферическим объектом массой 50 кг на скорости 500 км/ч.

## **2. Модель аварийного столкновения поезда на магнитной подушке с препятствием**

Моделирование аварийного соударения подвижного состава является задачей динамического нелинейного процесса ударно-контактного взаимодействия. Решение такой задачи осуществлялось при помощи метода конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени в программном комплексе LS-DYNA [9].

Для решения трехмерной нестационарной задачи необходимы пространственная и временная дискретизации. Временная дискретизация выполняется центральным разностным методом. Петля интегрирования по времени дифференциальных уравнений включает следующие операции: вычисление узловых нагрузок, ускорений, скоростей, приращений перемещений, деформаций в элементах и напряжений в элементах.

Пространственная дискретизация модели реализуется методом конечных элементов. Конечно-элементная модель транспортного средства строилась в сетке Лагранжа. В табл. 1 представлены типы конечных элементов, количество и применение в модели. На рис. 4 представлена конечно-элементная модель при моделировании сценария столкновения магнитолевитационного транспортного средства с крупногабаритным препятствием.

**Таблица 1. Параметры конечно-элементной модели**

| Тип элемента                                | Применение элемента                                                           | Число элементов |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Оболочка типа Shell                         | Кузов вагона; крэш-модуль; тележки, путь                                      | 183357          |
| Объемный элемент типа Solid                 | Энергопоглощающий материал из пеноалюминия                                    | 41958           |
| Точечный элемент сосредоточенной массы Mass | Добавочная масса недостающих вагонов состава; масса оборудования и пассажиров | 164             |

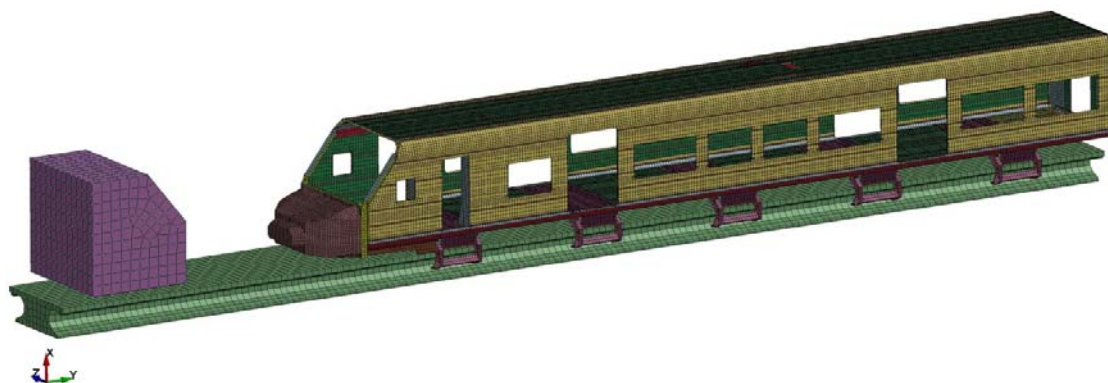


Рис. 4. Конечно-элементная модель магнитолевитационного транспортного средства

При постановке задачи задавались начальные условия в соответствии с расчетными сценариями; предполагается, что материал поезда в начальный момент не деформирован, все узлы поезда движутся с одинаковой скоростью в одном направлении, а узлы препятствия находятся в покое. В сценарии столкновения с крупногабаритным объектом препятствие имеет только одну степень свободы – вдоль направления движения. Кроме того, задавались ограничения на поверхностях несущей конструкции тележек в зоне предполагаемого расположения магнитов.

На взаимодействующих поверхностях модели задавались условия контакта: граничные условия на поверхностях накладывают ограничения на скорость движения и напряженное состояние контактных точек. Для реализации данного условия в программе LS-DYNA был использован специальный контактный алгоритм, который автоматически определяет контактные поверхности.

Модели материалов препятствия и пути задавались как абсолютно жесткие. Поведение материалов остова кузова, тележек и торцевого крэш-модуля определялось по теории пластического течения, в которой предполагается, что приращения деформаций складываются из упругих и пластических составляющих. Наступление стадии пластичности материала осуществлялось при условии, что эквивалентные напряжения превышают динамический предел текучести. Энергопоглощающий материал из пеноалюминия моделировался физической моделью Дешпанде-Флека (Deshpande-Fleck) [10]. Модель идентифицировалась в соответствии со свойствами материала пеноалюминия марки FOAMI-NAL с плотностью  $450 \text{ кг/м}^3$ . Параметры модели были определены эмпирическим способом в статье [11].

### 3. Результаты моделирования

Результаты моделирования аварийных столкновений выявили величины необратимых деформаций, возникающих в головном вагоне поезда на магнитной подушке, и значения средних ускорений внутри салона.

На рис. 5 и 6 представлены разрушения вагона при моделировании сценария столкновения с крупногабаритным препятствием. Анализ величин необратимых деформаций показал, что применение крэш-модуля первого исполнения является недостаточным для обеспечения безопасности пассажиров и поездной бригады. Так, их величина превышает допустимые значения, регламентируемые европейским стандартом EN 15227:2008, в то время как применение крэш-модуля с ячеистой структурой обеспечивает допустимые величины деформаций кузова вагона. Энергоемкость крэш-модуля первого исполнения составила 4,5 МДж, а второго – 8,2 МДж.



Рис. 5. Разрушения модели поезда при использовании крэш-модуля первого исполнения

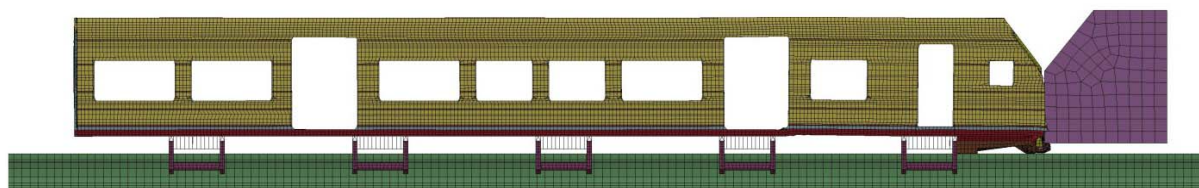


Рис. 6. Разрушения модели поезда при использовании крэш-модуля второго исполнения

На рис. 7 и 8 представлено изменение скорости движения поезда и препятствия в процессе столкновения для разных исполнений крэш-модуля. По этим диаграммам были определены величины перегрузок внутри салона. Оказалось, что при использовании крэш-модуля первого исполнения ускорения внутри салона равны 3,7 g, при этом средние ускорения внутри салона для крэш-модуля с ячеистой структурой оказались равны 5,3 g, что несколько выше показателей первого случая. Это можно объяснить увеличением жесткости крэш-модуля с ячеистой структурой, в результате чего большее количество энергии удара, не погашенной за счет пластического деформирования, передается в салон кузова в виде ускорений. Тем не менее оба варианта исполнения удовлетворяют требованиям по допустимым ускорениям нормативных документов.

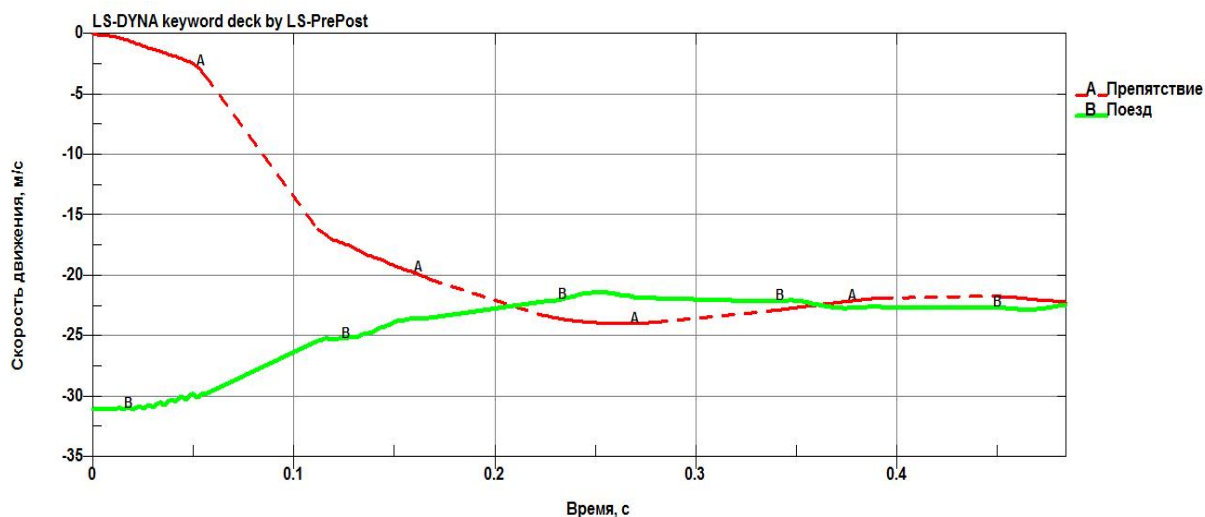


Рис. 7. Диаграмма изменения скорости движения поезда и препятствия для первого исполнения крэш-модуля

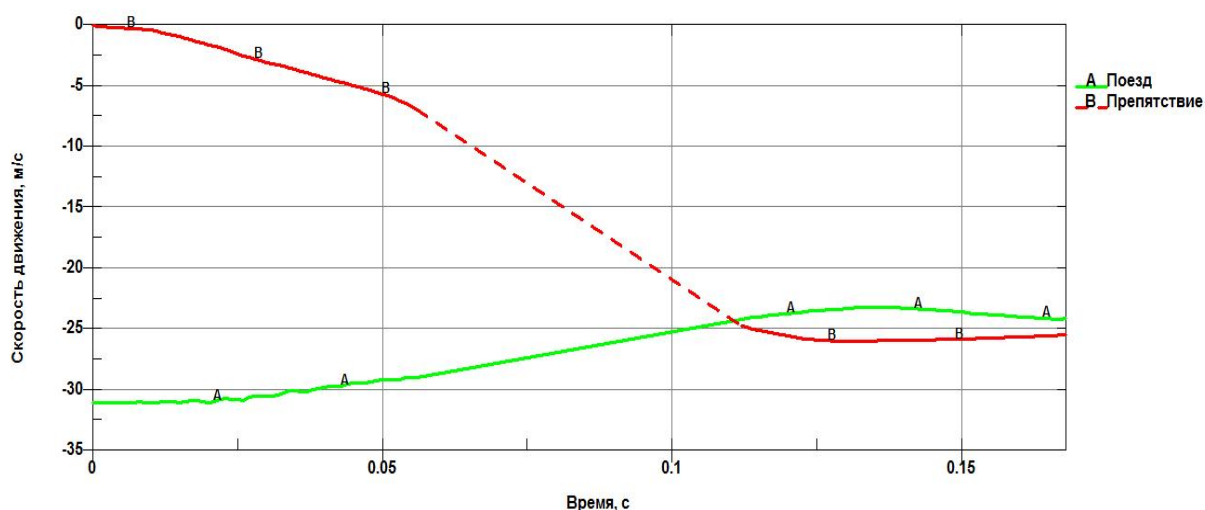


Рис. 8. Диаграмма изменения скорости движения поезда и препятствия для второго исполнения крэш-модуля

На рис. 9 представлено разрушение подвагонного крэш-модуля при попадании на путь малогабаритного предмета. Анализ повреждений показал, что остов кузова при таком столкновении остается неповрежденным. По диаграмме изменения скорости движения поезда и препятствия, представленной на рис. 10, видно, что через 0,05 с после столкновения, скорость движения препятствия сравняется со скоростью поезда, при этом скорость движения поезда практически не изменилась.

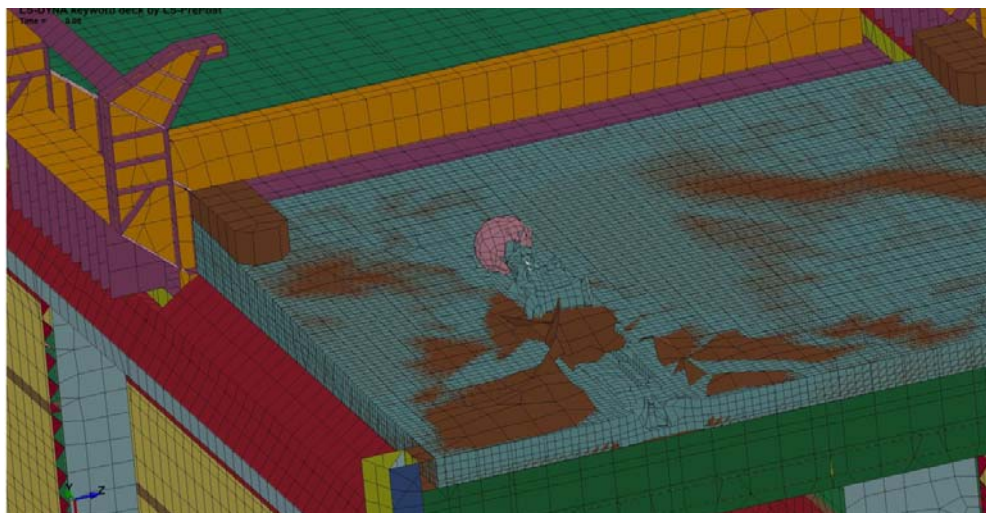


Рис. 9. Разрушение подвагонного крэш-модуля

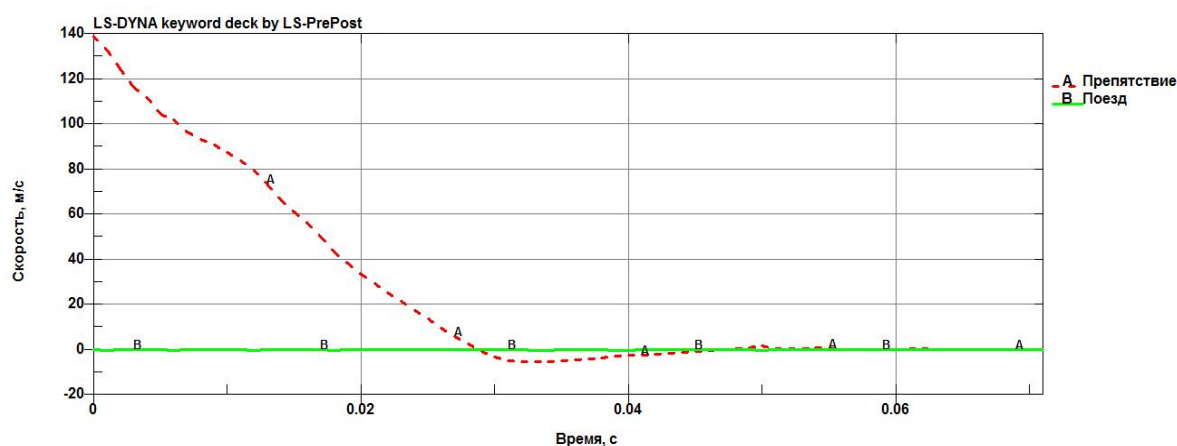


Рис. 10. Диаграмма изменения скорости движения поезда и препятствия

## Заключение

Применение разработанной методики численного моделирования аварийного столкновения подвижного состава с препятствием позволило учесть:

- пространственный характер нагрузки с возможностью оценки напряженного состояния;
- геометрию и конструктивные особенности объекта исследования;
- упруго-пластическую физическую модель металлических конструкций;
- физическую модель Дешпанде-Флека для пенометаллов.

Благодаря перечисленным выше особенностям компьютерная модель позволила определить уровень необратимых деформаций при аварийном

столкновении, энергоемкость УПЭ и диаграмму изменения скорости движения поезда на магнитной подушке в процессе аварийного столкновения.

По результатам моделирования аварийного столкновения подвижного состава с крупногабаритным препятствием было выявлено, что применение ячеистой структуры в конструкции крэш-модуля увеличивает энергоемкость крэш-модуля на 82 %, и в результате предотвращает значительные деформации в остова кузова. Однако увеличение жесткости УПЭ повышает значение продольных ускорений внутри салона и может привести к нежелательным результатам.

Результаты моделирования аварийного столкновения подвижного состава с малогабаритным препятствием подтвердили эффективность применения вспененного алюминия в качестве энергопоглощающего материала для подвагонного крэш-модуля.

### **Библиографический список**

1. ГОСТ 32410–2013 «Крэш-системы аварийные железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. Технические требования и методы контроля»; Москва : Стандартинформ 2013 – 26 с.

2. Рязанов Э. М. Моделирование работоспособности крэш-системы электропоезда при аварийных столкновениях / Э. М. Рязанов, М. В. Жуйков, А. Э. Павлюков // Транспорт Урала, 2014. – № 4 (43). – С. 44–49.

3. Рязанов Э. М. Применение устройств поглощения энергии в сцепных устройствах для обеспечения пассивной безопасности электропоездов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2014. – № 4. – С. 97–100.

4. Рязанов Э. М. Применение комплекса LS-DYNA для анализа нелинейных динамических процессов в железнодорожном подвижном составе при нештатных ситуациях / Э. М. Рязанов, А. Э. Павлюков // Международное научное объединение «Prospero», 2015. – № 1. – С. 50–54.

5. Крушение поезда потрясло Германию [Электронный ресурс] // BBC Русская служба. URL: [http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid\\_5372000/5372978.stm](http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid_5372000/5372978.stm) (дата обращения 05.06.2015).

6. Standard EN 15227:2008 Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies; Brussels 2010. – 38 p.

7. Liu X. et al. Crash Safety System of the Maglev Vehicle // MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. – 2006.

8. High speed maglev Trains: German safety requirements, report No. Dot/FRA/ORD-92/01, Translation of: Magnetschnellbahn, sicherheitstechnische Anforderungen (RW MSB). TÜV Rheinland, Köln, Ausgabe 1, März 1991.

9. LSTC. «LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1». Livermore Software Technology Corporation (LSTC) 2009 – 1384 p.

10. Deshpande V. S., Fleck N. A. Isotropic constitutive models for metallic foams //Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2000. – T. 48. – № 6. – P. 1253–1283.

11. Hanssen A. G. et al. Optimisation of energy absorption of an A-pillar by metal foam insert //International Journal of Crashworthiness. – 2006. – T. 11. – № 3. – P. 231–242.

## References

1. GOST 32410-2013 Krehsh-sistemy avarijnye zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava dlya passazhirskih perevozok. Tekhnicheskie trebovaniya i metody kontrolya [GOST 32410–2013. Emergency crash system of railway rolling stock for passenger transport. Technical requirements and control methods]. Moscow, Standartinform, 2013. 26 p.

2. Ryazanov E. M., Zhuykov M. V., Pavlyukov A. E. *Transport Urala – Transport Urala*, 2014, no. 4 (43), pp. 44–49.

3. Ryazanov E. M. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego vostoka – Scientific problems of transport Siberia and Far East*, 2014, no. 4, pp. 97–100.

4. Ryazanov E. M., Pavlyukov A. E. *Mezhdunarodnoe nauchnoe obedinenie “Prospero” – International Scientific Association “Prospero”*, 2015, no.1, pp. 50-54.

5. *BBC Russkaya sluzhba* (BBC Russian service). URL: [http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid\\_5372000/5372978.stm\(05/06/2015\)](http://news.bbc.co.uk/hi/russian/international/newsid_5372000/5372978.stm(05/06/2015)).

6. Standard EN 15227:2008 Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies. Brussels, 2010. 38 p.

7. Liu X. Crash Safety System of the Maglev Vehicle. The 19th Int. Conf. on “Magnetically Levitated Systems and Linear Drives”, 2006.

8. *German safety requirements, report no. Dot/FRA/ORD-92/01, Magnetschnellbahn, sicherheitstechnische Anforderungen (RW MSB). TÜV Rheinland, Köln, Ausgabe 01/03/1991*[German safety requirements, Report no. Dot / FRA / ORD-92/01, maglev, safety requirements (RW MSB). TÜV Rheinland, Cologne, Issue 01/03/1991].

9. LSTC. "LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume 1". Livermore Software Technology Corporation (LSTC) 2009. 1384 p.

10. Deshpande V. S., Fleck N. A. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, vol. 48, no. 6, pp. 1253–1283.

11. Hanssen A. G. *Int. Journal of Crashworthiness*, 2006, vol. 11, no. 3, pp. 231–242.

**Сведения об авторах:**

Эльдар Михайлович РЯЗАНОВ, аспирант Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, E-mail: emryazanov@yandex.ru

Александр Эдуардович ПАВЛЮКОВ, д-р техн. наук; профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, E-mail: apavlukov@usurt.ru

**Information about authors:**

Eldar M. RYAZANOV, graduate student, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, E-mail: emryazanov@yandex.ru

Alexander Ed. PAVLYUKOV, DSc in Engineering, Professor, Department of Railway Cars, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, E-mail: apavlukov@usurt.ru

УДК 53.083

**В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян**

Московский государственный индустриальный университет

## **ВОПРОСЫ АППАРАТУРНОЙ БЕССБОЙНОСТИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Дата поступления 30.07.2015

Решение о публикации 01.08.2015

Дата публикации 21.10.2015

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы построения бессбойной электронной аппаратуры на основе обнаружения и регистрации скрытых дефектов как предвестников сбоев. Предложены методы применения оригинальных контактных и бесконтактных датчиков сбоев. Приведены результаты экспериментальных исследований предложенных методов и средств.

**Ключевые слова:** предвестники сбоев, сбои, скрытые дефекты, бесконтактные и контактные датчики сбоев, аппаратурная бессбойность.

**V. N. Dianov, T. A. Gevondyan**

Moscow state industrial University

## **QUESTIONS HARDWARE BASSBOOST MAGNETO-LEVITATION VEHICLES**

**Abstract:** One of the hallmarks of the magneto-levitation transport are a big, life cycle and safety. The concept of security and life-cycle are important parameters: the probability of failure, failure rate, reliability, time to return to a safe status. Improving the reliability and security of modern rolling stock is possible through the improvement of railway automatics and telemechanics. Operated system monitoring and diagnostics of rolling stock consisting of a complex stationary, airborne and mobile systems, solve the problems of the prevention of failures and accelerated deterioration, maintain the technical characteristics of the equipment at a predetermined level and providing an assigned resource. The transition to a more technically complex objects – magneto-levitation vehicles – requires additional development funds to improve reliability, including the detection and diagnosis of failure States and conditions of intermittent failures – failures. The reliability of the control and diagnostic systems have many times exceed the reliability of the rolling equipment and perform the following main functions:

- settings of sensors and measurement channels the parameters for a specific object;
- identification of the elements of the object, registration of extreme deviations, their localization and signaling of limit deviations of parameters;
- formation of a database state changes of elements, determination of residual life of components and of the facility as a whole.

**Keywords:** precursors of failures, failures, latent defects, non-contact and contact sensors failures, hardware bassboost.

## **Введение**

Как известно, одними из отличительных черт магнитолевитационного транспорта являются большой «жизненный цикл» и безопасность [1]. В понятие безопасности и «жизненного цикла» как категории надежности входят такие важные параметры, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, безотказность, время возврата к безопасному состоянию. Повышение надежности и безопасности функционирования современного подвижного состава возможно благодаря совершенствованию средств железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Внедренные в эксплуатацию системы контроля и диагностики подвижного состава, состоящие из комплекса стационарных, бортовых и мобильных комплексов, решают задачи предупреждения отказов и ускоренного износа, поддержания технических характеристик оборудования на заданном уровне и обеспечения назначенного ресурса. Переход к технически более сложным объектам – магнитолевитационным транспортным средствам [2] – потребует, на наш взгляд, дополнительной разработки средств повышения безотказности, в том числе обнаружения и диагностики предотказных состояний и состояний перемежающихся отказов – сбоев. Надежность контрольно-диагностических систем должна многократно превосходить надежность оборудования подвижного состава и выполнять следующие основные функции:

- настройку датчиков и каналов измерений на параметры конкретного объекта;
- определение состояния элементов объекта, регистрацию предельных отклонений, их локализацию и сигнализацию о предельных отклонениях параметров;
- формирование баз данных изменения состояния элементов, определение остаточного ресурса элементов и объекта в целом.

### **1. Анализ существующих методов диагностики электронной аппаратуры**

С учетом современных тенденций развития контрольно-диагностические системы разделяют по выполнению производственно-технических, технологических, программно-аппаратных функций и по принципам измерения параметров. Наиболее сложными и информативными являются встроенные средства диагностики, подключаемые к действующим агрегатам для контроля состояния подвижного состава. Они обеспечивают предрейсовый и оперативный контроль состояния агрегатов с отображением информации и предупреждением о предельных режимах в эксплуатации, регистрацию отклонений параметров; обнаружение и регистрацию отказов, выдачу рекомендаций по оперативному выходу из аварийной ситуации.

Одной из актуальных проблем при внедрении микропроцессорных и микроэлектронных систем ЖАТ является их защита от грозовых и коммутационных перенапряжений, а также от воздействия тягового электропривода, импульсных систем управления. Новые принципы и технологии создания помехозащитных систем должны удовлетворять требованиям международных стандартов, инвариантных в отношении низкого качества электроэнергии систем электроснабжения, внешних воздействий в результате грозовых и коммутационных перенапряжений. Разработки в области грозозащиты технических средств ЖАТ направлены на построение многокаскадных систем защиты, в частности для решения задач электромагнитной совместимости аппаратуры.

Важное место при эксплуатации аппаратуры приобретает системный анализ. Для сбора информации об отказах технических средств на основе данных графиков при эксплуатации разработана комплексная автоматизированная система учета, контроля, устранения отказов технических средств и анализа их надежности. В рамках дальнейшего повышения надежности и качества электронной аппаратуры (ЭА) предлагается диагностировать скрытые дефекты в ней, на основе этого выявлять сбои, являющиеся предвестниками отказов, и, тем самым, создавать предпосылки для построения бессбойной аппаратуры [3, 4].

Современная ЖАТ представляет собой сложный объект и содержит в своем составе совокупность различных вычислительных устройств (процессоров, ЭВМ), исполнительных механизмов (в первую очередь, электрических) по отработке команд вычислительных устройств, а также датчиков. Значительную часть современного оборудования (до 50 % и выше) составляет контрольно-диагностическое оборудование (различные аппаратно-программные средства, в том числе и встраиваемые в рабочую аппаратуру), обеспечивающее отказобезопасность [5].

## **2. Бессбойность – путь создания высоконадежной аппаратуры**

Диагностические технологии направлены на своевременное распознавание предаварийных ситуаций, недопущение опасного для техники и человека развития событий, что требует нового уровня интеллектуальных средств контроля и диагностики с использованием встроенных процессоров, персональных и мини-ЭВМ, разработки большого ряда программ, алгоритмов тестового и функционального диагностирования.

Одной из характеристик надежности является безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени. В понятие безотказности входит и понятие сбоя как самоустранимого отказа (согласно ГОСТ Р 27.002-89. Надежность в технике. Основные поня-

тия. Термины и определения. – Введен 01.01.2011. – М., Технический комитет по стандартизации ТК 119 «Надежность в технике», 32 с.). Следовательно, проведение активной диагностики сбоев посредством регистрации их источников через фиксацию их промежуточного состояния («предсбоя») и различных информативных параметров позволяет вывести понятие сбоя в самостоятельную категорию – «бессбойность», то есть способность функционального узла продолжать выполнение требуемой функции в присутствии сбоев [6, 7]. Учитывая, что понятие «качество» оперирует с такими понятиями, как «явные дефекты» и «неявные дефекты», можно установить связь между сбоями и скрытыми дефектами [8].

Таким образом, существующие основные свойства надежности технических систем целесообразно дополнить новым свойством – «бессбойностью». Регистрируя параметры сбоев через показания датчиков сбоев и измерительные средства, получаем возможность устранять источники сбоев и, следовательно, влиять на параметры функционирования технической системы (рис. 1).

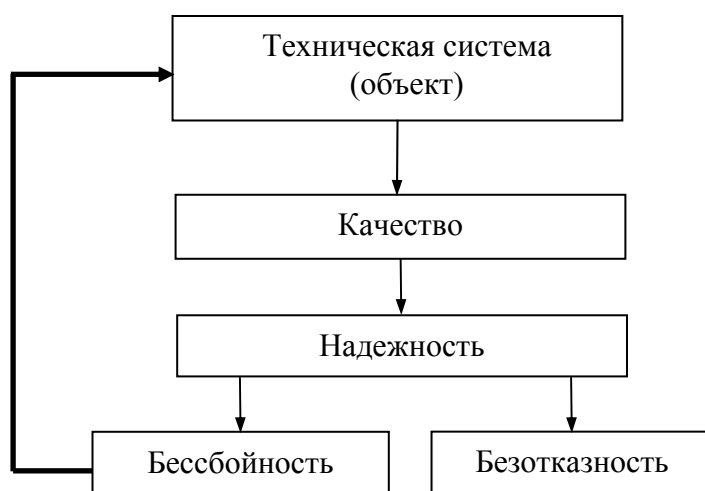


Рис. 1. Новое свойство технических систем – «бессбойность» и ее связь с существующей структурой (толстые линии)

Увеличение надежности технических систем возможно за счет обнаружения скрытых дефектов и электромагнитных помех посредством введения контактных и бесконтактных датчиков сбоев (КДС и БДС соответственно) и использования новых информативных признаков сбоев с соответствующей алгоритмической обработкой информации (сигналов). Основным источником скрытых дефектов в ЭА являются соединители и соединения, а предвестником отказов, например, в космической аппаратуре, – активные элементы в виде транзисторов, микросхем [9].

### 3. Соединители как основной источник скрытых дефектов

Для соединителей разных конструкций характерна сложность физических процессов, приводящих к источникам сбоев: загрязнения, вносимые при изготовлении; особенности поведения материалов, составляющих соединители; несвоевременная и неудовлетворительная чистка контактов; недостаточная защищенность от внешних воздействий.

Известны методы контроля соединителей, которые предполагают входной и эксплуатационный контроль по одному параметру соединителя – электрическому сопротивлению замкнутых и разомкнутых контактов или их совокупности. Общий недостаток этих видов контроля – функциональная ограниченность, не позволяющая проводить контроль соединителей, находящихся в предельных режимах, то есть на границе устойчивого работоспособного состояния. Вместе с тем необходимо отметить важность контроля по данному параметру, поскольку по мере того, как в результате совершенствования ЭА снижаются рабочие напряжения и токи, режим нормального функционирования ЭА становится все более критичным к сопротивлению электрического контакта соединителей. Отметим, что даже относительно небольшие изменения сопротивления могут быть причиной сбоев и отказов. Следует добавить, что причиной сбоев, вызывающих многочисленные ошибки в системе, могут быть и небольшие изменения сопротивления электрического соединения на всем пути следования сигналов. Дестабилизирующим и стабилизирующим факторами, влияющими на величину электрического сопротивления соединителей, являются разъедание поверхностей контактов соединителей и их смазка. При этом сопротивление электрического контакта соединителей зависит как от степени разъедания контактов, так и от тока, протекающего через них, а также от процедуры измерения сопротивления контакта. Эффект разъедания контактов в соединителях ЭА привлекает внимание по той причине, что золоченые контакты, препятствующие их разрушению, имеют высокую цену. Недостаток данных методов контроля заключается также и в том, что значительную погрешность при этом (особенно при непосредственном наблюдении процессов образования сбоев в аппаратуре) может вносить и сама измерительная аппаратура, например при установке печатной платы в качающийся соединитель.

К недостаткам методов измерения и контроля сопротивления контактов следует отнести и малый объем получаемой информации, недостаточный для определения статистической характеристики сопротивления, а также тот факт, что при контроле в статическом режиме сопротивление зависит от случайной точки покоя внутри точки (зоны) расчленения. Более глубоко природу и свойства сопротивления контактов можно изучить, измеряя быстро меняющиеся случайные его отклонения во время повторяющихся операций, поскольку сопротивление контактов зависит от динами-

ческих процессов, например от скачков напряжения и действия сил трения. Оборудование для такого вида контроля характеризуется быстроедействием порядка десяти наносекунд, что не всегда бывает достаточным для наблюдения явлений сбоя.

Контроль соединителей можно вести по другому параметру или одновременно по нескольким параметрам. Общим недостатком данных видов контроля является низкая достоверность из-за невозможности определения высокочастотных параметров соединителей.

Существуют способы контроля сбоев, возникающих в аппаратуре из-за скрытых дефектов в работе соединителей, позволяющие фиксировать сбои по вторичным признакам и выявлять их в блоках, электрически расположенных за соединителями. Общий недостаток таких способов заключается в невозможности установления причины сбоя или его местонахождения в устройствах, а также сложность аппаратной реализации.

Другие виды контроля соединителей заключаются в проверке их параметров в режимах короткого замыкания или холостого хода, то есть обрыва, что соответствует выключенному состоянию. Недостаток способов – низкая достоверность контроля, не позволяющая выявлять или прогнозировать наступление сбойных ситуаций, которые могут возникать на протяжении всего срока службы соединителей.

Задачу предотвращения сбоев в соединителях частично решают контроль контактного сопротивления при испытании контактов на износостойчивость, оценка качества механически скрепленных контактных соединений, а также способы приемки и испытаний.

Одним из важнейших параметров, характеризующих качество соединителей, является контактное нажатие  $F_k$ . В свою очередь, контактное нажатие для каждого соединителя является переменной величиной в течение всего его срока службы. Перечислим факторы, от которых зависит значение этого параметра:

1. Коэффициент  $c$ , учитывающий способ, чистоту обработки и состояние поверхности контактных элементов (для грубых поверхностей  $c = 3$ , для чистых –  $c = 1$ ).
2. НВ – число поверхностной твердости по Бринеллю.
3. Коэффициент  $b$ , зависящий от фактора деформации, вида и формы зоны контактирования (на практике  $b = 0,33 \dots 2,0$ ).
4.  $\rho$  – приведенное удельное сопротивление материалов, из которых выполнены контакты, причем  $\rho = \rho_1 + \rho_2$ , где  $\rho_1, \rho_2$  – удельные электрические сопротивления материалов контактов.
5.  $R_n$  – переходное сопротивление контакта.
6. Коэффициент  $k_1 = 1,5 \dots 3,0$ , учитывающий износ материала контактных пар (чем больше износ, тем больше  $k_1$ ).

7. Коэффициент  $k_2 = 1,1 \dots 1,3$ , характеризующий предельные отклонения размеров, назначаемые на детали конструкции соединителя (чем больше размеры контактных элементов и меньше их предельные отклонения, тем меньше  $k_2$ ).

8. Коэффициент  $k_3 = 1,2 \dots 1,3$ , учитывающий статическую и динамическую нестабильность переходного сопротивления  $R_n$  (чем больше указанная нестабильность, тем больше  $k_3$ ).

9. Коэффициент  $k_4 = 1,0 \dots 5,0$ , определяющий частоту тока, протекающего в коммутируемой электрической цепи (возрастает с ростом частоты).

10. Коэффициент  $k_5$ , учитывающий изменение жесткости материала контактных элементов от их рабочей температуры (чем больше изменение температуры, тем больше  $k_5$ ).

Из приведенного перечня факторов видно, что их число, во-первых, достаточно велико, а во-вторых, в силу разных причин они имеют достаточно большой разброс значений. На практике это приводит к тому, что отклонения контактного нажатия за пределы допусков являются причиной скрытых дефектов в соединителях, то есть дефектов, не обнаруживаемых при контроле известными методами. Из данного перечня также следует, что наиболее полным информативным параметром, определяющим качество соединителей, является контактное нажатие. Однако контроль по этому нажатию желателен, но трудно осуществим на практике.

Анализ существующих методов контроля соединителей позволяет сделать два принципиально важных вывода:

1. Контактные методы контроля имеют существенный недостаток, обусловленный влиянием многочисленных факторов на соединитель, снижающий достоверность его контроля в сбойном режиме.

2. Контроль сбойных режимов должен вестись по интегральным (обобщенным) информативным параметрам, то есть по параметрам, однозначно характеризующим состояние сбоя.

Проведенный ранее теоретический анализ поведения соединителей в режиме сбоя создает предпосылки для разработки методов бесконтактного и радиоизмерительного контроля и диагностики сбоев в электрических цепях ЭА [4, 5]. В этой связи необходимо отметить, что существующие методы бесконтактных измерений параметров не позволяют выявлять режимы сбоев соединителей и соединений по ряду причин. К ним относятся: низкая точность измерений вследствие промежуточных операций по усилению и преобразованию сигналов, невысокий порог чувствительности, не позволяющий проводить измерения параметров соединителя в промежуточном (между «включено» и «выключено») диапазоне изменений параметров, а также невысокая достоверность измерений из-за значительного влияния помех и, как следствие, невысокого отношения сигнал/шум. Полученные результаты позволяют, с другой стороны, предложить методы

измерений, свободные от указанных недостатков и основанные на следующих предпосылках. Во-первых, соединитель в режиме сбоя представляется в виде симметричного электрического вибратора или излучателя в области высоких и сверхвысоких частот. Во-вторых, данный соединитель должен возбуждаться генератором соответствующих частот. В-третьих, излучаемая мощность должна быть достаточной для надежного измерения и регистрации существующей измерительной базой.

#### 4. Экспериментальные исследования

Используя известное соотношение между длительностью фронта импульсного сигнала  $\tau_{\phi}$  и граничной частотой  $f_{гр}$  его амплитудного спектра  $\tau_{\phi} = 0,35 / f_{гр}$ , а также тот факт, что в современных элементах ЭА длительность импульсных фронтов составляет единицы наносекунд, получаем, что для моделирования процессов в указанных системах достаточно использовать генераторы высокочастотных колебаний в диапазоне частот до 300 МГц. Тогда, допуская существование зазора в соединителе в режиме сбоя за счет микровыступов, шероховатостей и микрозазоров в результате движения микрочастиц, получаем, что контактная пара соединителя в режиме сбоя образует симметричный электрический вибратор, который возбуждается генератором высокой частоты.

Под действием напряжения генератора на составляющих контактной пары соединителя как на плечах вибратора возникает продольный ток, который является источником электромагнитных волн, распространяемых поперечно в окружающее соединитель пространство. Данная поперечная относительно контактной пары соединителя волна может быть зафиксирована серийно выпускаемыми приборами (например, селективным микровольтметром). Проведенные испытания полностью подтвердили данные предпосылки и позволили использовать в качестве информативного параметра изменение фазы синусоидального сигнала [4].

Другой подход к решению проблемы бесконтактной регистрации режима сбоя соединителей заключается в следующем. Исходя из принципа взаимности для передающих и приемных антенн, можно заключить, что соединитель или соединение, находящиеся в режиме излучения, могут работать и в режиме приема (рис. 2а).

На рис. 2б показан тестируемый участок контролируемой системы (например, ЭВМ), включающий передающую БИС или СБИС (передатчик), приемную БИС или СБИС (приемник) и линию связи с соединителем в режиме сбоя. Передаваемая соединителем 1 электромагнитная мощность поступает на соединитель 2, находящийся в режиме сбоя, а затем на высокочастотный регистратор (например, осциллограф). Примеры регистрации сбойных режимов при тестировании показаны на рис. 3.

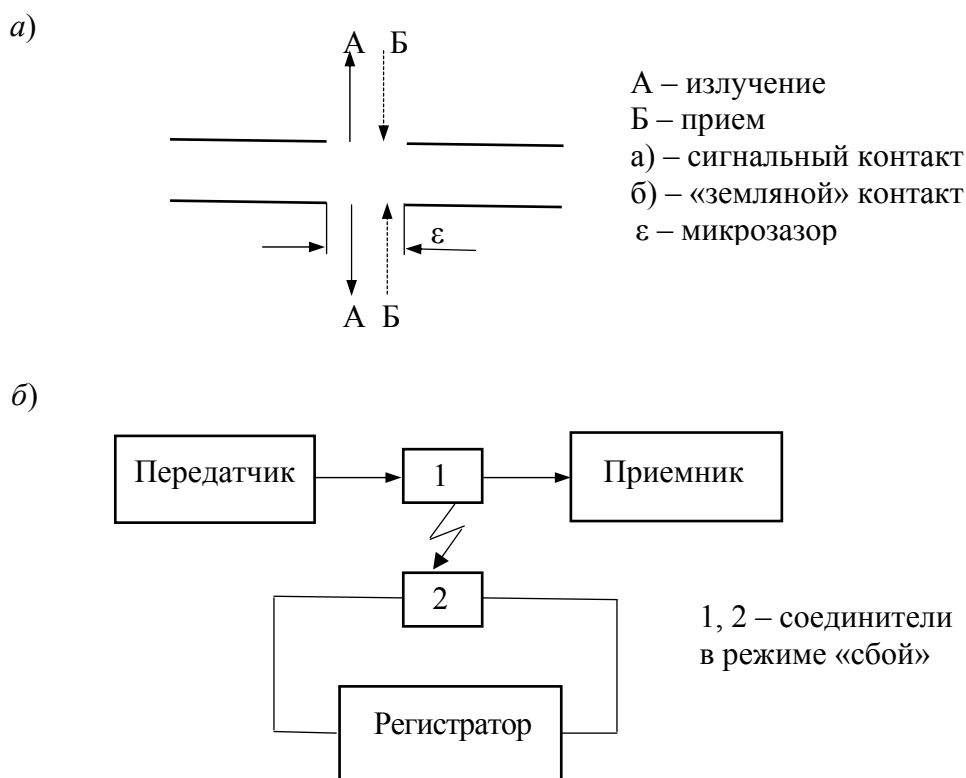


Рис. 2. Использование соединителя в режиме «сбой» в качестве излучающей и приемной антенны (а) при тестировании электрической цепи (б)

На рис. 3а показано тестирование соединения, имеющего режим сбоя во включенном состоянии, а на рис. 3б – в выключенном состоянии. Кривая 1 на рис. 3а соответствуют режиму сбоя во включенном состоянии соединения-излучателя, а на рис. 3б – в его выключенном состоянии. Кривая 2 на рис. 3а, соответствуют режиму сбоя во включенном состоянии соединения-приемника, а на рис. 3б – в его выключенном состоянии.

Расстояние между соединителями 1 и 2 (рис. 2б) изменялось от единиц миллиметра до 40–50 см. В частности, кривые на рис. 3а получены для расстояния между соединителями 10–12 мм, на рис. 3б – 25–27 см. Соединители 2 (рис. 2б) в обоих случаях выбирались со сбоями в режиме «включено» в целях получения максимальной чувствительности при приеме сигналов.

Из рассмотрения рис. 3а видно, что режим сбоя в режиме «включено» имеет несколько резонансных максимумов на частотах 4, 15 и 45 МГц.

Частичное превышение напряжений на кривой 2 в областях от 6 до 12 МГц и от 33 до 48 МГц можно объяснить большей добротностью колебательных контуров сбойного соединителя 2. Аналогично объясняется поведение кривой 2 на рис. 3б в области частот до 30 МГц, от 54 до 75 МГц и от 76 до 95 МГц.

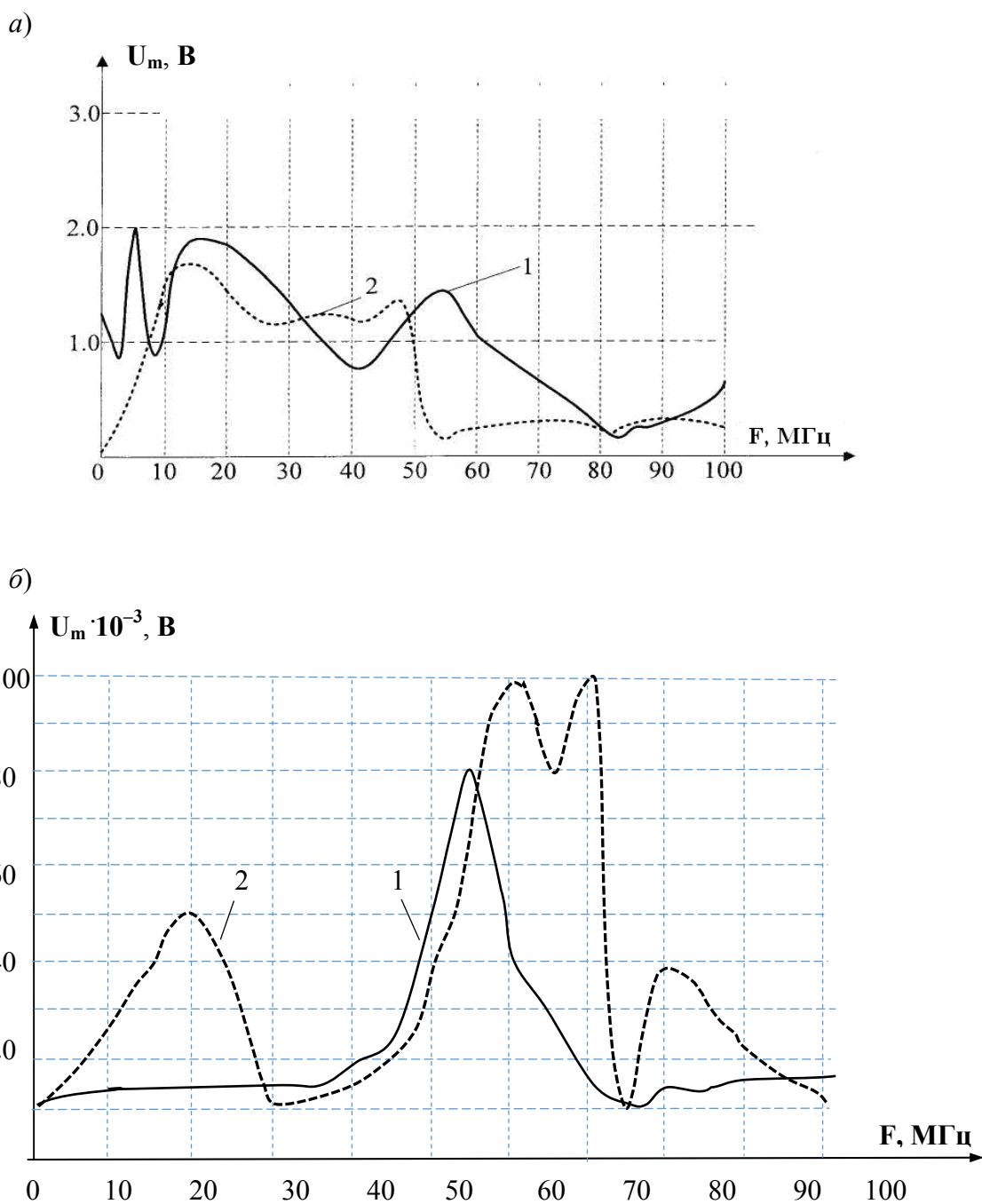


Рис. 3. Бесконтактное тестирование сбоя в режиме «включено» (а) и «выключено» (б)  
(1 – излучатель, 2 – приемник)

Широкий диапазон как генерируемых, так и принимаемых частот в сбойных режимах позволяет сделать вывод о достоверности регистрации данных режимов описанными методами, а с другой стороны, позволяет выполнять аппаратуру для регистрации портативной. Об этом свидетельствуют также характеристики соединителей в режимах «включено» и «выключено» в области частот до 300 МГц.

Дополнительно отметим, что схема для обнаружения сбоев, представленная на рис. 2б, может быть использована и для обнаружения скрытых дефектов соединителей (и соединений) в процессе входного контроля соединителей или участков электрической цепи с предполагаемыми режимами сбоя. В качестве передатчика при этом используется генератор синусоидальных сигналов, в качестве приемника – высокочастотный осциллограф. При этом для обнаружения скрытых дефектов соединителей обеспечивается плавное колебание вилки относительно розетки (или наоборот) с дискретностью шага перемещений до десятков и единиц микрометров по ранее изложенной методике [4].

Экспериментальное исследование соединителей (РППМ 27-90) в диапазоне частот до 300 МГц показало, что наряду с резонансом на частоте 30 МГц имеется резонанс на частоте 230 МГц примерно с той же амплитудой напряжения. В режиме выключенного состояния в указанном диапазоне частот (300 МГц) на частотах 250 и 290 МГц амплитуда сбойного сигнала даже превышает аналогичный параметр на частотах 30 и 150 МГц. Режим сбоя соединения в указанном диапазоне частот имеет четыре резонансных максимума, что облегчает регистрацию данного режима типовой радиоизмерительной аппаратурой (при необходимости).

Исследования в диапазоне частот до 4 ГГц проводились на контактных дорожках печатных плат, включая многослойные [4].

В случае необходимости выявить дефекты в работающей цепи, представляющей собой параллельный многоразрядный интерфейс, предлагается следующий алгоритм идентификации сбойной шины (рис. 4, 5).

Применение приемника (соединителя в режиме сбоя) в качестве датчика позволяет выполнить аппаратуру для регистрации портативной, дешевой, надежной и простой в эксплуатации [4].

Последовательно на каждый разряд шины подается последовательность единиц с одновременной подачей нулей на остальные разряды шины. Фиксация режима сбоя осуществляется бесконтактно по описанной выше методике с регистрацией номера тестируемого на данный момент канала. В качестве информативного параметра при этом используется резонансная частота сбойного соединения.

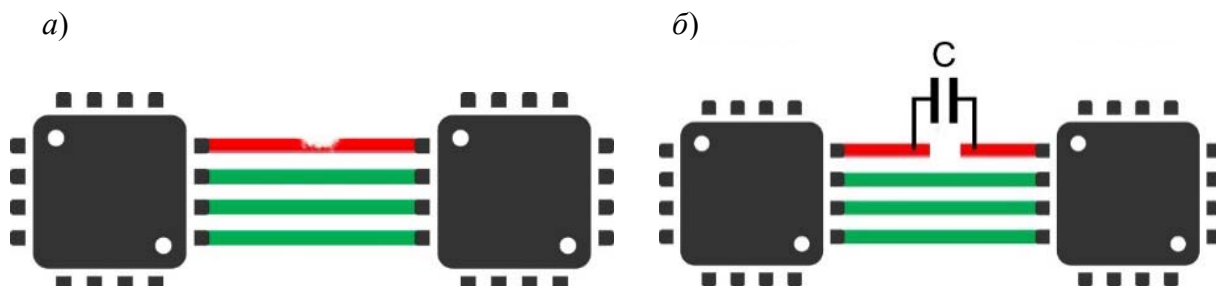


Рис. 4. Дефект линии связи (а) и его электрический аналог (б)

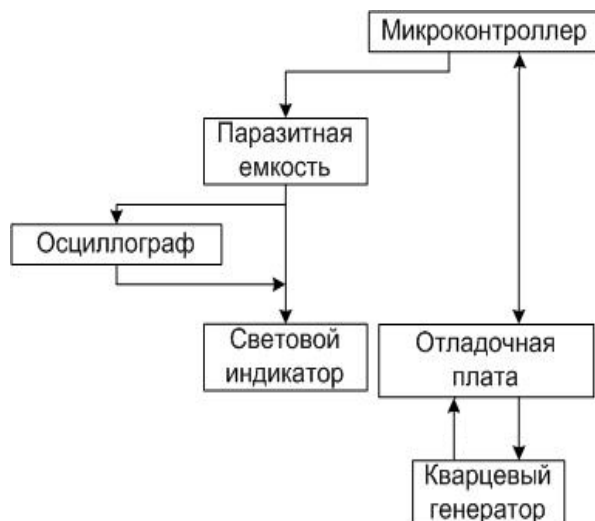


Рис. 5. Блок-схема экспериментального стенда по обнаружению сбоя

Фрагмент экспериментального стенда по моделированию и регистрации сбоев показан на рис. 6. Особенности загорания светодиодов характеризует разный уровень сигналов при сбойных режимах. При моделировании использовались емкости 5, 10, 15, 20 пФ.

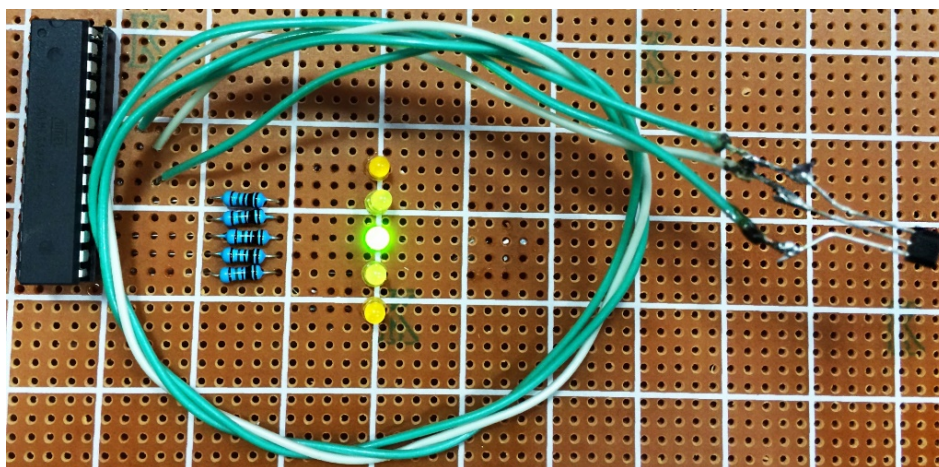


Рис. 6. Фрагмент экспериментального стенда

Регистрация сбойных режимов осуществлялась посредством высокочастотного (до 2 ГГц) осциллографа (рис. 7).

Полученный выше результат по обнаружению сбоев в процессе входного контроля предлагается использовать при разработке и модернизации аппаратуры для проверки ЭА на электромагнитную совместимость. Для этого на этапе входного контроля из состава аппаратуры необходимо исключить соединители и соединения, имеющие режим сбоя. В дальнейшем, в процессе эксплуатации аппаратуры, при появлении сбоев в ее рабо-

те за счет выхода на сбойные режимы соединителей и соединений (данные факты фиксируются встроенными в аппаратуру датчиками сбоев) следует считать данную аппаратуру электромагнитно не совместимой, если имеющиеся в ней сбои представляют собой сбои в режиме «включено», то есть сбои в области «короткого замыкания» соединителей.

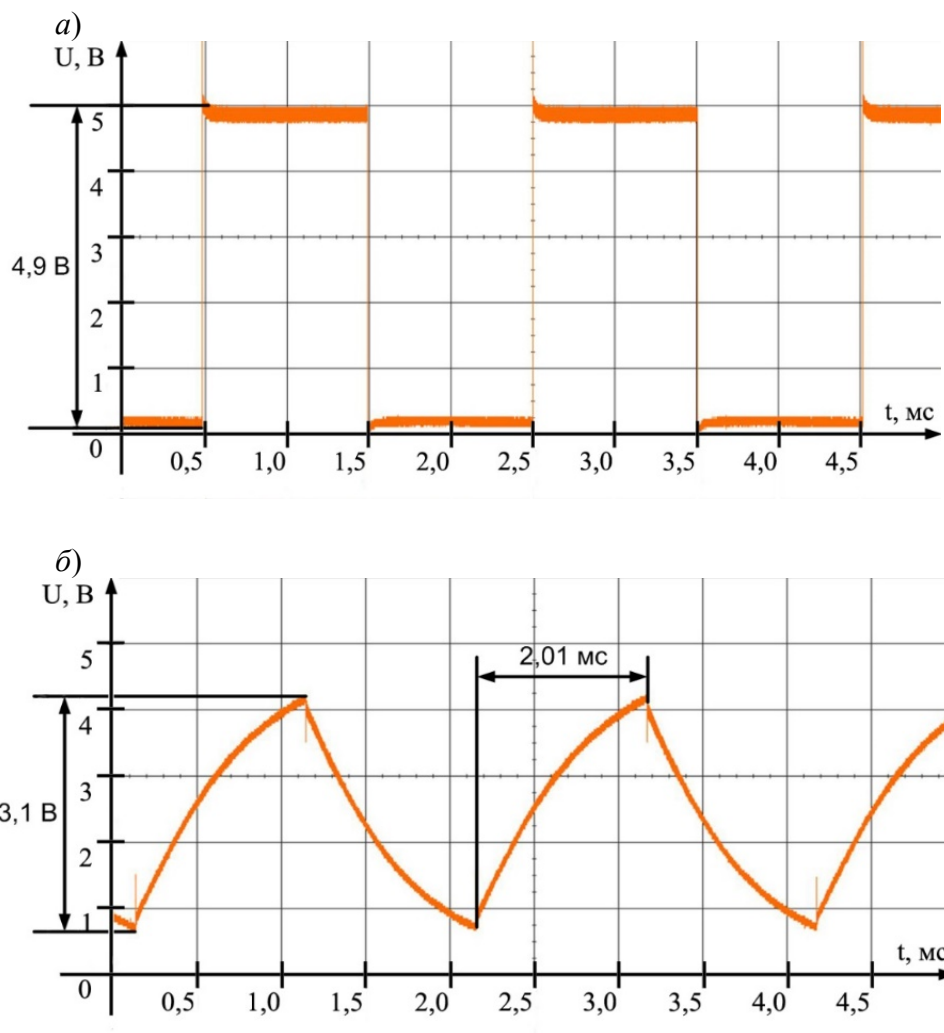


Рис. 7. Осциллограммы скрытых дефектов в аппаратуре:  
*а* – линия связи без скрытого дефекта;  
*б* – линия связи при наличии скрытого дефекта

Данное предложение обусловлено тем, что при сбое в режимах «включено» источник излучения сигнала сбоя (в данном случае соединитель в режиме сбоя) имеет сигнал излучения на некоторых частотах (рис. 3), больший входного сигнала, что может привести к превышению уровня излучаемых допустимых помех. Для реализации данной задачи в электронную систему технического устройства дополнительно включают КДС и БДС, установленные соответственно на линиях связи (интерфейсных шинах) с соединителями

и в непосредственной близости (до 1–2 см) от элемента (линии связи, интерфейсной шины) или узла (соединителя) электрической цепи.

При этом в качестве источников сбоев обнаруживаются соединители (разъемы), интерфейсные шины, шины управления, заземления и электропитания, внутренние и внешние электромагнитные помехи, а также (посредством анализа рисков сбоя) активные элементы в виде транзисторов, микросхем [5, 10]. В данном датчике электрических сигналов (сбоев) для настройки режимов использованы механизм фиксации (пружинная пара), а в качестве приемника излучений контактная пара. Важными преимуществами указанных датчиков перед широко распространенными датчиками Холла являются широкий (до 4 ГГц) диапазон работы, отсутствие источников питания, простота построения. Также предлагаются алгоритмы обработки сигналов с указанных датчиков сбоев как при автономной, так и при компьютерной обработке.

### **Заключение**

1. Выдвинута концепция аппаратурной бессбойности построения и применения элементов, узлов, блоков и систем магнитолевитационных транспортных средств («аппаратурная бессбойность»).

2. Предложена диагностика скрытых дефектов как предвестников сбоев в электронной аппаратуре.

3. Аппаратурная бессбойность подтверждена экспериментальными исследованиями элементов ЭА.

4. Рекомендуются понятие «аппаратурная бессбойность» ввести в соответствующие разделы ГОСТов, ОСТов, ТУ и т. д. по железнодорожной автоматике.

### **Библиографический список**

1. Антонов Ю. Ф. Магнитолевитационная транспортная технология / Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев. – М. : Физматлит. – 2014. – 476 с.
2. W. LI, Y. Xue, Y. Zhnag. Development status and future planning of China railway high-speed. – P. 48–65.
3. Дианов В. Н. Свойство пассивных элементов радиоэлектронной аппаратуры увеличивать количество считываемой информации о системе под воздействием электрических колебаний. Научное открытие в области теории надежности, теории безопасности (диплом 47-S) / В. Н. Дианов, Н. А. Северцев, Ю. Г. Евтушенко // Научные открытия 2012. Сборник кратких описаний научных открытий, научных идей. Издание РАЕН, декабрь 2011. – С. 44–46.

4. Дианов В. Н. Физические основы обнаружения скрытых дефектов в электронной аппаратуре / В. Н. Дианов, Т. А. Гевондян. – Пенза : ИП Соколов А. Ю. – 2015. – 252 с.
5. ISA 84.01 – 96.
6. IEC 61508.
7. Patent USA N 6336065, IPC G 06F 11/25. 2003.
8. Дианов В. Н. Особенности обнаружения скрытых дефектов в комбинационных схемах магнитолевитационных транспортных систем. Труды 2-й Международной конференции «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (МТСТ'14). Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 17–20 июня 2014 г., с. 284–287.
9. Данилин Н. С. Управление жизненным циклом космического аппарата на основе информации о предвестниках отказов / Н. С. Данилин, Н. П. Колесников // Сетевой электронный журнал «Системотехника», № 8, 2010.
10. Воробьев Н. В. Методы анализа комбинационных схем на риски сбоя / Ship News. – 1997, № 12.

## References

1. Antonov Y. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magneto-levitation transportation technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. LI W., Y X., Y Z. Development status and future planning of China railway high-speed *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii" MTST'14* (Proc. of the 2nd Int. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies" MTST'14). Kirov, 2014, pp. 48–65.
3. Dianov V. N., Severtsev N. A., Evtushenko Y. G. *Nauchnye otkrytiya 2012. Sbornik kratkih opisaniy nauchnyh otkrytij, nauchnyh idej RAEN – Collection of brief descriptions of scientific discoveries, scientific ideas AREA*, 12/2011, pp. 44–46.
4. Dianov V. N., Ghevondyan T. A. *Fizicheskie osnovy obnaruzheniya skrytyh defektov v ehlektronnoj apparature* [Physical principles of the detection of hidden defects in electronic equipment]. Penza, 2015. 252 p.
5. ISA 84.01 – 96.
6. IEC 61508.
7. Patent USA N 6336065, IPC G 06F 11/25. 2003.
8. Dianov V. N. Osobennosti obnaruzheniya skrytyh defektov v kombinacionnyh skhemah magnitolevitacionnyh transportnyh sistem [Especially the detection of hidden defects in combination-tion schemes magneto-levitation transport systems] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii*

“Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii” MTST’14 (Proceedings of the 2nd International Conference "Magnetic levitation transport systems and technologies" MTST'14). Kirov, 2014, pp. 284–287.

9. Danilin N. With, Kolesnikov N. P. *Setevoy ehlektronnyj zhurnal “Sistemotekhnika” – Network electronic magazine “systems Engineering”*, 2010, no. 8.

10. Vorobiev N.V. *Ship News*, 1997, no. 12.

**Сведения об авторах:**

ДИАНОВ Вячеслав Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры МГИУ, E-mail: vyasheslav-dianov@yandex.ru

ГЕВОНДЯН Тамара Акоповна, кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры общепрофессиональных дисциплин Пензенского артиллерийского инженерного института (филиал ВАМТО, г. Санкт-Петербург), E-mail: toma\_ra1@mail.ru

**Information about authors:**

DIANOV Vyacheslav N., Doctor of Engineering, professor, professor of MGIU chair, E-mail: vyasheslav-dianov@yandex.ru

GEVONDYAN Tamara A., candidate of physical and mathematical sciences, teacher of chair of all-professional disciplines of the Penza artillery engineering institute (VAMTO branch, St. Petersburg), E-mail: toma\_ra1@mail.ru