

ISSN 2413-9203

# ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

рецензируемый научный журнал

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

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

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

Выпуск 2 (2), 2015

Труды 3-й Международной научной конференции

«Магнитолевитационные транспортные системы и технологии» (MTST'15)

**TRANSPORTATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY**

Issue 2 (2), 2015

Proceedings of the 3rd International Scientific Conference

"Maglev transport systems and technologies" (MTST'15)

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

EHLEKTRONNYJ NAUCHNYJ ZHURNAL "TRANSPORTNYE SISTEMY I TEKHNOLOGII"

ELECTRONIC RESEARCH 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** И. М. Шейнман

**Executive editor** I. M. Scheinman

**Ответственный секретарь** Т. С. Антонова

**Executive secretary** T. S. Antonova

**Редактор сайта** А. Ю. Дитрихс

**Online content editor** A. Yu. Ditrhihs

**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** И. М. Шейнман

**Editing and proofreading** I. M. Scheinman

**Верстка** Т. С. Антонова

**Layout** T. S. Antonova

**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@transysst.ru; сайт: www.transysst.ru

**Contacts** 190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 113, 9/11-5, tel: +7(911)238-44-45, e-mail: info@transysst.ru; сайт: www.transysst.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 NIIIEFA 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

**Панычев 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 «БЮЛЛЕТЕНЬ РЕЗУЛЬТАТОВ  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ» ONLINE-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** – A4; 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 подрисочной 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>Зайцев А. А.</b>                                                                | Грузовая транспортная платформа на магнитолевитационной основе: опыт создания              | 5  |
| <b>Stephan R., de Andrade R. Jr.,<br/>Ferreira A. C., Costa F.,<br/>Machado O.</b> | Maglev-cobra: an urban transportation system for highly populated cities                   | 16 |
| <b>Сугоровский А. В.</b>                                                           | Развитие информационных технологий для повышения эффективности регулирования вагонопотоком | 26 |

### Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

|                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Костенко В. В., Четчуев М. В.,<br/>Фёдоров В. П., Хомич Д. И.</b>                                                                       | Грузовые станции магнитолевитационных линий                                                                                                                      | 38  |
| <b>Филиппов Д. М.</b>                                                                                                                      | Особенности моделирования магнитного поля в электромеханических узлах магнитолевитационной транспортной системы методом вторичных источников                     | 49  |
| <b>Антонов Ю. Ф., Данилов Н. К.,<br/>Казначеев С. А., Усов Д. А.,<br/>Мельников Я. И.,<br/>Морозова Е. И., Разин Е. А.</b>                 | Разработка модельной установки и исследование левитации и боковой стабилизации платформы с использованием высокотемпературных сверхпроводников второго поколения | 62  |
| <b>Никитин В. В.,<br/>Гулин С. А., Середа Е. Г.</b>                                                                                        | Системы определения скорости и положения экипажа с линейными синхронными двигателями                                                                             | 85  |
| <b>Иванова А. Г.,<br/>Загребельный О. А.,<br/>Пономарева А. А.,<br/>Масалович М. С., Губанова Н. Н.,<br/>Шилова О. А., Кручинина И. Ю.</b> | Разработка электрохимических устройств на основе нанокompозитных материалов                                                                                      | 100 |

### Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

|                                            |                                                                                         |     |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Аполлонский С.М.</b>                    | Проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетической железнодорожной системе | 110 |
| <b>Шматченко В. В.,<br/>Плеханов П. А.</b> | Современная нормативная база обеспечения безопасности магнитолевитационного транспорта  | 127 |

### Раздел 4. ОБРАЗОВАНИЕ

|                        |                                                                                                       |     |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Григорьев Н. Н.</b> | Транспортные вузы в контексте федерального закона РФ № 273–ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» | 143 |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



## CONTENTS

### Section 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

|                                                                                    |                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Zaitsev A. A.</b>                                                               | Cargo-Carrying Transport Platform Based on Magnetic Levitation: Experience of creation | 5  |
| <b>Stephan R., de Andrade R. Jr.,<br/>Ferreira A. C., Costa F.,<br/>Machado O.</b> | Maglev-cobra: an urban transportation system For highly populated cities               | 16 |
| <b>Sugorovsky A. V.</b>                                                            | Development of information technology to improve the management of traffic volumes     | 26 |

### Section 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENT

|                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                     |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Kostenko V. V., Chetchuev M. V.,<br/>Fyodorov V. P., Homich D. I.</b>                                                                   | Freight stations for lines of magnetic levitation                                                                                                                   | 38  |
| <b>Filippov D. M.</b>                                                                                                                      | Peculiarities of simulation of magnetic field in electromechanical nodes of magnetic-levitation transport system by the method of secondary sources                 | 49  |
| <b>Antonov Yu. F., Danilov N. K.,<br/>Kaznacheev S. A.,<br/>Melnikov Ya. I., Morozova E. I.,<br/>Usov D. A., Razin E. A.</b>               | Development of model setup and study of levitation and lateral stabilization of the platform with the use of high-temperature superconductors of the 2nd generation | 62  |
| <b>Nikitin V. V.,<br/>Gulin S. A.,<br/>Sereda E. G.</b>                                                                                    | Speed and position detecting systems for vehicle with linear synchronous motors                                                                                     | 85  |
| <b>Ivanova A. G., Zagrebelnyiy O. A.,<br/>Ponomareva A. A.,<br/>Masalovich M. S., Shilova O. A.,<br/>Gubanova N. N., Kruchinina I. Yu.</b> | Development of electrochemical devices based on nanocomposite materials                                                                                             | 100 |

### Section 3. SAFETY

|                                               |                                                                         |     |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Apollonskiy S. M.</b>                      | Problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system | 110 |
| <b>Shmatchenko V. V.,<br/>Plekhanov P. A.</b> | Modern regulations of safety assurance for maglev transportation        | 127 |

### Section 4. EDUCATION

|                       |                                                                                                            |     |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Grigorev N. N.</b> | Transport universities are in the context of the federal law № 273-FZ «On education in Russian Federation» | 143 |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## Раздел 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

УДК 608.3+69.003

**А. А. Зайцев**

Научно-образовательный центр  
инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок  
Петербургского государственного университета путей сообщения  
Императора Александра I

### ГРУЗОВАЯ ТРАНСПОРТНАЯ ПЛАТФОРМА НА МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ОСНОВЕ: ОПЫТ СОЗДАНИЯ

Дата поступления 21.10.2015

Решение о публикации 01.11.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Аннотация:** Петербургскими учеными разработана инновационная технология, позволяющая формировать магнитное поле, которое обеспечивает левитацию контейнера массой 28 тонн с рабочим зазором 25 мм. Благодаря этой разработке стало возможным создание грузовой магнитолевитационной транспортной платформы. Уникальная технология изготовления магнитных полюсов левитации, боковой стабилизации и линейной тяги на основе простых и эффективных схем сборки позволила достичь высоких значений магнитных полей. Экспериментально установлено, что на расстоянии 5 см от полюсов магнитное поле соответствует естественному фону.

Грузовая магнитолевитационная транспортная платформа – основа для создания экологически чистого, малозумного, безопасного, не зависящего от климатических и погодных условий эксплуатации многофункционального грузового транспорта. Левитация обеспечивается на стоянках, участках разгона и торможения, а также в режиме движения. Научные и практические разработки технологии создания грузового магнитолевитационного транспорта, выполненные учеными ПГУПС, не имеют аналогов в мире.

Уникальная технология стала основой для разработки проекта инновационной транспортно-логистической системы. Данная система ориентирована на широкий диапазон потребителей, так как отсутствуют жесткие ограничения по массе, габаритам и другим требованиям к подвижному составу.

Для реализации проекта создания транспортно-логистической системы предлагается строительство первой в мире грузовой магнитолевитационной трассы от Санкт-Петербурга до Москвы. Новая магистраль способна обеспечить надежную транспортную связь между портами Финского залива и грузовыми терминалами столицы.

**Ключевые слова:** грузовая магнитолевитационная транспортная платформа; высокоэнергетические постоянные магниты; транспортно-логистическая система; магнитолевитационная трасса.

**A. A. Zaitsev**

Scientific and Education Center

of Innovative Development of Passenger Rail Transportation

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I

CARGO-CARRYING TRANSPORT PLATFORM BASED ON MAGNETIC  
LEVITATION: EXPERIENCE OF CREATION

**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**

Современная транспортно-логистическая система вследствие несовершенства логистических и транспортных технологий, а также существующих инфраструктурных ограничений не отвечает в полной мере требованиям участников транспортного процесса к скорости и стоимости перевозок, спектру и качеству предоставляемых услуг.

Проблемы, связанные с грузовыми перевозками в России, сегодня стоят наиболее остро. Рост грузооборота в стране происходит в основном за счет автомобильных перевозок, приводящих к перегруженности автомобильных трасс, повышению аварийности на дорогах, усугублению экологических проблем.

Доставка грузов по железной дороге осуществляется по маршрутам, далеким от оптимальных. Удлинение маршрута следования грузов связано с ограничениями пропускной способности инфраструктуры. Наличие «узких» мест на некоторых направлениях приводит к тому, что протяженность маршрута транспортировки контейнеров увеличивается вдвое. Сроки доставки грузов возрастают, что повышает потребность в инвестициях в оборотный капитал предприятий и увеличивает издержки.

Обозначенные проблемы требуют принятия решений, которые основаны на применении инновационных технологий, способствующих повышению скорости грузоперевозок, транспортной и экологической безопасности. Одно из таких решений – применение магнитолевитационной технологии для создания новой транспортно-логистической системы (ТЛС).

### **Характеристика транспортно-логистической системы**

Инновационная ТЛС формируется на основе строительства магнитолевитационной магистрали и внедрения современных логистических технологий.

Основные конкурентные преимущества ТЛС при осуществлении грузовых перевозок складываются из следующих критериев:

- 1) себестоимость доставки;
- 2) срок доставки;
- 3) сохранность грузов;
- 4) ритмичность перевозок.

Специалистами ПГУПС проведена оценка целесообразности реализации проекта создания ТЛС, использующей технологию магнитной левитации, с целью обслуживания контейнерных потоков между морскими портами Санкт-Петербурга, Ленинградской области и транспортно-логистическими центрами Москвы.

На рассматриваемом маршруте магнитолевитационный, железнодорожный и автомобильный транспорт обладают следующими конкурентными характеристиками (табл. 1).



**Таблица 1**

**Конкурентные характеристики различных видов транспорта [6]**

| Конкурентная характеристика                                       | Вид транспорта                                               |                                     |                                 |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
|                                                                   | Магнито-левитационный                                        | Железнодорожный                     | Автомобильный                   |
| Себестоимость доставки (1 TEU по маршруту Усть-Луга – Белый Раст) | 10 433,22 руб. (аналогичная себестоимость для 1 FEU = 2 TEU) | 28 790,33 руб.                      | 12 034,41 руб.                  |
| Срок доставки                                                     | 2–3 ч                                                        | 2–3 сут.                            | 20 ч                            |
| Сохранность грузов                                                | Высокая                                                      | Высокая                             | Средняя                         |
| Ритмичность перевозок                                             | Отправление по формированию состава                          | Отправление по формированию состава | Отправление по готовности груза |
| Безопасность перевозки                                            | Высокая                                                      | Средняя                             | Невысокая                       |
| Экологическая безопасность ТЛС                                    | Высокая                                                      | Средняя                             | Низкая                          |

Очевидно, что существующие на рынке грузоперевозок предложения значительно уступают проектируемому виду транспорта по стоимости и срокам. Сравнительные характеристики подтверждают конкурентноспособность магнитолевитационного транспорта.

В проекте ТЛС определены следующие основные параметры ее работы:

- пропускная способность линии в одном направлении – 2500 ед. в год;
- режим работы линии – круглосуточно;
- средняя скорость грузовой платформы – 250 км/ч;
- время в пути одной платформы – 3 ч;
- количество грузовых платформ, одновременно находящихся на одной линии – 341 ед.;
- динамика разгона (торможения) –  $2 \text{ м/с}^2$ .

Провозная способность магнитолевитационной магистрали существенно выше аналогичного показателя для железнодорожной и автомобильной инфраструктуры; погрузка одного контейнера, включающая подачу и уборку вагона, осуществляется менее чем за одну

минуту.

Путевая структура маглева – в т.ч. кабели электроснабжения, системы сигнализации и связи – располагается на эстакаде.

Дополнительным преимуществом такого расположения инфраструктуры является небольшая (до семи раз меньшая, чем для железнодорожного полотна) ширина полосы землеотвода.

Необходимо отметить, что маглев не имеет жестких ограничений по габаритам подвижного состава, в связи с чем его функциональность в перевозке различных видов груза значительно шире, чем у традиционных видов транспорта [2].

### **Разработка грузовой магнитолевитационной транспортной платформы**

Ключевым моментом, определяющим реальную возможность реализации проекта, стало создание грузовой магнитолевитационной транспортной платформы (ГМЛТП). Учеными ПГУПС при поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» разработана технология, позволяющая формировать магнитное поле, обеспечивающее левитацию массы 32 тонны на квадратный метр сборки из элементарных магнитов.

Эффект магнитной левитации продемонстрирован на полномасштабном образце ГМЛТП (рис. 1, 2), оснащенной секцией линейного синхронного двигателя.

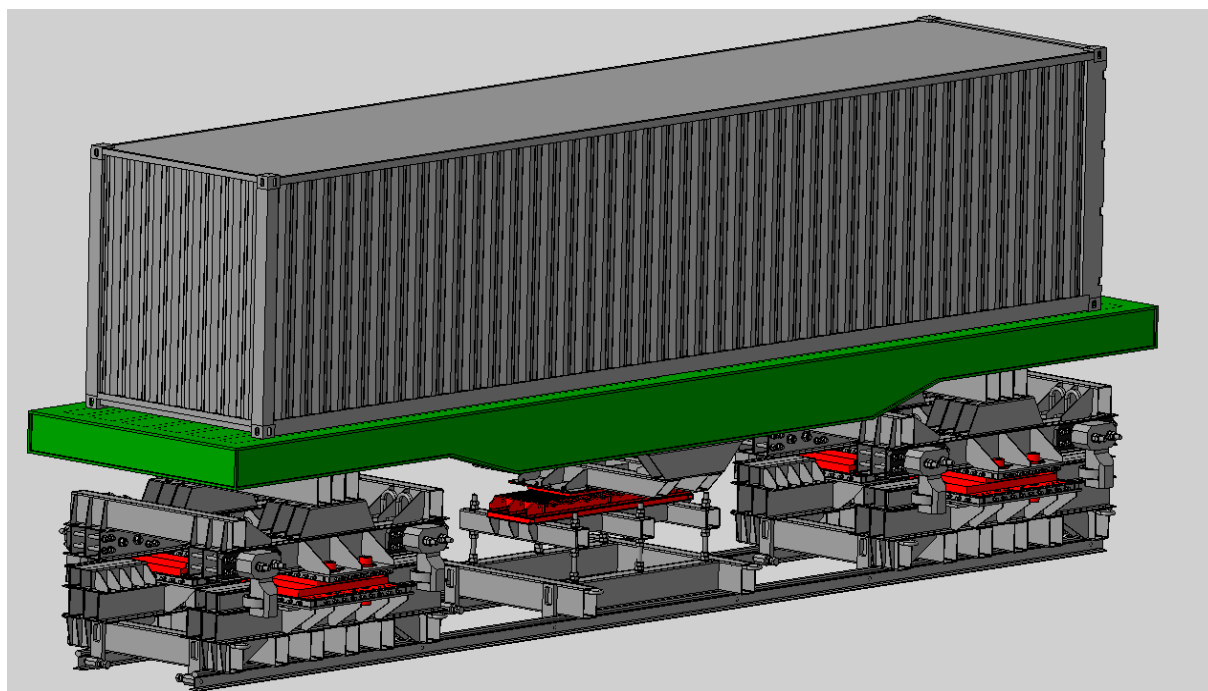


Рис. 1. Грузовая магнитолевитационная транспортная платформа



Рис. 2. Фото полномасштабного образца грузовой магнитолевитационной транспортной платформы

Основные характеристики ГМЛТП:

- грузоподъемность – 40 т (контейнер ИСО серии 1: 1ААА, 1АА,1А);
- ускорение –  $2 \text{ м/с}^2$ ;
- тяга – линейный синхронный двигатель;
- мощность двигателя – 280 кВт;
- подъемная сила – 65 кН;
- зазор левитации – 25 мм.

ГМЛТП состоит из следующих узлов:

- типовая фитинговая платформа, оснащенная бортовым магнитным полюсом ЛСД;
- две несущие тележки, оснащенные бортовыми магнитными полюсами левитации;
- активная путевая структура со стационарными магнитными полюсами левитации;
- статор ЛСД, уложенный вдоль активной путевой структуры;
- страховочные ограничители перемещения;
- система питания ЛСД.

В ходе испытаний ГМЛТП продемонстрирована практическая осуществимость основных систем – левитации и линейной тяги. Согласно протоколу испытаний, при нагрузке 28 т левитационный зазор составляет 25 мм при нулевой скорости и при перемещении на расстояние 60 см. Полученные параметры согласуются со значениями, которые установлены экспериментально при испытании на нагрузку четырех штатных магнитных модулей левитации.

## **Технологические особенности технологии «МагТранСити»**

Перманентная левитация. Во время стоянки и перемещения в депо и на экипировочные участки, а также на всем участке пути следования транспортное средство может находиться и двигаться в режиме левитации.

Большой рабочий зазор (клиренс) – до 100 мм и выше.

Эффективная боковая стабилизация.

Сборка бортового энергетического оборудования из автономных унифицированных узлов позволяет формировать транспортные средства любого состава и назначения.

Унификация элементов несущей конструкции. Возведение эстакад, мостов и т. д. из типовых блоков ускоряет и удешевляет строительные работы [1]. Несущая конструкция возводится без применения бульдозеров и экскаваторов.

С целью создания научно-технического задела в области грузовых транспортных систем на основе магнитной левитации специалистами ПГУПС выполнен цикл фундаментальных исследований по разработке отечественной магнитолевитационной транспортной технологии:

1) магнитолевитационная технология как транспортная стратегия высокоскоростного движения;

2) фундаментальные исследования перманентной левитации и разработка технических средств обеспечения функциональной связи дискретно-конвейерных и магистрально-высокоскоростных грузовых транспортных систем;

3) разработка малогабаритной системы накопления и преобразования энергии транспортной единицы на магнитном подвесе;

4) исследование и разработка пространственных вычислительных моделей активных и пассивных элементов системы левитации и боковой стабилизации, обеспечивающей устойчивость транспортного средства в замкнутом и открытом пространствах;

5) разработка и испытание унифицированного сверхпроводникового модуля для систем магнитной левитации, боковой стабилизации и линейной тяги грузового транспортного средства.

В настоящее время получены патенты на следующие изобретения:

1) способ активации высокотемпературных сверхпроводников в области криогенных температур ниже критического значения и устройство для его осуществления;

2) устройство магнитной левитации транспортного средства;

3) катальная гора с магнитолевитационным транспортным средством;

4) устройство магнитной левитации и поперечной стабилизации



транспортного средства;

5) устройство преобразования электрической энергии;

6) электролизер.

В Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) подано пять новых заявок на изобретения.

### Строительство магнитолевитационной трассы

Реализация проекта создания ТЛС на магнитолевитационной основе возможна при строительстве трассы в коридоре высокоскоростной магистрали (ВСМ) Санкт-Петербург – Москва (рис. 4). Потребность в площадях под полосу отвода существенно меньше требуемого для классической железной дороги, что позволяет организовать подходы к портам и транспортно-логистическим центрам (ТЛЦ). Основные инфраструктурные ограничения связаны с организацией внутренней логистики на портовых территориях и территориях ТЛЦ.



Рис. 3. Схема предполагаемой магнитолевитационной трассы



Магнитолевитационная трасса между Москвой и Санкт-Петербургом может стать головным участком транспортной системы «Север – Юг», «Запад – Восток».

## **Выводы**

Реализация проекта создания ТЛС на магнитолевитационной основе имеет преимущества перед железной дорогой и автотранспортом:

- более высокая скорость перемещения с возможностью существенного увеличения скоростей в эксплуатационном режиме;
- быстрое ускорение и короткий тормозной путь, что повышает динамичность и безопасность движения;
- отсутствие контакта с инфраструктурой, в результате чего разрушающее воздействие отсутствует, срок службы инфраструктуры и подвижного состава увеличивается;
- исключение схода поезда с пути за счет особенностей технологии;
- высокая экологическая безопасность (пониженный уровень шума, малые вихревые потоки, низкое негативное воздействие на окружающую среду);
- высокая приспособленность к ландшафту (преодоление подъема: маглев – 10%, ВСМ – 4%; поворот на скорости 300 км/ч: маглев – 1 950 м пути, ВСМ – 3 200 м);
- энергоэффективность (потребление электроэнергии в 1,5 раза ниже, чем для ВСМ, за счет отсутствия контакта с инфраструктурой, более высокого КПД двигателя).

Разработка ГМЛТП подтвердила возможность реализации проекта создания ТЛС на магнитолевитационной основе.

## **Библиографический список**

1. Зайцев А. А., Талашкин Г. Н., Соколова Я. В. Транспорт на магнитном подвесе – СПб.: ПГУПС, 2010. – 159 с.
2. Зайцев А. А. Многопрофильная программа развития магнитолевитационного транспорта в России. // Тр. I междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – СПб: ООО PUDRA, 2013. – С. 8–14.
3. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология. – М.: Физматлит, 2014. – 476 с.

4. Антонов Ю. Ф., Данилевич Я. Б. Криотурбогенератор КТГ-20: опыт создания и проблемы сверхпроводникового электромашиностроения. – М.: Физматлит, 2013. – 600 с.
5. Морозова Е. И. К вопросу создания единой конвейерно-магистральной системы на основе магнитной левитации. // Тр. I междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – СПб: ООО PUDRA, 2013. – С. 105–108.
6. Морозова Е. И. Техничко-экономические аспекты контейнерного маршрута «Большой порт» Санкт-Петербург – «Сухой порт» Москва. // Сборник докладов II Междунар. научно-практич. конф. «Развитие экономической науки на транспорте: НОВЫЕ РЕШЕНИЯ» – СПб: ПГУПС, 2014. – С. 296–301.
7. Kazuo Sawada. Technological Development of the Superconducting Magnet cally Levitated Train / Kazuo Sawada // Japan. railway engineer. – 2008. – № 160. – С. 2–5.
8. Rodd D. Technical and economic comparison of high-speed-rail and maglev systems / D. Rodd // Railway Technical Review. – 2006. – № 1. – P. 8–18.
9. JR-Maglev [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.en.wikipedia.org/wiki/JR-Maglev](http://www.en.wikipedia.org/wiki/JR-Maglev) (дата обращения: 09.02.2015).

## References

1. Zaitsev A. A., Talashkin G. N., Sokolova Ya. V. *Transport na magnitnom podvese* [Magnetic suspension transport]. St. Petersburg, 2010. 159 p.
2. Zaitsev A. A. *Mnogoprofil'naya programma razvitiya magnitolevitacionnogo transporta v Rossii* [Multidisciplinary program for the development of magnet levitation transport in Russia]. *Trudy 1-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Works 1<sup>st</sup> Int. Sc. Conf. "Magnetic and levitation transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2013, pp. 8-14.
3. Antonov Yu. F., Zaitsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnet levitation transport technology]. Moscow, 2014. 476 p.
4. Antonov Yu. F., Danilevich Ya. B. *Krioturbogenerator KTG-20: opyt sozdaniya i problemy sverhprovodnikovogo ehlektromashinostroeniya* [Cryoturbogenerator CTG-20: experience and problems of creating superconducting electrical engineering]. Moscow, 2013. 600 p.
5. Morozova E. I. *K voprosu sozdaniya edinoj konvejerno-magistral'noj sistemy na osnove magnitnoj levitacii* [The question of creating a unified conveyor-line system based on magnetic levitation]. *Trudy 1-j Mezhdunarodnoj*

*nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Works 1<sup>st</sup> Int. Sc. Conf. “Magnetic and levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2013, pp. 105-108.

6. Morozova E. I. *Tekhniko-ehkonomicheskie aspekty kontejnernogo marshruta “Bol'shoj port” Sankt-Peterburg – “Suhoj port” Moskva* [Technical and economic aspects of the container route “Big Port” of St. Petersburg – “Dry port” Moscow]. *Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Razvitie ehkonomicheskoy nauki na transporte: NOVYE RESHENIYA”* (Digest of reports 2<sup>nd</sup> Int. Sc. and Pract. Conf. «Development economics in transport: new solutions»). St. Petersburg, 2014, pp. 296-301.

7. Kazuo Sawada *Japan. railway engineer*, 2008, no. 160, pp. 2-5.

8. Rodd D. *Railway Technical Review*, 2006, no. 1, pp. 8-18.

9. *JR-Maglev* URL: <http://www.en.wikipedia.org/wiki/JR-Maglev> (09/02/2015).

**Сведения об авторе:**

ЗАЙЦЕВ Анатолий Александрович, профессор, доктор экономических наук, руководитель Научно-образовательного центра инновационного развития пассажирских железнодорожных перевозок Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I»  
E-mail: nozpgups@gmail.com

**Information about author:**

Anatoly A. ZAITSEV, Professor, Doctor of Economics, Head of Research and Education Centre of innovative development of passenger rail Federal State Institution of Higher Professional Education “Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I”  
E-mail: nozpgups@gmail.com

**R. Stephan, R. de Andrade Jr., A. C. Ferreira, F. Costa, O. Machado**

*Laboratory of Applied Superconductivity – Federal University of Rio de Janeiro*

## **MAGLEV-COBRA: AN URBAN TRANSPORTATION SYSTEM FOR HIGHLY POPULATED CITIES**

Дата поступления 04.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Abstract:** This paper describes the construction and operation of a superconducting magnetically levitated vehicle applied to urban transportation. The technology was tested with a full-scale prototype named MagLev-Cobra. Comparisons with wheel and rail technology, high speed MagLev and other MagLev technologies are presented and application niches identified. The steps for commercialization will also be addressed.

**Keywords:** Magnetic Levitation, Superconductivity, Linear Traction, MagLev-Cobra, Urban Transportation.

### **Introduction**

The need of high speed non-polluting transportation systems has drawn the world attention to MagLev trains that can travel at speeds of 600 km/h and use electricity as power supply. For connections up to 1000 km, high speed trains can offer advantages in terms of reliability, time, comfort and cost in comparison with airplanes and other transportation means [1].

On the other hand, the need of efficient public urban transportation, non-polluting and with competitive construction cost is one of the priorities of the modern world, where great part of the population live in big cities. The MagLev technology also offers construction and operational advantages in this case [2].

Research projects, prototypes and commercial applications are scattered worldwide. This paper presents an overview of the basic principles and applications of MagLev trains, focusing special attention on the MagLev-Cobra project. A prototype was tested in a full-scale 200 meters long line. Comparisons with other MagLev technologies are presented and application niches identified. The steps for commercialization will also be addressed in this paper.

## Levitation methods

The promising magnetic levitation (MagLev) techniques for applications in mass transportation can be summarized into three groups, described below.

### ***Electro Dynamic Levitation (EDL) - repulsion force***

This type of levitation requires the motion of a magnetic field in the proximity of a conductive material. The Japanese levitation train JR-MagLev [3] is grounded on this principle. There is a double line for demonstration and test, 42,8 km long, in Yamanashi, a town between Tokyo and Osaka. The world record of 603 km/h was reached there in April 2015. Japan plans to extend this test line to replace the Shinkansen (high speed wheel-rail train) connecting Tokyo-Nagoya in 2027 and Nagoya-Osaka in 2045. The technology has not yet been deployed commercially.

According to Faraday's law, the relative movement of a magnetic field in the proximity of a conductor will induce currents in it. These induced currents will generate a new magnetic field in opposition to the rate of change of the first (Lenz's law), resulting in repulsion and drag forces. The repulsion force can be used for suspension. This configuration is vertically poor damped and the lateral stability needs a special winding arrangement. Moreover, at stand still there is no levitation force, therefore this method needs supporting wheels until the vehicle reaches the levitation velocity.

### ***Electro Magnetic Levitation (EML) - attraction force***

This type of levitation has in the German proposal of levitation train Transrapid [4], which is commercially deployed since 2003 in a connection of 30 km in double line, between Shanghai Pudong International Airport and Shanghai Lujiazui, a financial district, its best showcase [5].

The underlying physical basis of this application exploits the attraction force that exists between an electromagnet and a ferromagnetic material. The stabilization, in this case, is only possible with a properly tuned feedback control system.

### ***Superconducting Magnetic Levitation (SML) - repulsion and attraction forces***

This type of levitation is based on the diamagnetic property of superconducting materials known as Meissner effect. The magnetic field in the interior of a superconductor is zero in the presence of a permanent magnet, producing a repulsive force. In the case of type II superconductors, this exclusion is partial, which reduces the levitation strength, but leads to an attraction force given by the so-called "pinning effect". The combination of both these forces leads to stability [6],[7]. This property, which represents a major difference compared to the EDL and EML methods, could only be properly exploited from the late 20th century with the advent of new magnetic materials,



such as  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (Nd-Fe-B) [8], and blocks of High Temperature Superconductors (HST), such as  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO) [9]. Brazil, with the MagLev-Cobra project developed a real-scale demonstration line of this technology. The physical aspects of this project were already addressed in some publications [10]-[16]. Other research groups are also pursuing this technology [17], [18]. Therefore, perspectives of innovation, originality and technical development can be foreseen.

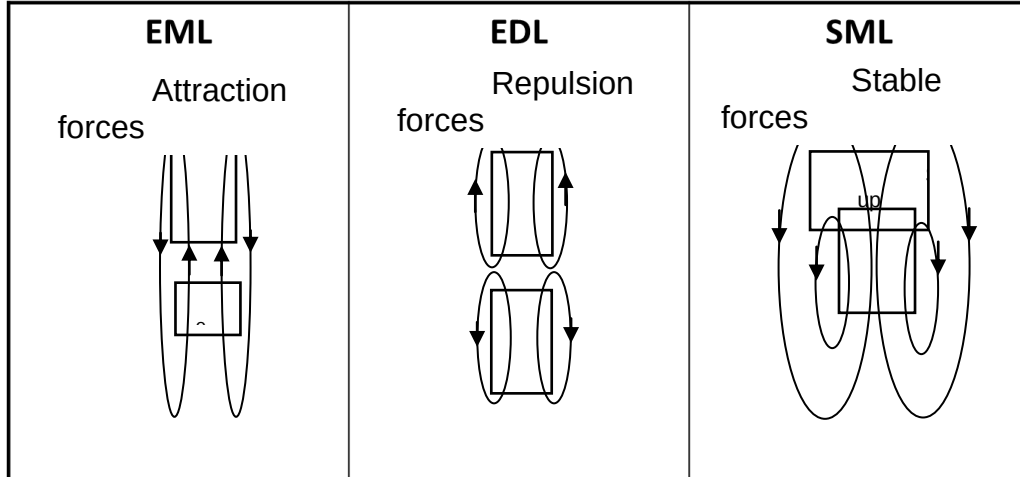


Fig. 1. Magnetic Levitation Methods

## Linear traction

Since there is no contact between rail and wheels, the traction of MagLev trains occurs through the so-called linear motors, which can be understood as rotary cylindrical motors of infinite radius. Thus, the rotational movement becomes a translational one.

Similarly to cylindrical motors, linear motors can be classified as AC (Alternating Current) or DC (Direct Current), according to their electric energy supply. Since the advent of power electronic converters, that allow the easy control of AC machines, DC motors have been gradually substituted and do not present any advantage for new applications.

Induction Machines (IM) and Synchronous Machines (SM) represent the two first options in the case of AC supply. The winding connected to the power supply is called armature. In AC cylindrical motors, the armature is always located in the stator. Both IM and SM have identical armature windings, the difference lying in the rotor: a simple set of conductors or conducting sheets for the IM, a magnetic field for the SM. This magnetic field can be given by permanent magnets, electro magnets or superconducting coils. This extra requirement is compensated for the easier control of SM when compared with the control of IM.

In the case of linear motors, the armature can be located either in the moving part or in the stationary one. The nomenclature used is ‘short armature’, for the former, or ‘long armature’, for the latter.

To supply energy to the moving part of linear motors, some kind of electric contact is necessary. Rails or catenaries can be employed, but, in any case, the higher the speed, the more challenging is to continuously maintain the electric contact. Therefore, for high speed MagLev trains (~500km/h), the long armature linear motor, that does not need moving supply contacts, is the natural choice. On the other hand, for low speed applications, the short armature presents economical advantages, since it avoids the expensive windings distributed along the track. Moreover, the energy supply can be easily achieved by contact or by opportunity at the stops in stations charging supercapacitors.

The points raised in the previous paragraphs are summarized below:

- The armature windings of SM and IM are identical.
- IM are simpler than SM, since the latter needs a source of magnetic field.
- Short armature is much less expensive than long armature.
- Long armature is the best choice for very high speeds.
- The control of SM is more straightforward than the control of IM.

This leads to the conclusion that for commercial applications short armature Linear Induction Motors (LIM) are the best choice for the traction of low speed MagLev trains and long armature Linear Synchronous Motors (LSM) the best choice for the traction of high speed MagLev trains.

### **The maglev-cobra project**

MagLev-Cobra is a vehicle with multiple short units, allowing curves of 50 meters radius, ramps of 10% and velocities up to 70km/h. When these short units are connected, the vehicle resembles a ‘snake’ or ‘cobra’ in Portuguese.

The levitation technology is based on the properties of High Temperature Superconductors (HTS) and the magnetic field of Nd-Fe-B magnets. These materials were made available at the end of last century and until today there is no such system in commercial use.

A linear motor gives the traction. Since this propulsion method only needs electric energy, which is mainly generated by hydro power plants in Brazil, the MagLev-Cobra has low polluting effect.

Due to the low noise emission level, the vehicle can run inside cities on elevated structures. The estimated construction costs are 1/3 of that necessary for subways.

Moreover, the energy consumption and the maintenance costs are lower than that of a LRV (Light Rail Vehicle) since no mechanical contacts and rotational parts are necessary.

The proposed vehicle gives a futuristic view along its way, matching high technology, modern design, environmental restrictions and social requirements. Maglev-Cobra technology is summarized in Figure 2.



Fig. 2. Graphical abstract of the MagLev-Cobra project

The vehicle is traveling on an elevated line, above pedestrians and do not disturbing the city life. In the center, is the secondary of the Linear Induction Motor (LIM) used for the traction. To the right and left of the linear motor, is the line of permanent magnets. The highlight shows the cryostat (high quality thermos bottles) inside of which are superconductors cooled with liquid nitrogen at minus  $196^{\circ}\text{C}$ , providing a levitation height of the order of 1 cm.

### ***Construction Advantages***

- Distributed load: On traditional vehicles, the load is concentrated at the point of contact between wheel and rail. On the other side, for MagLev vehicles, the load is distributed. The efforts on the supporting structure are therefore reduced, implying a lighter and cheaper infra-structure.
- Reduced weight: As the MagLev-Cobra vehicle do not need wheels, trucks and rotational motors, it weighs less than a Light Rail Vehicle (LRV). Moreover, the iron rails, sleepers and stones necessary to the infra-structure of a LRV are heavier than the magnetic rail of the MagLev-Cobra system.
- Reduced cross section: Again the absence of wheels, trucks and rotational motors make the cross section of the MagLev-Cobra half the usual one and, moreover, practically circular. These characteristics represent a big advantage for the construction of tunnels.

- Reduced radius: The MagLev-Cobra will be constructed with modules of just 1.5m length. Therefore, curves with 50m radius are acceptable.
- Higher declivity: When based on friction, the maximal declivity of a track is 4%. The linear motor traction of MagLev vehicles allows declivities of 10%, just limited by the comfort of passengers.

### ***Operational Advantages***

- Reduced energy consumption: The energy to levitate the MagLev-Cobra vehicle is just that necessary to refrigerate the YBCO superconductors with liquid Nitrogen. These superconductors are arranged inside cryostats and, therefore, the consumption is extremely low, representing an advantage when compared with the electromagnetic (EML) or electro dynamic (EDL) levitation methods. For the traction, as the resistance is limited to the air friction (there is no drag force or Coulomb friction) and the velocity is low ( $<70\text{km/h}$ ), the mean energy consumption per passenger is lower in comparison with buses and cars.
- Reduced CO<sub>2</sub> emission: As the MagLev-Cobra needs less energy and is supplied with electric energy, which in countries like Brazil comes mainly from renewable sources, the CO<sub>2</sub> emission is extremely low.
- Reduced noise: Without friction and running at low speeds, the noise produced is negligible and the vehicle does not disturb the city life, being appropriate to run on elevated lines or along rivers or channels at ground level.
- Easy of switch: As reported in [30], the change of direction can be achieved with electromagnets, substituting the traditional slow mechanical solution.
- Easier maintenance: The linear motor used for the traction do not have moving parts, making the maintenance easier than that of cylindrical motors with bearings and mechanical wear. The magnetic rail requires less maintenance than the usual rail system with dormant and alignment procedures.

### **Application niches**

The power required to levitate a vehicle based on the EML or EDL methods is approximately  $1.7\text{kW/t}$  [19]. On the other hand, the power necessary to run a MagLev vehicle at a constant speed  $v$  is mainly due to the air resistance and approximately proportional to  $v^3$ . At high speeds ( $>250\text{km/h}$ ), the levitation power becomes comparatively small in relation to the power required for traction [19], pointing to long-distance calls, where the high speed has a major role. In the case SML, the power needed for levitation is practically zero, however, the line of magnets needed to promote the diamagnetic effect is more expensive than the infrastructure of the options EML or EDL. Short distances between stations and low speeds predominate in urban transportation, opening

up here an application niche for SML. Therefore, the proposed MagLev-Cobra vehicle for urban transportation is based on SML. For high-speed connection, EML and EDL are the most appropriate technologies.

### **Implementation steps**

The development of any new engineering product can be generally divided in four steps:

#### ***Step 1: Proof of concept***

Usually a small scale prototype consolidates this step. Universities are probably the best place for this initial development.

#### ***Step 2: Functional prototype***

Here a full scale prototype must be constructed and many engineering problems are already faced: the product design, the construction methods, the industrial partners, the financial support. This phase is prone of possibilities for patent applications.

#### ***Step 3: Operational prototype***

The full scale prototype is not enough. The operational characteristics must be known and well tested. In other words, the equipment must be certified. In the specific case of a transportation vehicle, safety issues are a main concern: what happens if there is a brake failure, if there is a short circuit, if there is a storm, if the door does not close or open, if there are too many passengers, and many other questions.

#### ***Step 4: Industrialization***

Finally, the series production and commercialization can start. This last step represents a big challenge and by no means a trivial one.

The man force, the money, the difficulties, everything increases at each step. For the MagLev-Cobra technology:

***Step 1*** (2000-2006) was concluded in 2006 and reported in [20]-[23].

***Step 2*** (2008-2012). The gap of two years between these steps is due to difficulties to raise funds. In fact, 4M R\$ was necessary for this part, approximately 10 times more than the money applied in step 1. It consists of a 12 meters long line to verify the technical characteristic of the system [24].

***Step 3*** (2014-2015). Based on the experience of step 2, the next move will test the operation of the vehicle in everyday use [25], [26]. For that, a line of 200m connecting two units of the Federal University of Rio de Janeiro has been constructed.

***Step 4*** (starting at 2016). After the improvements that will result from the experience of step 3, the technology will be mature for commercialization.

This evolution is summarized in Figure 3.

Proof of concept → Functional prototype → Operational prototype → Industrialization

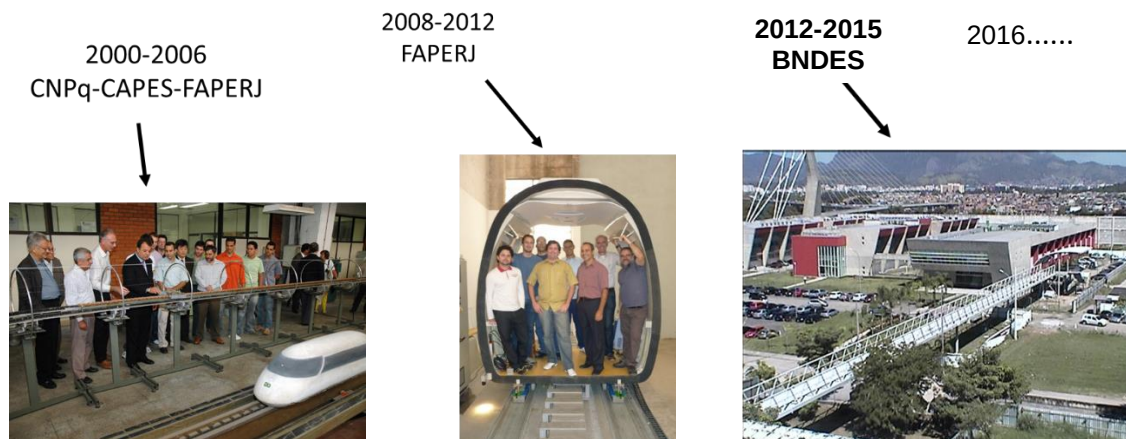


Fig. 3. The evolution of the MagLev-Cobra project

## Conclusion

The MagLev-Cobra Project satisfies the requirements of a sustainable project, since it fulfils ecological, economic and social aspects:

- Low ecological impact
  - low energy consumption
  - low audible noise
  - low impact in the civil engineering construction
- Economic advantages
  - cheaper than a subway
  - low maintenance costs
- Social extent
  - solves the urban transportation system of large cities
  - favours the generation of qualified jobs and industrialization

## References

1. ATKINS *High Speed Line Study* - Strategic Rail Authority, UK, 2002.
2. Stephan R. M., de Andrade Jr. R., Ferreira A. C. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2012, v.7, pp. 122- 127.
3. URL: <http://www.rtri.or.jp> (02/01/2011).
4. URL: <http://www.transrapid.de> (02/01/2011).
5. URL: <http://www.smtdc.com> (02/01/2011).
6. Moon F. C *Superconducting Levitation*. NY, 1994.
7. Hull J. R., Murakami M. *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, pp. 1705-1718.
8. Thompson M. T. *Proceedings of the IEEE*, 2009, vol. 97, no. 11, pp. 1758-1767.



9. Wu M. K., Ashburn J. R., Torng C. J., Hor P. H., Meng R. L., Gao L., Huang Z. J., Quang Y. Q., Chu C. W. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 58, no.9, pp. 908-910.

10. Dias D. H. N., Motta E. S., Sotelo G. G., de Andrade Jr. R. *Superconductor Science and Technology*, 2010, v. 23, pp. 75013.

11. Dias D. H. N., Motta E. S., Sotelo G. G., de Andrade Jr. R., Stephan R. M., Kuehn L., de Haas O., Schultz L. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, v.19, pp. 2120-2123.

12. Sotelo G. G., de Andrade Jr. R., Ferreira A. C. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, v. 19, pp. 2083-2086.

13. Kasal R. B., de Andrade Jr. R., Sotelo G. G., Ferreira, A. C. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, v. 17, pp. 2158-2161.

14. Stephan R. M., Nicolsky R., Neves M. A., Ferreira A. C., de Andrade Jr. R., Moreira M.A.C., Rosário M. A. P., Machado O. J. *Physica. C, Superconductivity*, 2004, v. 408, pp. 932-934.

15. Stephan R. M., de Andrade Jr. R., Santos G., Neves M. A., Nicolsky R. *Physica. C, Superconductivity*, 2003, v.386, pp. 490-494.

16. de Andrade Jr. R., Santos G., Rosário M. A. P., Neves M. A., Pereira A. S., Ripper A., Costa G. C., Nicolsky R., Stephan R. M. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, v.13, pp. 2271-2274.

17. Wang S., Wang J., Wang X., Ren Z., Zeng Y., Deng C., Jiang H., Zhu M., Lin G., Xu Z., Zhu D., Song H. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, vol. 13, no. 2, part. 2, pp. 2134-2137.

18. Schultz L., de Haas O., Verges P., Beyer C., Rohlig S., Olsen H., Kuhn L., Berger D., Noteboom U., Funk U. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, vol. 15, no. 2, part 2, pp. 2301-2305.

19. Schach R., Jehle P. Naumann R. *Transrapid und Rad Glanz Hochgeschwindigkeitsbahn: gesamtheitlicher Systemvergleich* [Transrapid und Rad Shine Hochgeschwindigkeitsbahn: gesamtheitlicher Systemvergleich]. Berlin, 2006 [Deutsch].

20. Nicolsky R., Stephan R. M., de Andrade Jr. R., Ferreira A. C. The Brazilian Project for a Superconducting Magnetic Levitation Train. *16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. Rio de Janeiro, 2000, vol.1, pp. 179-182.

21. Nicolsky R., Stephan R. M., Ferreira A. C., de Andrade Jr. R., Moreira M. A. C., Rolim L. G. B., Neves M. A., Rosário M. A. P. The Current State of the Brazilian Project for a Superconducting Magnetic Levitation Train. *17th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. CD-ROM, Lausanne, 2002.

22. Stephan R. M., Ferreira A. C., de Andrade Jr. R., Moreira M. A. C., Rolim L. G. B., Neves M. A., Rosário M. A. P., Machado O. J., Nicolsky R.

A Superconducting Magnetic Levitation Train Prototype in Closed Loop Track. *18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. CD-ROM, Shanghai, 2004.

23. Stephan R. M., Ferreira A. C., Moreira M. A. C., de Andrade Jr. R., Nicolsky R. The Brazilian SQL MagLev Train Prototype. *8th International Symposium on Magnetic Suspension Technology*. Dresden, 2005, vol. 1, pp. 39-44.

24. Stephan R. M., David E. G., de Andrade Jr. R., Sotelo G. G., Machado O. J. A Full-Scale Module of the MagLev-Cobra HTS-Superconducting Vehicle *20th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. CD-ROM, San Diego, 2008.

25. Stephan R. M., David E. G., Haas O. MagLev-Cobra: an urban transportation solution using HTS superconductors and permanent magnets. *20th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. CD-ROM, San Diego, 2008.

26. Stephan R. M., Sucena M. P., Krueger R. The Opportunity of MagLev in Respect to the Upcoming Mega Events in Brazil. *5th International Symposium Networks for Mobility*. CD-ROM, Stuttgart, 2010.

**Acknowledgements:** To FAPERJ, BNDES, CNPq and CAPES for the financial support.

**Information about authors:**

Richard Magdalena STEPHAN, Dr.-Ing., professor, UFRJ, E-mail: richard@dee.ufrj.br

Rubens de ANDRADE Junior, D.Sc., professor, UFRJ, E-mail: randrade@dee.ufrj.br

Antonio Carlos FERREIRA, Ph.D., professor, UFRJ, E-mail: ferreira@coep.ufrj.br

Felipe dos Santos COSTA, M.Sc., engineer, UFRJ, E-mail: felipe@pee.ufrj.br

Ocione José MACHADO, B.Sc., technician, UFRJ, E-mail: ocione@dee.ufrj.br

УДК 656.212

**А. В. Сугоровский**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВАГОНПОТОКОМ**

Дата поступления 19.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 24.12.2015

**Аннотация:** Рассмотрены диспетчерские приёмы внутростанционной регулировки. Созданы специальные методики и комплексы аналитических выражений, с применением которых выполнены расчёты по определению эксплуатационной и экономической целесообразности и эффективности оперативного применения различных вариантов работы с поездами с угловым вагонопоток в зависимости от количества вагонов в составе, доли вагонов углового потока и вида тяги; использования путей станционных парков не по прямому назначению (не по специализации); регулирования (чередования) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к станции с учётом положения в её парках и ряда других приёмов и методов оперативного диспетчерского регулирования.

**Ключевые слова:** диспетчерское управление, регулировочные приёмы, внутростанционная регулировка, угловой вагонопоток, экономическая эффективность.

**A. V. Sugorovskiy**

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I

## **DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY TO IMPROVE THE MANAGEMENT OF TRAFFIC VOLUMES**

**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

В многолетней практике диспетчерского регулирования на сети дорог оперативно применялись различные методы и приёмы для повышения эффективности работы сортировочных станций:

- регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к технической станции с учетом положения в ее парках;
- приём поездов в неспециализированные парки с организацией обработки (или переработки) на их путях или с последующей перестановкой составов на пути специализированных парков;
- перераспределение сортировочной работы между взаимосвязанными техническими станциями;
- регулирование выпуска поездов из узла (с технической станции) с учетом оперативной обстановки в соседних узлах;
- оперативный пропуск транзитных поездов без обработки через отдельные перегруженные технические станции;
- перенос сортировочной работы по формированию (расформированию) части поездов на промежуточные станции, ближайшие к технической;
- сгущение погрузки на участке или в узле на основе календарного планирования по направлениям и по назначениям плана формирования прилегающих станций формирования поездов.

В последние годы на станции Санкт-Петербург Сортировочный Московский (далее ПСМ), в усложненных ситуациях активно используются следующие методы:

- чередование приёма поездов в зависимости от количества вагонов в поездах по назначениям плана формирования;

- рационализация работы с угловым вагонопотоком;
- использование путей парков не по прямому назначению (не по специализации);
- регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к станции с учетом положения в ее парках;
- освобождение сортировочной горки от переработки групп местных вагонов, вагонов из ремонта и других вагонов повторной переработки, и преимущественный роспуск составов прибывающих поездов;
- освобождение горочных локомотивов от выполнения операций по осаживанию вагонов за счет максимального использования локомотивов, работающих на вытяжных путях, для подтягивания вагонов;
- заблаговременная подготовка путей сортировочного парка (ликвидация «окон» между отцепами, перестановка местных вагонов, неисправных);
- организация ускоренной обработки составов в парке приёма работниками ПТО и ПКО;
- быстрее освобождение путей для приёма поездов за счет соединения на одном пути коротких составов или групп вагонов, отцепленных от транзитных поездов;
- отправление местных вагонов на промежуточные станции прицепными группами к участковым и сквозным поездам и другие.

### **Рационализация работы с угловым вагонопотоком**

Станция ПСМ является основной, внеклассной сортировочной станцией Санкт-Петербургского железнодорожного узла, представляет собой двустороннюю станцию с последовательным расположением парков прибытия, сортировочной горки, сортировочного парка и парка отправления в каждой системе.

Сортировочные системы расположены параллельно друг другу. Нечётная система работает с вагонопотоками, поступающими со станций Санкт-Петербургского узла, со стороны Выборга и Кузнечного, а также с железных дорог Финляндии, Эстонии, Латвии, Литвы и Беларуси. Чётная система работает с вагонопотоком, поступающим со стороны Мги (Сонково, Будогощь, Кириши, Волховстрой, Петрозаводск, Бабаево) и Москвы (Бологое, Малая Вишера, Чудово, Новгород, Колпино).

На станции значительная доля от общего вагонопотока приходится на угловой поток, поэтому выбор варианта работы с ним является важной составляющей комплекса оперативных мер, способствующих повышению уровня использования перерабатывающей способности и ритмичности работы станции.

Маршрут перестановки вагонов углового потока из нечётной системы в чётную показан на схеме станции (рис.1).

По 1-му варианту состав поезда с угловым потоком из парка прибытия ПП-1 нечётной системы расформировывают на крайние пути парка СП-3. После накопления угловой передачи и взаимного согласования времени и порядка её пропуска дежурными парка отправления ПО-5, парка прибытия ПП-2 и парка СП-3, производится перестановка вагонов углового потока маневровым локомотивом с 25-го пути парка СП-3 нечётной системы в парк ПП-2 чётной, без сопровождения составителем поездов, по команде дежурного парка СП-3, переданной машинисту по маневровой радиосвязи, на повторную переработку на горке чётной системы.

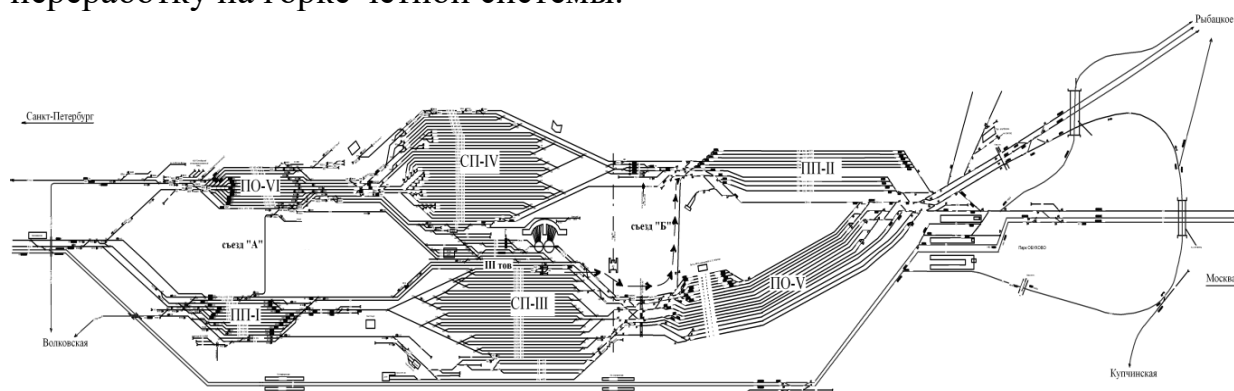


Рис.1. Схема станции ПСМ

→ - - маршрут перестановки вагонов углового потока

По 2-му варианту, при наличии в поезде, прибывающем в парк ПП-1 нечётной системы, более половины вагонов углового потока, маневровый диспетчер нечётной системы, после согласования с диспетчером чётной системы, даёт указание дежурным парков ПП-1 и ПО-5 о пропуске поезда по III товарному пути сразу в парк приёма ПП-2 чётной системы станции.

Рассмотрим, как при этих вариантах работы с вагонами углового потока будут изменяться эксплуатационные расходы.

Эксплуатационные расходы на обработку состава по различающимся параметрам при работе с угловым вагонопотоком по 1-му варианту включают в себя: затраты на расформирование всего состава; затраты на перестановку вагонов углового потока; затраты на повторную переработку вагонов углового потока. По 2-му варианту – затраты на перемещение состава поездным локомотивом в другую систему; затраты на расформирование всего состава; затраты на перестановку вагонов углового потока; затраты на повторную переработку вагонов углового потока.

Сопоставлением эксплуатационных расходов по 1-му и 2-му вариантам установлено, при каких долях вагонов углового потока в составе будет целесообразно применять тот или иной вариант работы с



ним. При этом исследовано влияние вида тяги. Результаты расчётов при электрической и тепловозной тяге представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Эксплуатационные расходы при различных вариантах работы с угловым вагонопотоком при электрической тяге

| % угл. потока | Эксплуатационные расходы, руб. |             | Сравнение затрат, руб. |
|---------------|--------------------------------|-------------|------------------------|
|               | 1-й вариант                    | 2-й вариант |                        |
| 0             | 785,85                         | 5825,3      | -5039,45               |
| 2             | 876,85                         | 5734,3      | -4857,45               |
| 4             | 967,85                         | 5643,3      | -4675,45               |
| 54            | 3242,85                        | 3368,3      | -125,45                |
| 56            | 3333,85                        | 3277,3      | 56,55                  |
| 58            | 3424,85                        | 3186,3      | 238,55                 |
| 96            | 5153,85                        | 1457,3      | 3696,55                |
| 98            | 5244,85                        | 1366,3      | 3878,55                |
| 100           | 5335,85                        | 1275,3      | 4060,55                |

Таблица 2

Эксплуатационные расходы при различных вариантах работы с угловым вагонопотоком при тепловозной тяге

| % угл. потока | Эксплуатационные расходы, руб. |             | Сравнение затрат, руб. |
|---------------|--------------------------------|-------------|------------------------|
|               | 1-й вариант                    | 2-й вариант |                        |
| 0             | 785,85                         | 6234,8      | -5448,95               |
| 2             | 876,85                         | 6143,8      | -5266,95               |
| 4             | 967,85                         | 6052,8      | -5084,95               |
| 58            | 3424,85                        | 3595,8      | -170,95                |
| 60            | 3515,85                        | 3504,8      | 11,05                  |
| 62            | 3606,85                        | 3413,8      | 193,05                 |
| 96            | 5153,85                        | 1866,8      | 3287,05                |
| 98            | 5244,85                        | 1775,8      | 3469,05                |
| 100           | 5335,85                        | 1684,8      | 3651,05                |

На основе данных табл. 1 и табл. 2 построены графики, рис. 2 и 3.

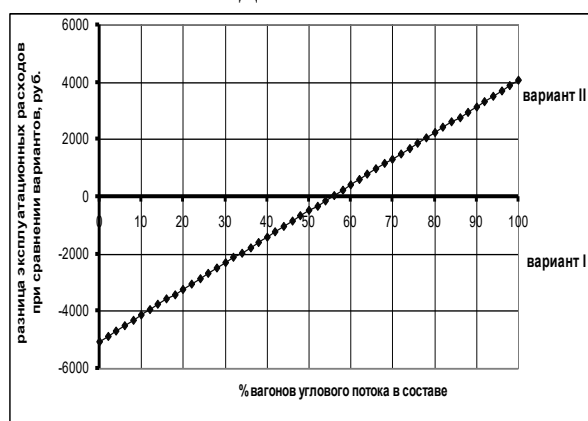


Рис. 2. Целесообразность применения различных вариантов работы с вагонами углового потока при электрической тяге

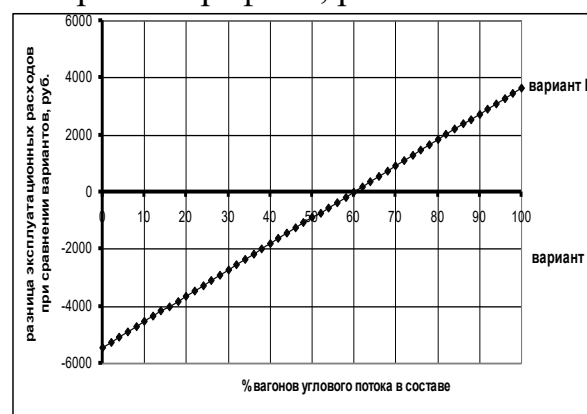


Рис. 3. Целесообразность применения различных вариантов работы с вагонами углового потока при тепловозной тяге

Из графика рис. 2 видно, что при 56% вагонов углового потока в составе поезда целесообразно будет применять II-й вариант обработки состава — нечётный поезд с угловым потоком принимать сразу в чётную систему станции.

Из графика рис. 3 видно, что при тепловозной тяге будет целесообразно применять II-й вариант, начиная с 60% вагонов углового потока в составе, — нечётный поезд с угловым потоком принимается сразу в чётную систему станции.



последовательным расположением парков экономия эксплуатационных расходов превышает 15 тыс. руб. на один переставленный состав.

При этом восстанавливается нормальная работа сортировочной станции; уменьшается количество «брошенный» поездов на подходах к станции из-за неприёма, что в свою очередь ведёт к значительному сокращению расходов на «бросание» и «подъём» поездов.

### **Регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к станции с учетом положения в ее парках**

Для организации ритмичной работы диспетчерские смены станции во взаимодействии с ДЦУП организуют рациональное чередование подвода транзитных и разборочных поездов к станции в соответствии с ритмом работы сортировочных устройств и приёмо-отправочных парков. Благодаря этому повышается уровень беспрепятственного приёма поездов станцией.

Чтобы установить эффективность данного регулировочного воздействия в условиях станции ПСМ, с использованием имитационного моделирования проведены эксперименты при различном процентном соотношении транзитных поездов и поездов в переработку, прибывающих на станцию в течение расчётных суток.

Схематически регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к технической станции с учетом положения в ее парках показан на рис. 5.

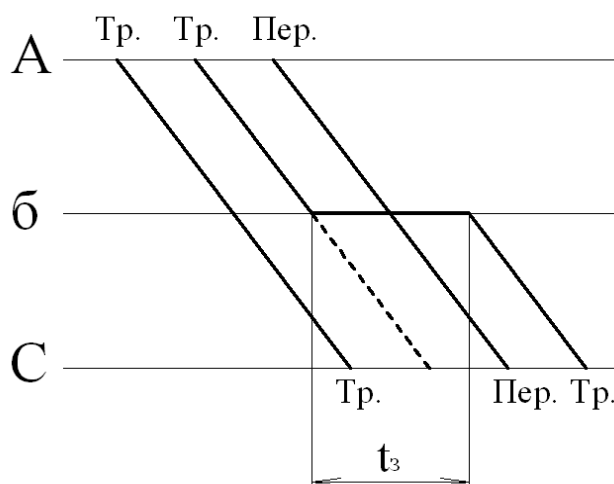


Рис. 5. Схематическое изображение приёма «Регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к технической станции с учетом положения в ее парках»

На фрагменте графика движения поездов со станции А в сторону сортировочной станции С друг за другом следуют два транзитных поезда (Тр.) и один в переработку (Пер.) с межпоездным интервалом (в расчётах принят равным 10 мин). Для того чтобы к станции С поезда прибыли чередуясь, второй транзитный поезд поставлен под обгон поездом в переработку.

При имитационном моделировании учитывается неравномерность поступления на станцию поездов с линии. Для этого используются методы теории вероятностей.

В случае неиспользования диспетчерского приёма «Регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к технической станции с учетом положения в ее парках» простои, возникающие в результате ожидания выполнения операций, значительно выше, чем с применением данного регулировочного воздействия.

В результате сравнения суммарных простоев в ожидании выполнения операций установлено, что наибольший эффект от применения приёма достигается при 50% грузовых поездов без переработки.

Также более выраженный эффект имеется и при 20% грузовых поездов без переработки.

На рис. 6 представлен фрагмент суточного плана-графика работы системы с применением диспетчерского приёма.

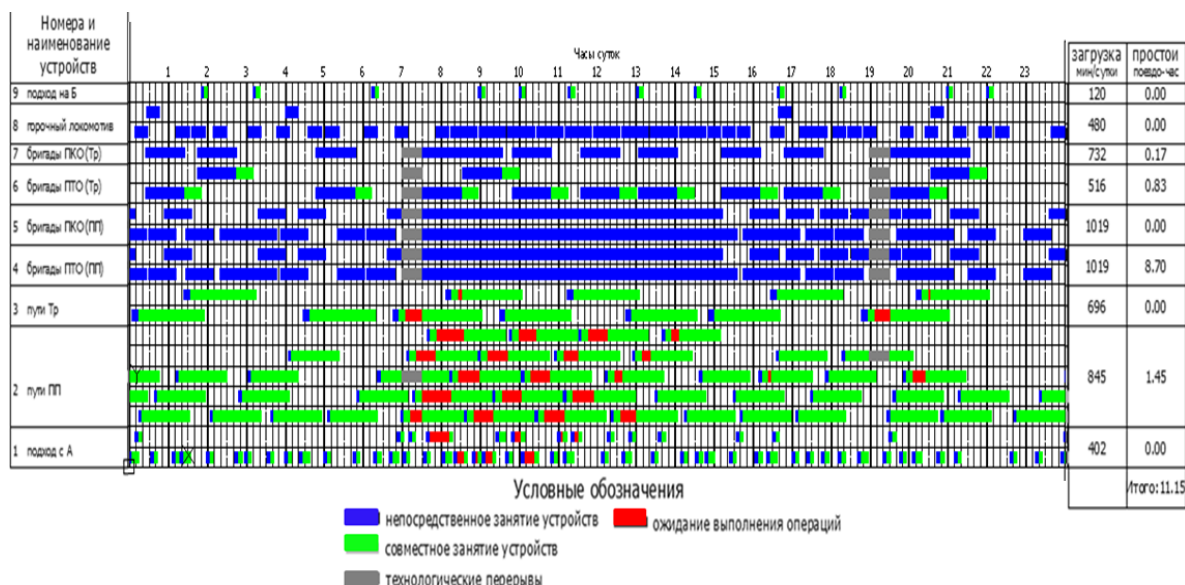


Рис. 6. Фрагмент суточного плана-графика работы сортировочной системы с использованием диспетчерского приёма

В ходе исследований проведены эксперименты с моделью, проанализирована эффективность применения регулировочного приёма в течение года ежедневно. Установлено, что в 98% случаев будет целесообразно использовать чередование подвода транзитных и перерабатываемых поездов к станции. На рис. 7 представлены графики, отображающие величину межоперационных простоев в течение одного месяца с применением и без применения диспетчерского приёма.



Рис. 7. Графики межоперационных простоев поездов в течение одного месяца

Из рис. 7 видно, что в 28-е сутки межоперационные простои без использования приёма несколько ниже, чем с его применением. Вызвано это увеличением простоев в ожидании приёма, при отсутствии свободных путей.

Выполнены расчёты по определению возможной экономии эксплуатационных расходов в результате применения данного диспетчерского приёма при электрической и тепловозной тяге.

В качестве примера приведены результаты расчёта экономии эксплуатационных расходов за счёт чередования подвода грузовых поездов при соотношении 20% транзитных поездов и 80% – в переработку:

14,7 тыс. руб. в сутки при электрической тяге;

13,5 тыс. руб. в сутки при тепловозной тяге.

В ходе исследования установлено, что применение диспетчерского приёма «Регулирование (чередование) подвода транзитных и перерабатываемых поездов к технической станции с учетом положения в ее парках» ведёт к существенному снижению межоперационных простоев,

экономии эксплуатационных расходов и более равномерной загрузке устройств сортировочной станции.

## **Заключение**

Создание информационных технологий и алгоритмов реализации прогрессивных методов и приёмов диспетчерской регулировки на сортировочных станциях, механизмов поддержки принятия экономически обоснованных оперативных решений по их применению будут способствовать повышению уровня организации движения поездов по графиковым расписаниям на железных дорогах страны.

## **Библиографический список**

1. Сугоровский А. В. Обоснование целесообразности применения методов и приёмов организации работы с вагонопотоком на сортировочной станции // Известия Петербургского университета путей сообщения – 2013 – № 2 (35) – С. 74–81.
2. Схема сортировочной станции и проект сортировочной горки / В. В. Костенко, К. И. Максимов, А. В. Сугоровский, Н. В. Ершиков. // Учебное пособие – СПб: ПГУПС, 2013. – 54 с.
3. Имитационное моделирование оперативного регулирования на сортировочной станции / Г. М. Грошев, А. В. Сугоровский. // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – № 6 (42) – С. 10–15.
4. Сугоровский А. В. Подготовка исходных данных для ввода в имитационную модель функционирования пассажирской технической станции // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 1 – С. 11–21.
5. Железнодорожные станции и узлы. Дополнительные разделы / Ефименко Ю. И., Логинов С. И., Рыбин П. К. и др. – СПб, 2014 – 144 с.
6. Сугоровский А. В. Методы рационализации работы с вагонопотоком на сортировочной станции // Вестник транспорта Поволжья. – 2013. – №3 (39) – С. 44–53.
7. Multimodal network design and assessment / Brands T. // 11th TRAIL Congress research, November 2010. – pp. 1–5.
8. The Rail and Road Freight Transport in the Co-Modality Approach / A. Campagna // Proceedings of the Workshop on Multimodal Transport and ICT: Result and Recommendations // INTERREG IIIC Project Port-Net. – 2006. – p.78–86.
9. Verteilte Ansatz zur Lösung zeitabhängige Probleme der multimodalen Verkehrsnetze / C. Galvez-Fernandez, D. Khadraoui, H. Ayed, Z. Habbas, E.

Alba // Fortschritte in Operations Research, Hindawi Publishing Corporation. - 2009 - 15 p.

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

## References

1. Sugorovsky An. V. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2013, vol. 2 (35), pp. 74-81.

2. Kostenko V. V., Maksimov K. I., Sugorovsky A. V., Brush N. V. *Skhema sortirovochnoj stancii i proekt sortirovochnoj gorki* [Driving yard and the project hump]. St. Petersburg, 2013. 54 p.

3. Groshev G. M., Sugorovsky A. V. *Vestnik transporta Povolzh'ya - Bulletin of the Volga region*, 2013, vol. 6 (42), pp. 10-15.

4. Sugorovsky A. V. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2010, vol. 1, pp. 11-21.

5. Efimenko Y. I., Loginov S. I., Rybin P. K., Gunmen M. V., Sugorovsky A. V. *ZHeleznodorozhnye stancii i uzly. Dopolnitel'nye razdely* [Railway stations and junctions. Additional sections]. St. Petersburg, 2014. 144 p.

6. Sugorovsky A.V. *Vestnik transporta Povolzh'ya - Bulletin of the Volga region*, 2013, vol. №3 (39), pp. 44-53.

7. Brands T. Multimodal network design and assessment *11th TRAIL Congress research*. 2010, pp. 1-5.

8. Campagna A. The Rail and Road Freight Transport in the Co-Modality Approach *Proceedings of the Workshop on Multimodal Transport and ICT: Result and Recommendations*. INTERREG IIIC Project Port-Net, 2006, pp.78-86.

9. Galvez-Fernandez C., Khadraoui D., Ayed H., Habbas Z., Alba E. *Verteilte Ansatz zur Lösung zeitabhängige Probleme der multimodalen Verkehrsnetze* [Distributed Approach for Solving Time-Dependent Problems in Multimodal Transport Networks]. *Advances in Operations Research*, Hindawi Publishing Corporation, 2009. 15 p.

10. Loginov S. I., Efanov A. N., Efimenko Yu. I., Garbuzova Z. N. *Opredelenie ehkspluatacionnyh raskhodov po ukрупnyonnym raskhodnym*



*stavkam pri sravnenii variantov razvitiya zheleznodorozhnyh stancij i uzlov: metodicheskoe ukazanie* [Determination of operating costs by bigger expenditure rates in the comparison options for the development of railway stations and junctions: methodical instructions]. St. Petersburg, 2009. 19 p.

**Сведения об авторе:**

СУГОРОВСКИЙ Антон Васильевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

**Information about author:**

SUGOROVSKIY Anton V., Candidate of Technical Sciences, Assistant of the Department "Management of operational work" the Petersburg State Transport University.  
E-mail: gthdsq555@yandex.ru

**В. В. Костенко, М. В. Четчуев, В. П. Фёдоров, Д. И. Хомич**  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **ГРУЗОВЫЕ СТАНЦИИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ЛИНИЙ**

Дата поступления 31.08.2015

Решение о публикации 20.09.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Аннотация:** На современном этапе развития магнитолевитационного транспорта чётко обозначилась тенденция его разделения по роду движения на пассажирский и грузовой. Одним из наиболее перспективных направлений развития грузового магнитолевитационного транспорта являются контейнерные перевозки. До настоящего времени в аспекте магнитолевитационного транспорта вопросы проектирования специализированных грузовых станций, необходимых для организации контейнерных перевозок, практически не исследовались.

Проанализировав принципы и технологию работы существующих контейнерных терминалов на традиционном железнодорожном транспорте, можно сделать вывод, что контейнерные магнитолевитационные станции следует сооружать исходя из условия обеспечения возможности выполнения трёх основных видов операций: грузовые, диспетчерские и обслуживание подвижного состава. При этом используемые для выполнения указанных операций устройства будут включать в себе как традиционные, применяемые на железнодорожных контейнерных терминалах, так и специфические, связанные с работой транспорта на магнитном подвесе.

Особое внимание следует уделить схемным решениям грузовых магнитолевитационных станций. При существующем состоянии вопроса, логично предположить, что первые грузовые магнитолевитационные станции и непосредственно места погрузки и выгрузки контейнеров будут проектироваться по схемам тупикового типа. Главным требованием к схемам таких станций будет обеспечение поточности процесса переработки и продвижения контейнеров.

В статье предложено три возможных варианта организации работы магнитолевитационной контейнерной станции, обеспечивающих выполнение вышеуказанного требования. Основным отличием рассмотренных вариантов является способ перемещения магнитолевитационных платформ с одного пути на другой. В первом случае для этого предложено использовать магнитную стрелку и тупиковый путь, во втором варианте – специальное устройство, работающее по аналогии с трансбордером, а в третьем варианте – петлевой ход. Анализ разработанных вариантов показал, что в ближайшей перспективе наибольшую вероятность практической реализации имеет вариант с устройством трансбордерного типа.

Исходя из этого, в статье предложены две принципиальные схемы грузовой магнитолевитационной станции, отличающиеся перерабатывающей способностью. Для каждой схемы подробно описана технология её работы.

**Ключевые слова:** магнитолевитационные линии, грузовые станции, схемные решения, размещение грузовых устройств и механизмов, организация погрузочно-разгрузочных работ.

**V. V. KOSTENKO, M. V. CHETCHUEV,  
V. P. FEDOROV, D. I. KHOMICH**

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I  
**FREIGHT STATIONS FOR LINES OF MAGNETIC LEVITATION**

**Abstract:** At the present stage of development of a transport of magnetic levitation, there is a clear trend of its division by the nature of the traffic flows, i.e. for passenger and cargo transportation. One of the most promising areas of freight maglev transport is container transportation. So far, the aspects of designing the freight stations required for container shipments by this type of transport were not broadly explored.

After analyzing the principles and technology of existing container terminals within the traditional rail transport, it can be concluded that the maglev container stations should be constructed on the basis of conditions to ensure the possibility of the three main types of operations: freight, marshaling, and maintenance of rolling stock. Meanwhile, the execution of these operations will require the traditional devices, which are used at railway container terminals, and specific, which related to work of transport on magnetic suspension.

Particular attention should be paid to the decision-making on the schemes of maglev freight stations. With the current state of the problem, it is logical to assume that the first types of these stations and sites for loading and unloading of containers will be designed according to deadlock schemes. The main requirement for schemes of such stations would be the support of container flows promotion and their processing. The article suggested three possible options for the organization of the maglev container stations, ensuring fulfillment of this requirement.

The main difference between the considered options is the way to move platforms from one track to another. In the first case, it is proposed to use a magnetic switch and a dead-end rail track, in the second option - a special device that works similarly to transborder, while the third option - a loop route. Analysis of the developed variants showed that in the short term, the greatest likelihood of practical implementation would have a version with the transborder device type.

On this basis, the article proposed two principal schemes of maglev freight stations that differ by the processing capacity. For each scheme, the detailed technology of work is considered.

**Keywords:** lines of magnetic levitation, freight stations, circuits stations, a location of cargo devices and mechanisms, an organization of loading and unloading operations

## **Введение**

Научные разработки магнитолевитационных транспортных систем (МЛТС) подошли к тому этапу, когда параллельно с решением фундаментальных технических проблем движения транспортных единиц на магнитном подвесе следует приступить к разработке вопросов

технологии перевозочного процесса и взаимодействия различных видов транспорта, что позволит начать подготовку к проектированию первых линий.

В разработках систем магнитолевитационного транспорта чётко обозначилась тенденция специализации линий по роду движения на пассажирские (в том числе междугородные высокоскоростные и городские) и грузовые [1, 2, 3, 4]. В разрезе грузовых перевозок наиболее перспективным для МЛТС является контейнерное сообщение. Магнитолевитационные контейнерные линии, по другой терминологии «контейнерные мосты», из пункта «А» в пункт «Б» должны иметь в этих пунктах комплексы сооружений, предназначенных для начально-конечных грузовых операций, а также для текущего обслуживания и ремонта подвижного состава. На традиционных железных дорогах такие комплексы называются грузовыми станциями [5]. Этот термин, на наш взгляд, следует применять и для магнитолевитационных линий, однако технология их работы и схемы будут иметь свои особенности.

Контейнерные МЛТС по принципам организации транспортировки займут промежуточное положение между рельсовыми системами с дискретным движением объединённых в поезда транспортных единиц и системами непрерывного перемещения грузов – конвейерами, трубопроводами, канатными дорогами и т.п. В этом смысле контейнерные МЛТС можно назвать дискретно-непрерывными, что должно быть учтено при разработке принципиальных схем грузовых станций.

### **Назначение грузовых станций магнитолевитационных линий и основные выполняемые операции**

По принятой классификации рассматриваемые объекты инфраструктуры относятся к грузовым специализированным станциям для контейнерных перевозок [5, 6]. Специализация на одном основном процессе требует разработки поточной технологии продвижения контейнеров, что должно обеспечить минимальные временные и финансовые затраты в расчёте на единицу переваливаемого груза.

Грузовые станции магнитолевитационных линий должны сооружаться для выполнения следующих основных операций.

#### **1) Грузовые операции:**

- погрузка контейнеров на магнитолевитационные платформы и выгрузка с них;
- сортировка и хранение контейнеров;
- погрузка контейнеров на транспортные средства морского, речного, железнодорожного или автомобильного транспорта и выгрузка с них.

2) Обслуживание подвижного состава (текущий осмотр, техническое обслуживание и ремонт магнитолевитационных платформ).

3) Диспетчерские операции:

- приём и отправление магнитолевитационных платформ;
- отсортировка платформ, требующих сервисного обслуживания или ремонта;
- погашение неравномерности движения (накопление платформ, отставка в резерв, выдача из резерва).

## **Основные устройства**

Устройства на рассматриваемом типе станций можно условно разделить на две группы:

- необходимые на любом контейнерном терминале, независимо от видов транспорта;
- специфические устройства для магнитолевитационной части.

В первую группу входят погрузочно-разгрузочные механизмы, площадки хранения и сортировки контейнеров. Эти устройства целесообразно проектировать по тем же нормам, что и на железнодорожных грузовых станциях [5, 7].

Вторую группу рассмотрим подробнее. Её основу можно назвать «путевой частью» магнитолевитационной станции. В эту группу входят, во-первых, пути разной специализации – приёма, отправления, накопления и отстоя платформ, погрузочно-разгрузочные, деповские; во-вторых, стрелочные переводы и другие устройства для соединения и разветвления этих путей.

Усилия разработчиков-конструкторов направлены на то, чтобы в этих сооружениях на станциях отсутствовали дополнительные направляющие, приводные и поддерживающие механические элементы. Для этих целей должен использоваться всё тот же магнитный привод. Принципиальное отличие станционных путей от линейных заключается в том, что здесь магнитолевитационные платформы будут находиться в неподвижном состоянии или передвигаться с малыми скоростями по разным маршрутам путевой схемы. Если эти вопросы будут решены на базе магнитной левитации, схемы грузовых контейнерных станций МЛСТ будут проще, компактнее и надёжнее, чем железнодорожные.

## **Технология работы и принципиальные схемы**

При существующем состоянии вопроса развития грузового магнитолевитационного транспорта, логичным будет заключение, что

первые грузовые станции и непосредственно места погрузки и выгрузки контейнеров будут проектироваться по схемам тупикового типа [8, 9, 10]. При этом главным требованием к схемам таких станций будет обеспечение поточности процесса переработки. Для этого операции по погрузке и выгрузке контейнеров целесообразно выполнять на разных путях, а переход с пути выгрузки на путь погрузки предусматривать с противоположной стороны по отношению к въезду на станцию. Можно предложить несколько принципиальных технологических схем осуществления грузовых операций (рис. 1).

Принцип организации работы по первой схеме (рис. 1, а) следующий. Платформы с контейнерами поступают на выгрузочный путь для поочерёдной разгрузки. После снятия контейнера каждая порожняя платформа через тупиковый путь за два полурейса подаётся на погрузочный путь и после постановки контейнера отправляется на линию. Для реализации такой схемы потребуется разработка специального электромагнитного (немеханического) стрелочного перевода [2]. Кроме этого, для выполнения погрузочно-разгрузочных операций потребуются соответствующие машины и механизмы. В пилотных проектах грузовых магнитолевитационных станций могут быть задействованы традиционные устройства, такие как порталные, козловые и мостовые краны, автопогрузчики и др. При этом необходимо разработать автоматизированные механизмы закрепления и раскрепления контейнера на магнитолевитационной платформе для минимизации времени на выполнение грузовых операций.

Работа по второй схеме (рис. 1, б) в целом аналогична первой. Принципиальным отличием этого варианта является использование взамен тупикового пути специального устройства, способного осуществлять перемещение платформы в поперечном направлении. Целесообразно, чтобы подобное устройство также было разработано с применением магнитолевитационной технологии. В качестве альтернативы, для первых грузовых станций, взамен подобного устройства можно предложить использование механического трансбордера. Однако при таком варианте максимальная перерабатывающая способность всей грузовой станции в первую очередь будет определяться скоростью работы трансбордера.

В третьей схеме (рис. 1, в) для перемещения платформы с выгрузочного пути на погрузочный применён петлевой путь. Это позволит обойтись без стрелочного перевода и трансбордера, но очевидно потребует большей площади. Для проработки этого варианта вначале следует определиться с минимально возможными радиусами поворота магнитолевитационных путей.

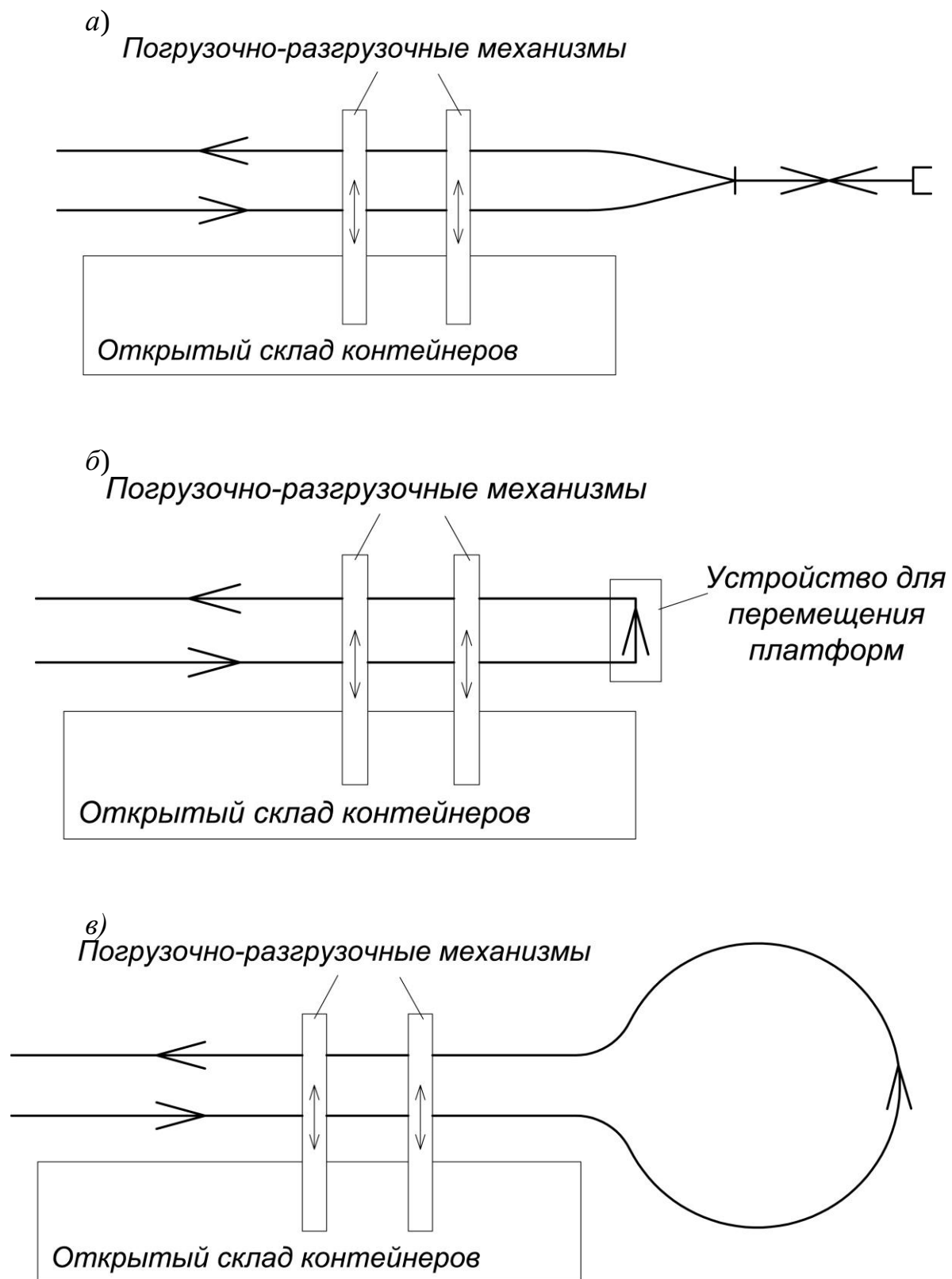


Рис. 1. Вариантные схемы мест осуществления грузовых операций



На основании второго варианта технологии передвижения магнитолевитационных платформ в процессе грузовых операций разработаны две принципиальные схемы грузовой станции (рис. 2).

Схемы отличаются друг от друга мощностью (перерабатывающей способностью) погрузочно-разгрузочных устройств.

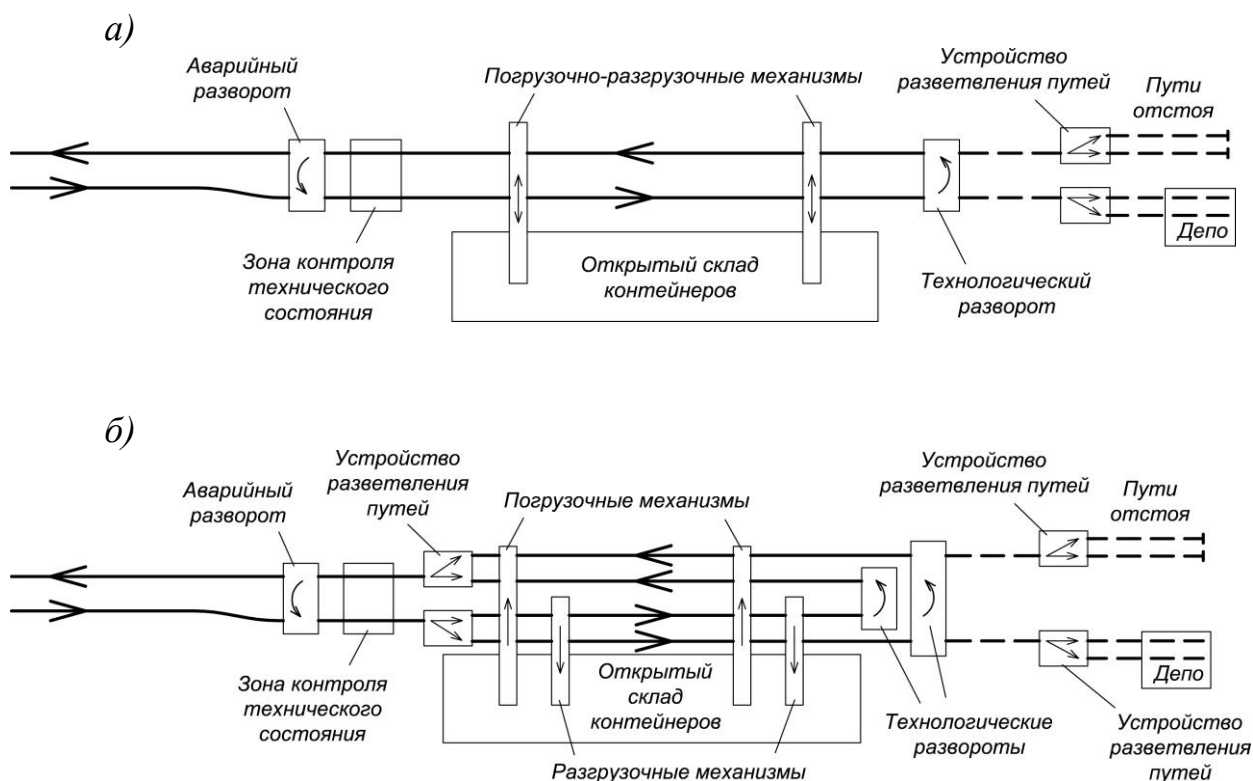


Рис. 2. Вариантные схемы грузовой контейнерной станции для магнитолевитационного транспорта

В первом варианте технология работы станции предполагается следующая. Платформы поступают с линии через зону автоматического технического контроля (рис. 2, а). На этом этапе выявляется необходимость проведения ремонтно-профилактических работ с подвижным составом. После осмотра платформы ставятся в очередь на выгрузочном пути и продвигаются к разгрузочным механизмам, позиционируясь в определённой точке (которая может меняться в зависимости от текущей ситуации на терминале) для снятия контейнера. Во время ожидания выгрузки должны быть автоматически открыты замки крепления контейнера. После снятия контейнера каждая платформа позиционируется на устройстве технологического разворота

(трансбордере). Исключения составляют платформы, «забракованные» при осмотре или требующие планового сервисного обслуживания. Они проходят трансбордер насквозь, выводятся из цикла перевозки и направляются в депо. Большая часть платформ с помощью трансбордера будет переставлена на погрузочный путь. При уменьшении размеров перевозок некоторые платформы с трансбордера съезжают в противоположную сторону, в отстой, а при увеличении – наоборот, выезжают с пути отстоя на погрузочный, проходя трансбордер насквозь.

На погрузочном пути на платформы поочередно ставятся и автоматически закрепляются контейнеры. На выходе со станции каждая платформа вновь попадает в зону автоматического контроля, по результатам которого должна быть возможность вернуть на станцию «забракованную» платформу, не останавливая движущийся поток. Для этого предполагается предусмотреть аварийный разворот (ещё один трансбордер). Большинство платформ пройдут его насквозь и будут отправлены на линию.

Второй вариант схемы грузовой контейнерной станции (рис. 2, б) будет иметь большую перерабатывающую способность за счёт параллельного выполнения грузовых операций. Грузовая станция не должна стать «узким местом» МЛТС, её перерабатывающую способность следует рассчитывать исходя из темпа перевозки контейнеров по линии. Добавление грузовых путей потребует дополнительных устройств разветвления и соединения (стрелочных переводов), задействованных в непрерывном технологическом процессе. Скорость передвижения по ним будет небольшая (не более 10-20 км/ч), что должно быть учтено при разработке соответствующих конструкций.

## **Выводы**

- 1) Первые магнитолевитационные грузовые станции целесообразно проектировать под переработку контейнеров.
- 2) На этих станциях потребуются как устройства, применяемые на обычных контейнерных терминалах, так и специфические.
- 3) Грузовые станции следует проектировать с учётом организации поточности транспортного и перегрузочного процесса.
- 4) Для обеспечения поточности операции по выгрузке и погрузке контейнеров следует выполнять на разных путях.
- 5) По результатам выполненного исследования предложены варианты принципиальных схем грузовых контейнерных станций магнитолевитационных линий.

## Библиографический список

1. Laurence E. Blow. «Dispelling the Top Ten Myths of Maglev» / Сайт <https://faculty.washington.edu/jbs/itrans/dispelling-myths-blow.pdf>. – Код доступа: <https://faculty.washington.edu/jbs/itrans/dispelling-myths-blow.pdf>. – Дата обращения: 25.05.2015 г.
2. Зайцев А. А., Антонов Ю. Ф. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации // Тр. II междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 11–23.
3. Rose C. R., Peterson D. E., Leung E. M. «Implementation of Cargo MagLev in the United States» / Сайт [http://www.researchgate.net/publication/228994479\\_Implementation\\_of\\_cargo\\_MagLev\\_in\\_the\\_United\\_States](http://www.researchgate.net/publication/228994479_Implementation_of_cargo_MagLev_in_the_United_States). – Код доступа: [http://www.researchgate.net/publication/228994479\\_Implementation\\_of\\_cargo\\_MagLev\\_in\\_the\\_United\\_States](http://www.researchgate.net/publication/228994479_Implementation_of_cargo_MagLev_in_the_United_States). – Дата обращения: 25.05.2015 г.
4. Костенко В. В., Четчуев М. В., Федоров В. П. Сравнительная характеристика высокоскоростных пассажирских наземных линий на основе систем «колесо-рельс» и «магнитный подвес» // Тр. I междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – СПб: ООО PUDRA, 2013. – С. 95–98.
5. Железнодорожные станции и узлы: учебник / Апатцев В. И., Ефименко Ю. И., Рыбин П. К. и др. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. – 854 с.
6. Станции специализированных железнодорожных магистралей. Ч.I. Станции высокоскоростных и скоростных железных дорог: учебное пособие / Суходоев В. С., Ефименко Ю. И., Томилина Г. С., Костенко В. В. – СПб.: ПГУПС, 2001. – 121 с.
7. Железные дорог колеи 1520 мм. Строительно-технические нормы СТН Ц-01-95: нормативно-технический материал / Система нормативных документов МПС РФ. Строительно-технические нормы МПС РФ. – М.: МПС РФ, 1995. – 87 с.
8. Технология грузовой и коммерческой работы станции: метод. указания / Кустов В. Н., Коровяковский Е. К., Макшин В. Н. и др. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 57 с.
9. Intelligent freight transportation / Petros A. Ioannou // CRC Press Publ., 2008. – 342 p. ISBN: 13:978-0-8493-0770-6.
10. Проектирование грузовых станций общего назначения: учеб. пособие / Рыбин П. К., Логинов С. И., Губарь М. В., Гарбузова З. Н. – СПб.: ПГУПС, 2014. – 64 с.

## References

1. Laurence E. *Blow Dispelling the Top Ten Myths of Maglev*, URL: <https://www.faculty.washington.edu/jbs/itrans/dispelling-myths-blow.pdf> (25/05/2015)
2. Zaitsev A. A., Antonov Yu. F. Kontejnernyj most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove magnitnoj levitacii [Container Bridge St. Petersburg – Moscow – based magnetic levitation]. *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. 11-23.
3. Rose C. R., Peterson D. E., Leung E. M. *Implementation of Cargo MagLev in the United States*, URL: [http://www.researchgate.net/publication/228994479\\_Implementation\\_of\\_cargo\\_MagLev\\_in\\_the\\_United\\_States](http://www.researchgate.net/publication/228994479_Implementation_of_cargo_MagLev_in_the_United_States) (25/05/2015).
4. Kostenko V. V., Chetchuev M. V., Fedorov V. P. Sravnitel'naya harakteristika vysokoskorostnyh passazhirskih nazemnyh linij na osnove sistem “koleso-rel's” i “magnitnyj podves” [Comparative characteristics of high-speed passenger land lines based systems «wheel-rail» and «magnetic suspension»]. *Trudy 1-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the I Int. Sc. Conf. “Magnetic and levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2013, pp. 95-98.
5. Apattsev V. I., Efimenko Y. I., Rybin P. K. *ZHeleznodorozhnye stancii i uzly: uchebnik* [Railway stations and junctions: the textbook]. Moscow, 2014. 854 p.
6. Sukhodoev V. S., Efimenko Y. I., Tomilina G. S., Kostenko V. V. *Stancii specializirovannyh zheleznodorozhnyh magistralej. Ch. I. Stancii vysokoskorostnyh i skorostnyh zheleznyh dorog: uchebnoe posobie* [Stations dedicated railways. Part 1. Stations and high-speed railways: tutorial]. St. Petersburg, 2001. 121 p.
7. *ZHeleznnye dorog kolei 1520 mm. Stroitel'no-tekhnicheskie normy STN C-01-95: normativno-tekhnicheskij material* [Railways 1520 mm. Construction and technical standards STN Ts-01-95: regulatory and technical material]. Moscow, 1995. 87 p.
8. Kustov V. N., Korovyakovsky E. K., Makshin V. N., Komina O. A., Semerkin A. A., Chetchuev M. V. *Tekhnologiya gruzovoj i kommercheskoj raboty stancii: metodicheskie ukazaniya* [Technology cargo and commercial work stations: guidance]. St. Petersburg, 2010. 57 p.
9. Ioannou Petros A. *Intelligent freight transportation*, CRC Press Publ., 2008. 342 p.

10. Rybin P. K., Loginov S. I., Gubar M. V., Garbuzova Z. N. *Proektirovanie gruzovyh stancij obshchego naznacheniya: uchebnoe posobie* [Design freight stations of general purpose: tutorial]. St. Petersburg, 2014. 64 p.

**Сведения об авторах:**

КОСТЕНКО Владимир Васильевич, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, к.т.н., E-mail: docentkostenko@yandex.ru

ФЁДОРОВ Владимир Петрович, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, к.т.н., E-mail: zhdsu@yandex.ru

ХОМИЧ Дмитрий Иванович, ассистент кафедры «Железнодорожные станции и узлы», Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, E-mail: dkhomich@yandex.ru

**Information about authors:**

Vladimir V. KOSTENKO, Ph. D. (Tech.), assistant professor, associate professor of the department «Railway stations and junctions», Petersburg State Transport University, E-mail: docentkostenko@yandex.ru

Maksim V. CHETCHUEV, Ph. D. (Tech.), senior lecturer of the department «Railway stations and junctions», Petersburg State Transport University, E-mail: maxetion@mail.ru

Vladimir P. FEDOROV, assistant professor, associate professor of the department «Railway stations and junctions», Petersburg State Transport University, E-mail: zhdsu@yandex.ru

Dmitry I. KHOMICH, assistant of the department «Railway stations and junctions», Petersburg State Transport University, E-mail: dkhomich@yandex.ru

## Раздел 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.3.013.3

**Д. М. Филиппов**

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского

### **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УЗЛАХ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Дата поступления 07.09.2015

Решение о публикации 01.10.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Аннотация:** Разработана математическая модель плоскопараллельного магнитного поля электромеханических узлов магнитолевитационной транспортной системы: тягового линейного двигателя и электродинамического подвеса.

Особенностью данной модели является применение подхода, позволяющего значительно повысить вычислительную эффективность метода вторичных источников за счёт более точного учёта граничных условий при дискретизации расчётной области. Это достигается путём применения закона полного тока, записанного в интегральной форме, для контуров, охватывающих каждый элемент разбиения границы. Преимущество данного подхода, по сравнению с классическим методом коллокаций, особенно явно проявляется при решении задач со сложной геометрией расчётной области, содержащей большое количество угловых точек на границе. Расчёт магнитного поля линейного двигателя с зубчатым индуктором сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов аппроксимации плотности токов намагниченности.

Задача расчёта магнитного поля электродинамического подвеса сводится к интегро-дифференциальному уравнению относительно плотности вихревых токов, с последующей его дискретизацией и решением методом последовательных приближений.

**Ключевые слова:** линейный тяговый двигатель с зубчатым индуктором, электродинамический подвес, метод вторичных источников, вихревые токи.

**D. M. Filippov**

V. I. Vernadsky Crimean Federal University

## PECULIARITIES OF SIMULATION OF MAGNETIC FIELD IN ELECTROMECHANICAL NODES OF MAGNETIC-LEVITATION TRANSPORT SYSTEM BY THE METHOD OF SECONDARY SOURCES

**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

Электромеханическая система любого магнитолевитационного наземного транспортного средства включает в себя привод с тяговым линейным двигателем и магнитный подвес, обеспечивающий левитацию. Для оптимального конструирования таких систем необходимо применять эффективные математические модели физических процессов, протекающих в них.

Основные сложности, возникающие при решении задачи расчёта электромагнитного поля линейного двигателя, связаны с конструктивными особенностями его индуктора. Как правило, он характеризуется глубоким пазом и большой плотностью тока в обмотке. В процессе работы двигателя его магнитопровод намагничивается, что приводит к возникновению сильной неоднородности магнитного поля в зубцовой и рабочей зонах. Данные обстоятельства предъявляют высокие требования к точности методов, применяемых для расчёта электромагнитного поля линейных двигателей.

Магнитное поле в подвесе, система которого содержит постоянные магниты и взаимодействующую с ними проводящую путевую структуру, в силу характера этого взаимодействия является несинусоидальным и непериодическим во времени. Под действием переменного поля в

магнитопроводе индуцируются вторичные источники: вихревые токи, электрические заряды и токи намагниченности, распределяющиеся в объёмах и на поверхностях ферромагнитных проводников с некоторыми плотностями. Данные величины являются дифференциальными характеристиками поля и, следовательно, изменяются во времени по несинусоидальному закону. Таким образом, для анализа магнитного поля в исследуемых системах необходимо разработать математическую модель, позволяющую определять мгновенные значения плотностей вторичных источников.

### Математическая модель плоскопараллельного магнитного поля линейного двигателя с зубчатым индуктором

Обратимся к конструкции индуктора линейного двигателя.

На рис. 1 изображено сечение индуктора типичного линейного двигателя, используемого в качестве тягового в высокоскоростном транспорте (рисунок построен на основании примеров из [1]). Чаще всего в таких двигателях применяется двухслойная обмотка. Как было сказано выше, ввиду наличия пазов индуктор создаёт пространственно-неоднородное магнитное поле, причём величина этого поля значительно возрастает при приближении к вершинам зубцов (рис. 2, 3). Данное обстоятельство приводит к тому, что в окрестности указанных точек при дискретизации расчётной области необходимо значительно сгущать сетку.

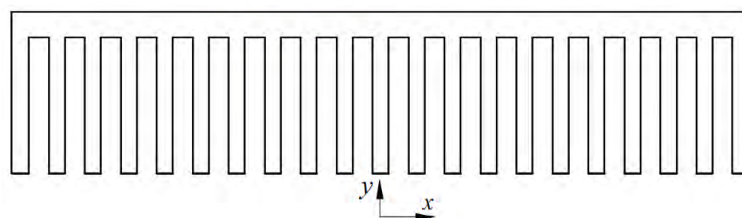


Рис. 1. Сечение индуктора линейного двигателя

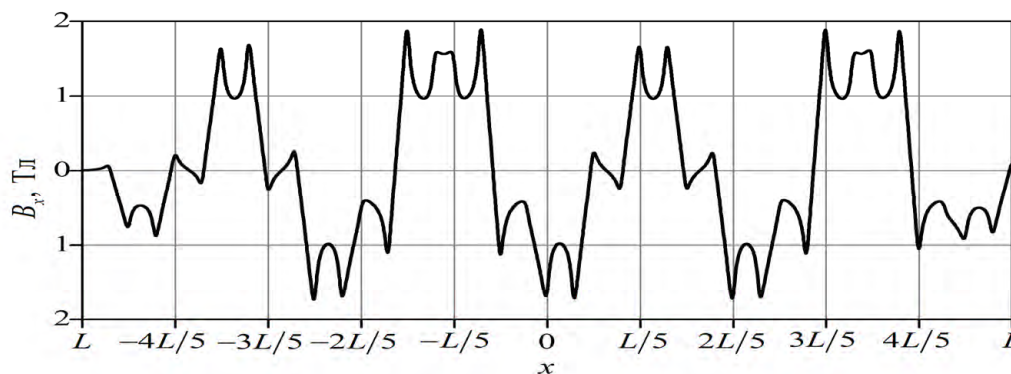


Рис. 2. Распределение  $x$ -компоненты индукции магнитного поля в рабочем зазоре индуктора линейного двигателя



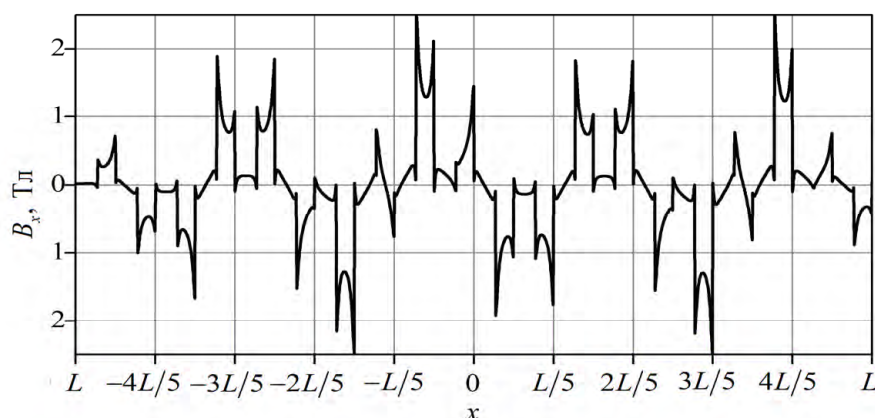


Рис. 3. Распределение  $y$ -компоненты индукции магнитного поля в рабочем зазоре индуктора линейного двигателя

В работах [2—4] для расчёта магнитного поля линейных двигателей применяется метод конечных элементов. Особенностью данного метода является необходимость построения дискретной сетки во всей расчётной области, включая окружающее электромагнитную систему пространство (вообще говоря, неограниченное) и воздушные зазоры. В линейных двигателях, применяемых в высокоскоростном транспорте, зазоры занимают области пространства, сопоставимые с объёмами магнитопроводов. Кроме того, ввиду разомкнутости магнитной цепи в пространстве создаются значительные поля рассеяния. Как следствие, при попытке построения сетки в таких областях возникает потребность в весьма значительных объёмах физической памяти компьютера. В связи с этим в данной работе предлагается математическая модель, основанная на концепции вторичных источников [5], согласно которой задача расчёта электромагнитного поля сводится к отысканию плотностей источников, индуцируемых в объёмах и на границах кусочно-однородных сред. Это приводит к тому, что расчётная область не выходит за пределы магнитопровода исследуемой электромагнитной системы.

Метод вторичных источников, в свою очередь, также обладает недостатками, которые проявляются при его численной реализации. В [6] показано, что при численном решении интегрального уравнения относительно плотности вторичных источников, даже при весьма точном решении аппроксимирующей его линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), не выполняются условия, вытекающие из законов электромагнитного поля, записанных в интегральной форме (принципа непрерывности магнитного потока и закона полного тока). С целью повышения эффективности метода вторичных источников в [6] предложено применять дополнительные интегральные соотношения, в результате чего получаются переопределённые СЛАУ, псевдорешения которых близки к точному решению интегрального уравнения. Идея,

реализованная в [6], получила дальнейшее развитие в работах [7, 8], в которых было предложено применять дополнительные интегральные соотношения, введённые в [6], для каждого элемента разбиения границы ферромагнетика, при этом интегральное уравнение не записывается вовсе. В полученных таким образом дискретных моделях для вторичных источников не задаётся система точек коллокаций, а граничные условия учитываются не в отдельных точках границы, а во всех её точках. Это приводит к повышению точности моделирования магнитного поля по сравнению с остальными методами.

Исследования показали, что метод, предложенный в [7, 8], наиболее эффективен при расчёте полей магнитных систем, обладающих сложной геометрией, характеризующейся большим количеством угловых точек на границе. В связи с этим для расчёта магнитного поля индуктора линейного двигателя целесообразно применять метод, изложенный в [7, 8].

Границу магнитопровода  $l$  разобьём на  $N^{(L)}$  малых отрезков  $\Delta l_k$  ( $i=1,2,\dots,N^{(L)}$ ). Каждый такой отрезок охватим замкнутым контуром и запишем для него закон полного тока в интегральной форме. Будем полагать, что искомая функция — плотность токов намагниченности  $j(Q,t)$  — в пределах каждого отрезка разбиения для заданного момента времени  $t$  принимает постоянное значение:  $j(Q,t)=j_k(t)$ ,  $Q \in \Delta l_k$ ,  $k=1,2,\dots,N^{(L)}$ .

Рассмотрим вывод уравнений относительно величин  $j_k(t)$  на примере некоторого ферромагнитного тела с магнитной проницаемостью  $\mu^+$ , расположенного в пространстве с магнитной проницаемостью  $\mu^-$  и заданным переменным магнитным полем  $\vec{B}_0(Q,t)$  (рис. 4).

Введём единичные нормальный  $\vec{n}_k$  и касательный  $\vec{\tau}_k$  векторы к отрезку  $\Delta l_k$ . Вектор  $\vec{n}_k$  направлен во внешность магнетика с магнитной проницаемостью  $\mu^+$ . Ось  $z$  направлена перпендикулярно плоскости рисунка. Векторы  $\vec{\tau}_k$ ,  $\vec{n}_k$  и  $\vec{e}_z$  образуют правую тройку векторов (рис. 4).

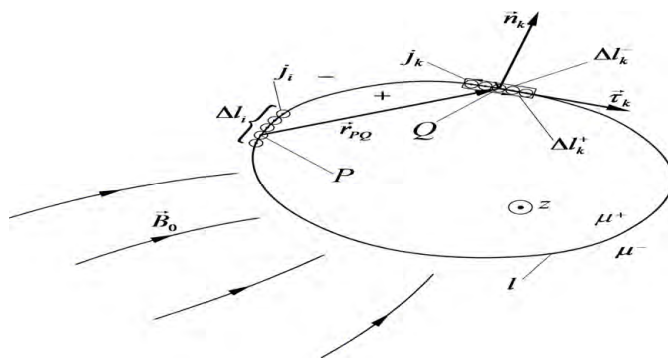


Рис. 4. Ферромагнитное тело, расположенное в плоскопараллельном магнитном поле

В соответствии с законом полного тока в интегральной форме для замкнутого контура, охватывающего отрезок  $\Delta l_k$ , можно записать

$$\int_{\Delta l_k^+} \vec{H}^+(Q, t) \vec{\tau}_k dl - \int_{\Delta l_k^-} \vec{H}^-(Q, t) \vec{\tau}_k dl = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N^{(L)}. \quad (1)$$

Векторы  $\vec{H}^+(Q, t)$  и  $\vec{H}^-(Q, t)$  представим в виде:

$$\vec{H}^+(Q, t) = (\vec{B}_0(Q, t) + \vec{B}_{j_k}^+(Q, t) + \vec{B}_j(Q, t)) / \mu, \quad k = 1, 2, \dots, N^{(L)}, \quad (2)$$

$$\vec{H}^-(Q, t) = (\vec{B}_0(Q, t) + \vec{B}_{j_k}^-(Q, t) + \vec{B}_j(Q, t)) / \mu_0, \quad k = 1, 2, \dots, N^{(L)}, \quad (3)$$

где  $\vec{B}_{j_k}^+(Q, t)$  — индукция, обусловленная токами полосы  $\Delta l_k$ ;  $\vec{B}_j(Q, t)$  — индукция, обусловленная всеми остальными токами на боковой поверхности ферромагнетика.

Далее, соотношения (2) и (3) подставляются в (1).

При выбранной кусочно-постоянной аппроксимации плотности токов намагниченности, ввиду симметрии, для каждого отрезка  $\Delta l_k$  можно получить следующие выражения:

$$\int_{\Delta l_k^+} \vec{B}_{j_k}^+(Q, t) \vec{\tau}_k dl = - \int_{\Delta l_k^-} \vec{B}_{j_k}^-(Q, t) \vec{\tau}_k dl = \frac{1}{2} \oint_{\Delta l_k^+ + \Delta l_k^-} \vec{B}_{j_k}(Q, t) d\vec{l} = \frac{\mu_0 j_k(t) \Delta l_k}{2}. \quad (4)$$

Учитывая последнее соотношение, для мгновенных значений плотности токов намагниченности получаем следующую СЛАУ:

$$j_k(t) - \frac{\lambda}{\pi \Delta l_k} \sum_{i=1}^{N^{(L)}} j_i(t) \int_{\Delta l_k} \int_{\Delta l_i} \frac{(\vec{r}_{PQ}, \vec{n}_k)}{r_{PQ}^2} dl_P dl_Q = \frac{\lambda}{\Delta l_k \mu_0} \int_{\Delta l_k} \vec{B}_0(Q, t) \vec{\tau}_k dl_Q, \quad k = 1, 2, \dots, N^{(L)}, \quad (5)$$

где  $\lambda = (\mu - \mu_0) / (\mu + \mu_0)$ .

После решения системы уравнений (5) может быть рассчитана индукция магнитного поля в любой точке  $M$  по формуле:

$$\vec{B}(M, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^{N^{(L)}} j_i(t) \int_{\Delta l_i} \frac{[\vec{e}_z, \vec{r}_{PQ}]}{r_{PQ}^2} dl_P + \vec{B}_0(Q, t). \quad (6)$$

На основании предложенной математической модели был произведён расчёт магнитного поля индуктора, изображённого на рис. 1. Результаты этих расчётов приведены на рис. 2, 3. Поскольку в [1] геометрические размеры индуктора указаны не были, то на осях абсцисс рисунков отмечены безразмерные величины (где  $L$  — длина индуктора). В расчётах были условно заданы следующие параметры индуктора:  $L = 1000$  мм, полюсное деление  $\tau = 98$  мм, ширина зубца — 22 мм, ширина паза — 27 мм, плотность тока в обмотке — 37 МА/м<sup>2</sup>. Была задана двухслойная обмотка по схеме, приведённой в [1]. Магнитная проницаемость стали индуктора полагалась постоянной и равной  $\mu = 3500 \mu_0$ .

Перейдём к рассмотрению вопроса построения математической модели магнитного поля электродинамического подвеса.

### **Математическая модель плоскопараллельного магнитного поля электродинамического подвеса**

Исследования устройств подвеса, применяемых в высокоскоростном транспорте, показали, что наибольшей электродинамической стабильностью обладают так называемые системы отталкивающего типа [9]. В устройстве подобных систем могут применяться как управляемые электромагниты (в том числе со сверхпроводящими катушками), так и постоянные магниты.

Природа усилий, создаваемых в подвесе, связана со взаимодействием магнитного поля перемещающихся первичных источников (например, постоянных магнитов) с полем вихревых токов, индуцируемых в путевом полотне. На поверхности проводящего полотна наводятся электрические заряды (если материал полотна неоднородный, то возникнут также объёмные заряды). Кроме того, будут намагничиваться ферромагнетики, входящие в магнитную цепь подвеса.

Как показано, например, в [10], на границах ферромагнитных проводников, расположенных в плоскопараллельном переменном магнитном поле, отсутствуют электрические заряды. Поэтому плоскопараллельная постановка позволяет уменьшить не только геометрическую размерность задачи, но и количество неизвестных величин, описывающих исследуемый процесс.

Большинство современных научных исследований и разработок систем подвеса наземного транспорта, основанных на использовании постоянных магнитов, предполагает применение массивов Хальбаха. Особенностью подобных систем является несимметричность магнитного потока в области над массивом и под ним, что позволяет сконцентрировать магнитное поле в рабочей области и уменьшить его в зоне пребывания пассажиров. Существуют различные модификации систем электродинамического подвеса, основанных на применении массивов Хальбаха. В [11] предложена система, которая представляет собой массив из постоянных магнитов, в промежутках между которыми расположены полюсные магнитомягкие вставки (ярмо). Массивы с постоянными магнитами устанавливаются на подвижном составе. С целью повышения левитационного качества подвеса массивы часто располагают по обе стороны относительно путевого полотна [12].

Получим уравнения относительно плотностей вторичных источников, индуцируемых в системе подвеса, предложенной в [11].

Будем полагать, что все материалы системы подвеса являются однородными и изотропными. Магнитные свойства стального ярма характеризуются магнитной проницаемостью  $\mu = const$ . Постоянные магниты изготовлены из высококоэрцитивного магнитного материала с однородно распределённой по всему объёму намагниченностью. Путевое полотно представляет собой массивную проводящую плиту из материала с удельной электрической проводимостью  $\gamma = const$ .

Неподвижную систему координат (СК) свяжем с путевым полотном. Тогда относительно рассматриваемой СК поле, создаваемое перемещающимся массивом с постоянными магнитами, будет зависеть от времени. Вследствие плоскопараллельности поля плотности вихревых токов и токов намагниченности будут иметь только одну компоненту. Мгновенное значение векторного потенциала магнитного поля в сечении путевого полотна будет иметь вид:

$$A(M, t) = A_0(M, t) + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{S_3} \delta(N, t) \ln(1/r_{MN}) dS_N + \frac{\mu_0}{2\pi} \oint_{L_2} j(P, t) \ln(1/r_{MP}) dL_P + C(t), \quad (7)$$

где  $M \in S_3$  — точка сечения путевого полотна;  $A_0(M, t)$  — мгновенное значение векторного потенциала перемещающихся магнитов;  $\delta(N, t)$  — мгновенное значение плотности вихревых токов в сечении путевого полотна;  $j(P, t)$  — мгновенное значение плотности токов намагниченности на границе ярма;  $L_2$  — замкнутый контур, ограничивающий сечение ярма;  $r_{MN}$  и  $r_{MP}$  — расстояния между точками  $M$  и  $N$  и точками  $M$  и  $P$  соответственно;  $C(t)$  — функция, не зависящая от пространственных координат.

Из закона Ома в дифференциальной форме с использованием выражения напряжённости электрического поля через электродинамические потенциалы может быть получено следующее интегро-дифференциальное уравнение:

$$\delta(M, t) - \frac{\gamma \mu_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{S_3} \delta(N, t) F(M, N) dS_N - \frac{\gamma \mu_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \oint_{L_2} j(P, t) F(M, P, t) dL_P = W_0(M, t). \quad (8)$$

В (8) обозначено:  $W_0(M, t) = \mathbf{K} w_0$ ,  $F(M, N) = \mathbf{K} f(M, N)$ ,  $F(M, P, t) = \mathbf{K} f(M, P, t)$ ;  $w_0 = -\gamma \partial A_0(M, t) / \partial t$ ,  $f(M, N) = -\ln(1/r_{MN})$ ;  $\mathbf{K}$  — оператор, действие которого на некоторую скалярную функцию  $\psi$  приводит к выражению:  $\mathbf{K} \psi = \psi - (1/S_3) \int_{S_3} \psi dS$ .

При численном решении уравнения (8) сечение проводящего путевого полотна разбивается на элементы, в пределах которых мгновенные значения плотности вихревых токов считаются неизменными:  $\delta(N, t) = \delta_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, N^{(s)}$  ( $N^{(s)}$  — число элементов разбиения сечения).

Уравнение (8) необходимо дополнить уравнениями относительно плотности токов намагниченности, которые могут быть получены аналогично уравнению (5).

Рассматриваемый период времени разбивается на  $N_T$ , в общем случае, неравных интервалов. Мгновенные значения искомых плотностей токов для каждого интервала времени обозначим следующим образом:  $\delta_k(t_i) = \delta_{k,i}$  ( $k = 1, 2, \dots, N^{(S)}$ ;  $i = 0, 1, \dots, N_T$ ),  $j_k(t_i) = j_{k,i}$  ( $k = 1, 2, \dots, N^{(L)}$ ;  $i = 0, 1, \dots, N_T$ ). Соответствующая итерационная схема примет вид:

$$j_{k,i}^{(s)} - \frac{\lambda}{\pi \Delta l_k} \sum_{m=1}^{N^{(L)}} j_{m,i}^{(s)} \int_{\Delta l_k} \int_{\Delta l_m} \frac{(\vec{r}_{PQ}, \vec{n}_k)}{r_{PQ}^2} dl_P dl_Q =$$

$$= \frac{\lambda}{\pi \mu_0 \Delta l_k} \sum_{m=1}^{N^{(S)}} \delta_{m,i}^{(s-1)} \int_{\Delta l_k} \int_{\Delta S_m} \frac{(\vec{r}_{NQ}, \vec{n}_k)}{r_{NQ}^2} dS_N + \frac{\lambda}{\Delta l_k \mu_0} \int_{\Delta l_k} \vec{B}_0(Q, t) \vec{\tau}_k dl_Q, \quad k = 1, 2, \dots, N^{(L)}; \quad (9)$$

$$\tilde{\delta}_{k,i}^{(s)} = \frac{\gamma \mu_0}{2\pi} \sum_{m=1}^{N^{(S)}} \frac{\partial \delta_m^{(s-1)}(t_i)}{\partial t} \int_{\Delta S_m} F(M_k, N) dS_N +$$

$$+ \frac{\gamma \mu_0}{2\pi} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{m=1}^{N^{(L)}} j_m^{(s)}(t_i) \oint_{L_2} F(M, P, t) dL_P + W_0(M_k, t_i). \quad (10)$$

В (9), (10) индекс  $s$  в скобках означает номер итерации.

Порядок выполнения итерационной процедуры следующий:

1. Задаётся начальное приближение для плотности вихревых токов  $\delta_{k,i}^{(0)}$ , равное  $\delta_{k,i}^{(0)} = W_0(M_k, t_i)$ , где  $k = 1, 2, \dots, N^{(S)}$ ;  $i = 0, 1, \dots, N_T$ .

2. Для каждого момента времени решается СЛАУ (9), в результате чего определяется первое приближение для плотности токов намагниченности  $j_{k,i}^{(1)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N^{(L)}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_T$ ).

3. Имеющиеся значения  $\delta_{k,i}^{(0)}$  и  $j_{k,i}^{(1)}$  подставляются в правую часть формулы (10). После осуществления всех вычислений определяется функция  $\tilde{\delta}_{k,i}^{(1)}$ ,  $k = 1, 2, \dots, N^{(S)}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_T$ .

4. По формуле  $\delta_{k,i}^{(1)} = \delta_{k,i}^{(0)} + \beta(\tilde{\delta}_{k,i}^{(1)} - \delta_{k,i}^{(0)})$  вычисляется новое приближение для  $\delta_{k,i}^{(1)}$  ( $k = 1, 2, \dots, N^{(S)}$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_T$ ), где  $\beta$  выбирается в интервале (0;1) исходя из численного эксперимента. Подбор оптимального значения коэффициента  $\beta$  обеспечивает монотонную сходимость процесса, даже если при  $\beta = 1$  этот процесс расходился.

На этом заканчивается первая итерация. Далее процесс переходит к пункту 2 и совершается вторая итерация и т.д.

5. Итерационный процесс прерывается после выполнения условия:  
 $100 \cdot \left\| \tilde{\delta}^{(s)}(M, t) - \delta^{(s-1)}(M, t) \right\| / \left\| \tilde{\delta}^{(s)}(M, t) \right\| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  — заданное малое число;

$$\left\| \delta^{(s)}(M, t) \right\| = \sqrt{\int_{S_r} \int_0^T \left( \delta^{(s)}(M, t) \right)^2 dt dS}.$$

Производные, входящие в (10), вычисляются численно по следующим формулам:

$$\partial \delta_m^{(s-1)}(t_0) / \partial t = \left( -3\delta_{m,0}^{(s-1)} + 4\delta_{m,1}^{(s-1)} - \delta_{m,2}^{(s-1)} \right) / (2\Delta T) \quad (\text{при } i = 0);$$

$$\partial \delta_m^{(s-1)}(t_i) / \partial t = \left( \delta_{m,i+1}^{(s-1)} - \delta_{m,i-1}^{(s-1)} \right) / (2\Delta T) \quad (\text{при } 0 < i < N_T);$$

$$\partial \delta_m^{(s-1)}(t_i) / \partial t = \left( \delta_{m,N_T-2}^{(s-1)} - 4\delta_{m,N_T-1}^{(s-1)} + 3\delta_{m,N_T}^{(s-1)} \right) / (2\Delta T) \quad (\text{при } i = N_T).$$

Необходимо также учитывать, что во втором интегральном члене (10) от времени зависит не только искомая функция  $j_k(t)$ , но и ядро соответствующего интеграла, а также пределы интегрирования ввиду того, что ярмо перемещается вместе с массивом магнитов относительно путевого полотна.

Для расчёта поля постоянных магнитов предлагается использовать так называемую токовую модель, где магнит заменяется рамкой с током, плотность которого равна векторному произведению вектора намагниченности магнита на нормаль к боковой поверхности.

Силовые характеристики электродинамического подвеса вычисляются по формуле ампера.

## Заключение

1. Ввиду особенности конструкции индуктора тягового линейного двигателя и характера распределения магнитного поля в его рабочем зазоре с целью снижения размерности расчётной области целесообразно применять метод вторичных источников. Дискретные модели для вторичных источников предлагается строить на основании записи закона полного тока для контуров, охватывающих каждый элемент разбиения границы магнитопровода. Данный метод также эффективен при расчёте магнитного поля электродинамического подвеса.

2. Разработанная дискретная модель может быть применена к моделированию магнитного поля линейного двигателя при учёте

насыщения участков магнитопровода. Для этого достаточно применить методику расчёта нелинейности, разработанную в [13].

3. Разработанная математическая модель магнитного поля электродинамического подвеса позволяет производить расчёты как установившегося режима работы подвеса (при постоянной скорости движения транспортного средства), так и динамического (при ускоренном движении транспортного средства). Соответствующий режим определяется заданным законом механического движения массива постоянных магнитов и ярма.

### Библиографический список

1. Gieras J. F., Piech Z. J. Linear Synchronous Motors : Transporation and Automation Systems, Boca raton – Londin – New York – Washington, CRC Press, 2000, 319 p. (англ.)

2. Manna M. S., Khajuria S., Marwaha S. Thrust Analysis and Improvement of Single Sided Linear induction Motor using Finite Element Technique // *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2013, Vol. 3, №2, pp. 563–566. (англ.)

3. Shiri A., Pahlavani M. R. A., Shoulaie A. Secondary Back-Iron Saturation Effects on Thrust and Normal Force of Single-Sided Linear Induction Motor // *Advanced Computational Techniques in Electromagnetics*, 2012, Vol. 2012, 9 p. (англ.)

4. Fujii N., Terata M., Mizuma T. High Efficiency LSM with High Flux Density for Transportation // *Jorna of Transportation Technologies*, 2011, №1, pp. 102–106. (англ.)

5. Тозони О. В., Маергойз И. Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. – Киев: Техніка, 1974. – 352 с.

6. Стадник И. П. Повышение эффективности метода интегральных уравнений расчёта магнитостатических полей в кусочно-однородных средах / И. П. Стадник, А. В. Жильцов // *Техническая электродинамика*. — 2003. – №2. – С. 3–8.

7. Стадник И. П. Метод СЛАУ расчёта статических плоскопараллельных полей в кусочно-однородных средах (вторичные источники: простой слой зарядов; кусочно-постоянная и кусочно-линейная аппроксимации) / И. П. Стадник, Д. М. Филиппов // *Техническая электродинамика*. – 2007. – № 6. – С. 20–27.

8. Стадник И. П. Метод СЛАУ расчёта статических плоскопараллельных полей в кусочно-однородных средах (вторичные источники: простой слой токов; кусочно-линейная аппроксимация) /



И. П. Стадник, Д. М. Филиппов // Техническая электродинамика. – 2008. – № 5. – С. 12 – 17.

9. Васильев С. В. Системы магнитной левитации отталкивающего типа для высокоскоростного транспорта (обзор зарубежных исследований) / С. В. Васильев, К. И. Ким, В. И. Матин, А. А. Микиртичев // Известия вузов. Электромеханика. – 1977. – № 8 – С. 882–888.

10. Стадник И. П. Метод интегральных уравнений для расчета вихревых токов в движущихся протяженных ферромагнитных проводниках с иллюстрацией на линейном асинхронном электродвигателе / И. П. Стадник, Д. М. Филиппов // Техническая электродинамика. — 2010. – № 3. – С. 14–20.

11. Jing H. A Two-Pole Halbach Permanent Magnet Guideway for High Temperature Superconducting Maglev Vehicle // *Physica C*, I 2007, pp. 426–430. (англ.)

12. Kratz R., Post R. Null-Current Magnetic Suspension System // *International Symposium on Magnetic Suspension Technology*, Turin, Italy, October 7-11, 2001. (англ.)

13. Филиппов Д. М. Методика расчета переменного во времени магнитного поля в нелинейной среде с использованием граничных интегральных уравнений / Д. М. Филиппов, И. П. Стадник // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 5–10.

## References

1. Gieras J. F., Piech Z. J. *Linear Synchronous Motors : Transportation and Automation Systems*, Boca raton. London, NY, Washington, CRC Press, 2000. 319 p.

2. Manna M. S., Khajuria S., Marwaha S. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 563-566.

3. Shiri A., Pahlavani M. R. A. *Advanced Computational Techniques in Electromagnetics*, 2012, vol. 2012. 9 p.

4. Fujii N., Terata M., Mizuma T. *Jornal of Transportation Technologies*, 2011, no. 1, pp. 102-106.

5. Tozoni O. V., Maergoiz I. D. *Raschet trekhmernykh ehlektromagnitnykh polej* [Calculation of Three-Dimensional Electromagnetic Field]. Kiev, 1974. 352 p. (Russian)

6. Stadnik I.P., Zyltsov A.W. *Tekhnicheskaya ehlektrodinamika - Technical electrodynamics*, 2003, no. 2, pp. 3-8. (Russian)

7. Stadnyk I. P., Filippov D. M. *Tekhnicheskaya ehlektrodinamika - Technical Electrodynamics*, 2007, no. 6, pp. 20-27. (Russian)

8. Stadnyk I. P., Filippov D. M. *Tekhnicheskaya ehlektrodinamika - Technical Electrodynamics*, 2008, no. 5, pp. 12-17. (Russian)
9. Vasilyev S. V., Kim K. I., Matin V. I., Mikirtichev A. A. *Izvestiya vuzov. EHlektromekhanika - Proceedings of the universities. Electromechanics*, 1977, no. 8, pp. 882-888. (Russian)
10. Stadnyk I. P., Filippov D. M. *Tekhnicheskaya ehlektrodinamika - Technical Electrodynamics*, 2010, no. 3, pp. 14-20. (Russian)
11. Jing H. *Physica C, I*, 2007, pp. 426-430.
12. Kratz R., Post R. Null-Current Magnetic Suspension System. *International Symposium on Magnetic Suspension Technology*. Turin, 2001.
13. Filippov D. M., Stadnyk I. P. *Izvestiya vuzov. EHlektromekhanika - Proceedings of the universities. Electromechanics*, 2014, no. 6, pp. 5-10. (Russian)

**Сведения об авторе:**

ФИЛИППОВ Дмитрий Максимович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии и моделирования Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского, Тел. раб.: +7(3652)608–375  
E-mail: grantarc@mail.ru

**Information about authors:**

Dmitry FILIPPOV Maksimovic, Ph.D., a senior pre-feeder of the Department of Computer Engineering and Modeling of V.I. Vernadsky Crimean Federal University  
E-mail: grantarc@mail.ru

УДК 629.439.027.34:621.318.36

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

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

Дата поступления 07.09.2015

Решение о публикации 01.10.2015

Дата публикации 22.12.2015

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

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

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

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

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

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I

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

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

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

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

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

## **Введение**

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

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

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

Предметные задачи для достижения поставленной цели состоят в следующем:

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

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

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

Данная разработка является пионерской.

### **Проблемы статической левитации и боковой стабилизации при использовании постоянных магнитов**

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

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

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

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

### **Технология сборки и монтажа магнитного рельса из постоянных магнитов**

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

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

При изготовлении магнитного рельса элементарные постоянные магниты, имеющие габариты 46х46х46 мм, собирались в квадратные трубы с поперечным сечением 50х50х50 мм и толщиной стенки 1,5 мм, выполненные из нержавеющей стали.

### **Необходимость модернизации производства по сборке магнитных полюсов**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## **Выбор типа и марки элементарных постоянных магнитов**

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

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

Для выполнения работ по гранту выбраны магниты марки N35U, которые имеют следующие параметры: остаточная индукция 1,17 Тл, коэрцитивная сила по индукции 868 кА/м, коэрцитивная сила по намагниченности 955 кА/м, энергетическое произведение (BH)<sub>max</sub> 263 кДж/м<sup>3</sup>, диапазон рабочих температур: от -60 до + 800 С.

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

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

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

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

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



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

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

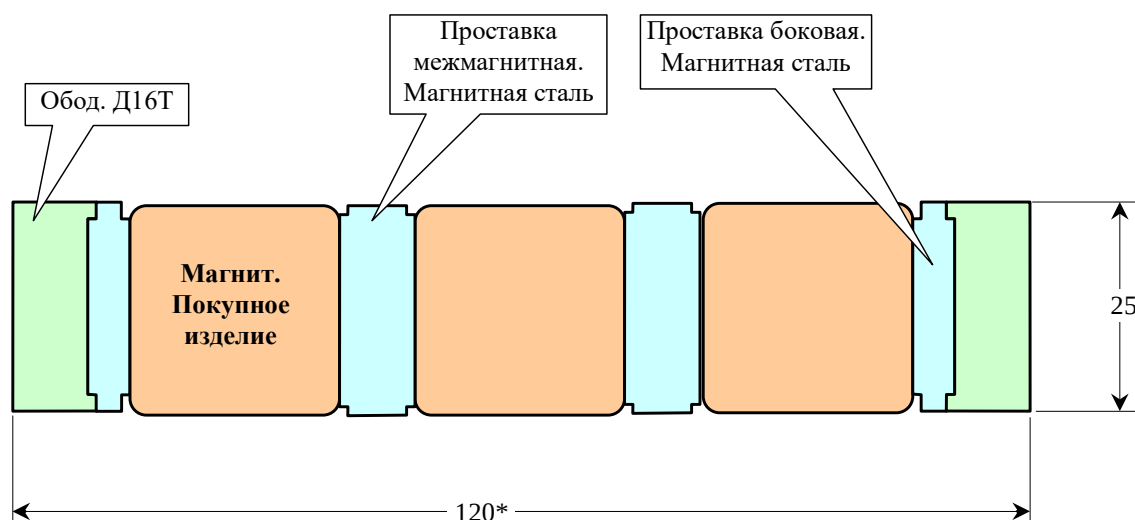


Рис.2. Поперечное сечение магнитного рельса А

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

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

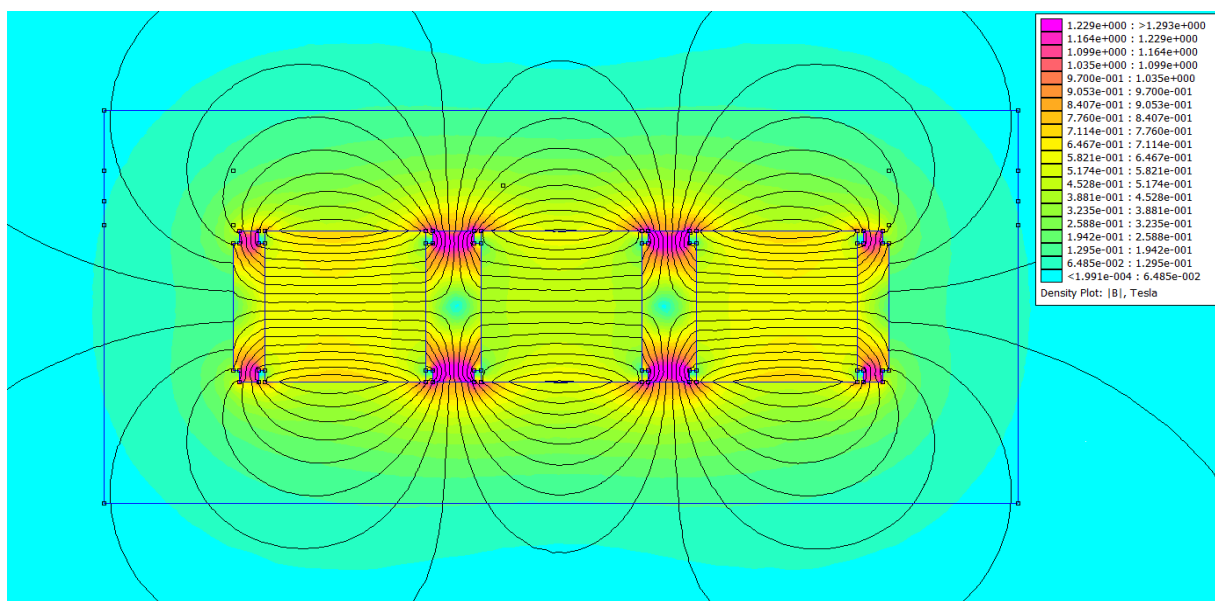


Рис.3. Линии равного магнитного потенциала магнитного рельса А

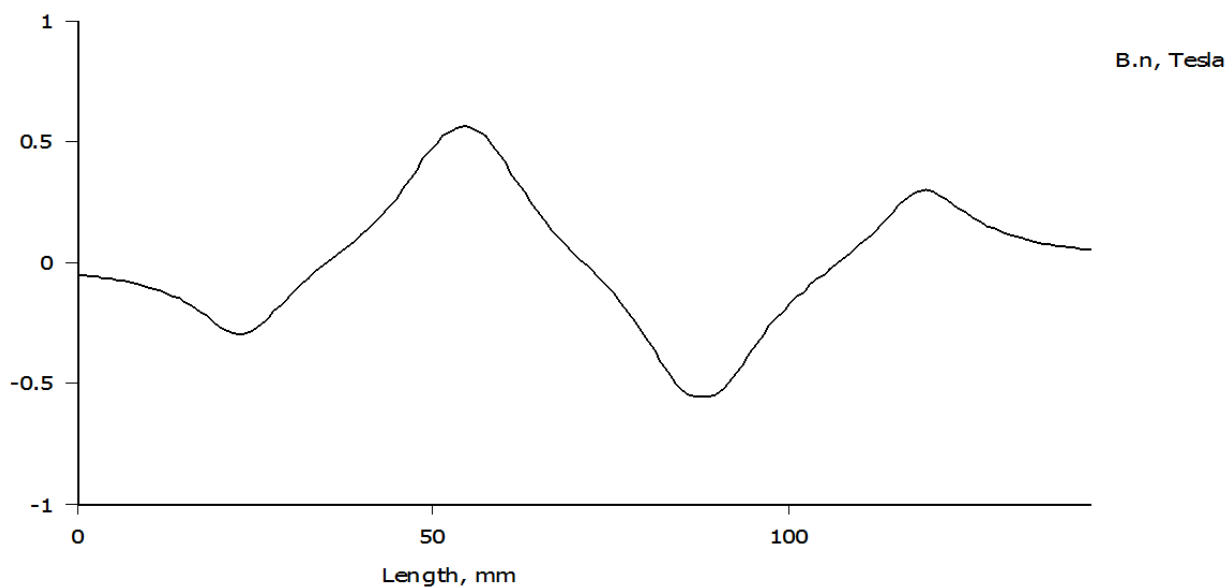


Рис.4. Нормальная (вертикальная) компонента магнитной индукции на высоте 4 мм над магнитным рельсом А

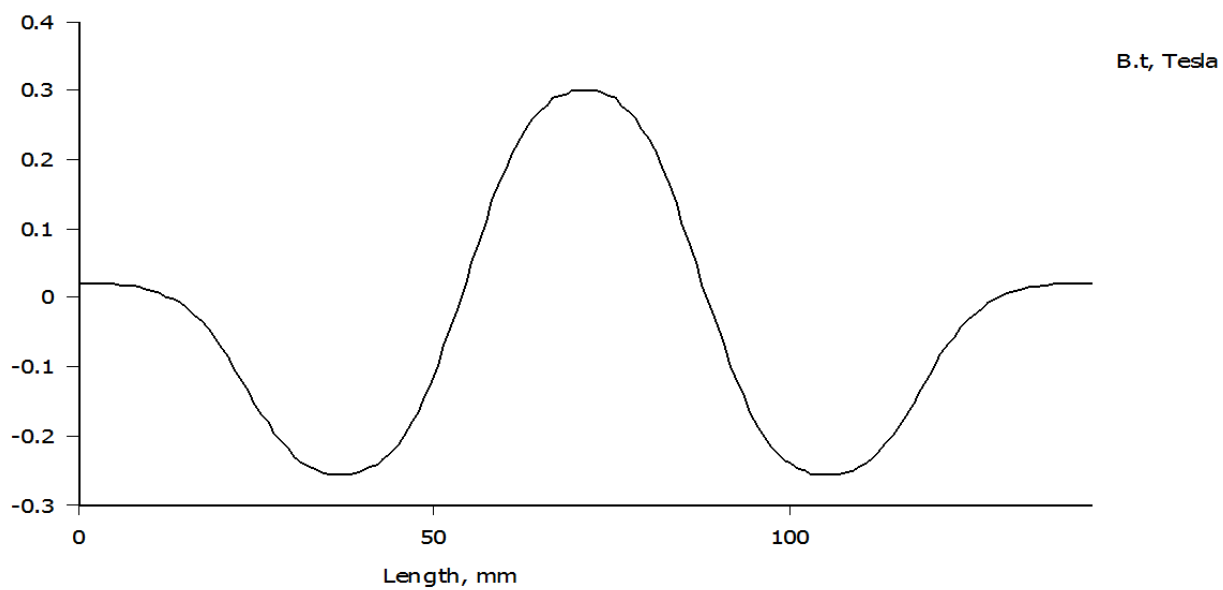


Рис.5. Тангенциальная (горизонтальная) компонента магнитной индукции на высоте 4 мм над магнитным рельсом А

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



Рис.6. Экспериментальная установка с использованием ВТСП

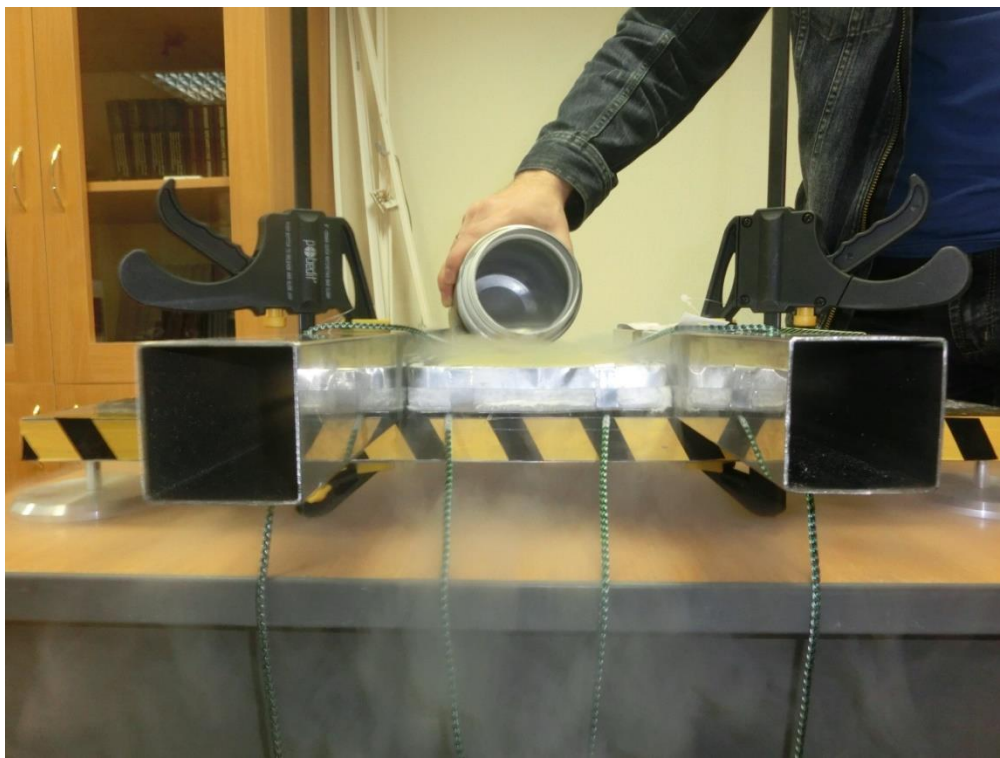


Рис.7. Захолаживание ВТСП жидким азотом

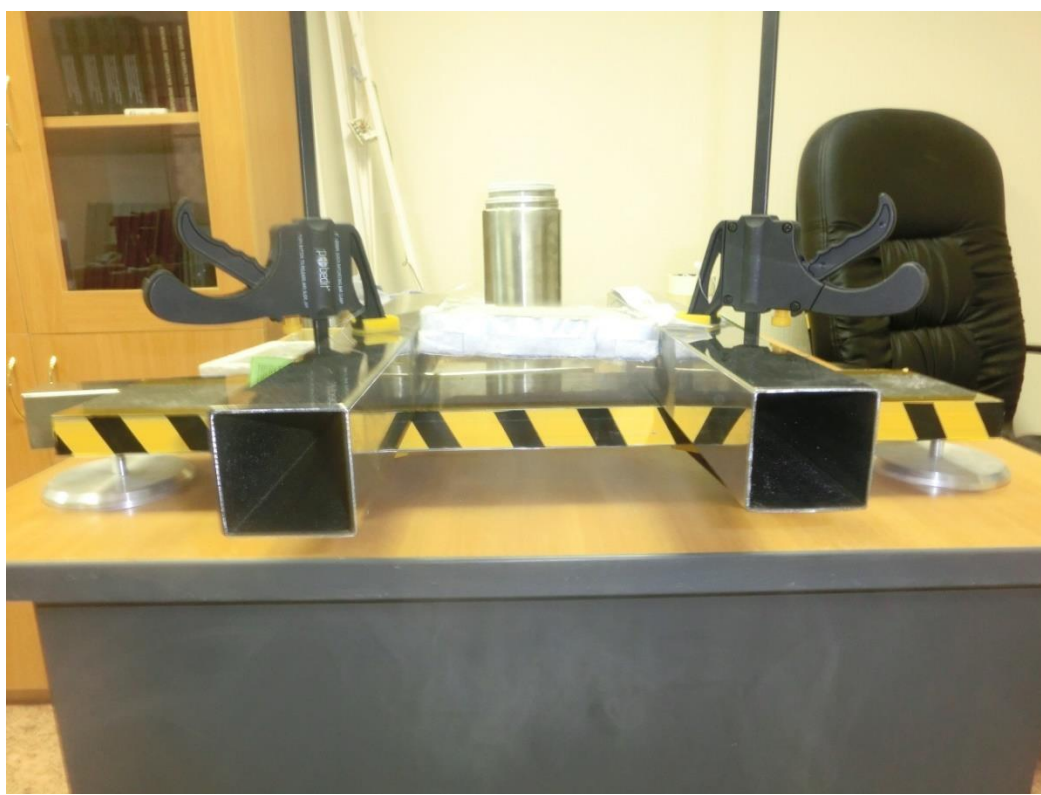


Рис.8. Демонстрация левитационного зазора



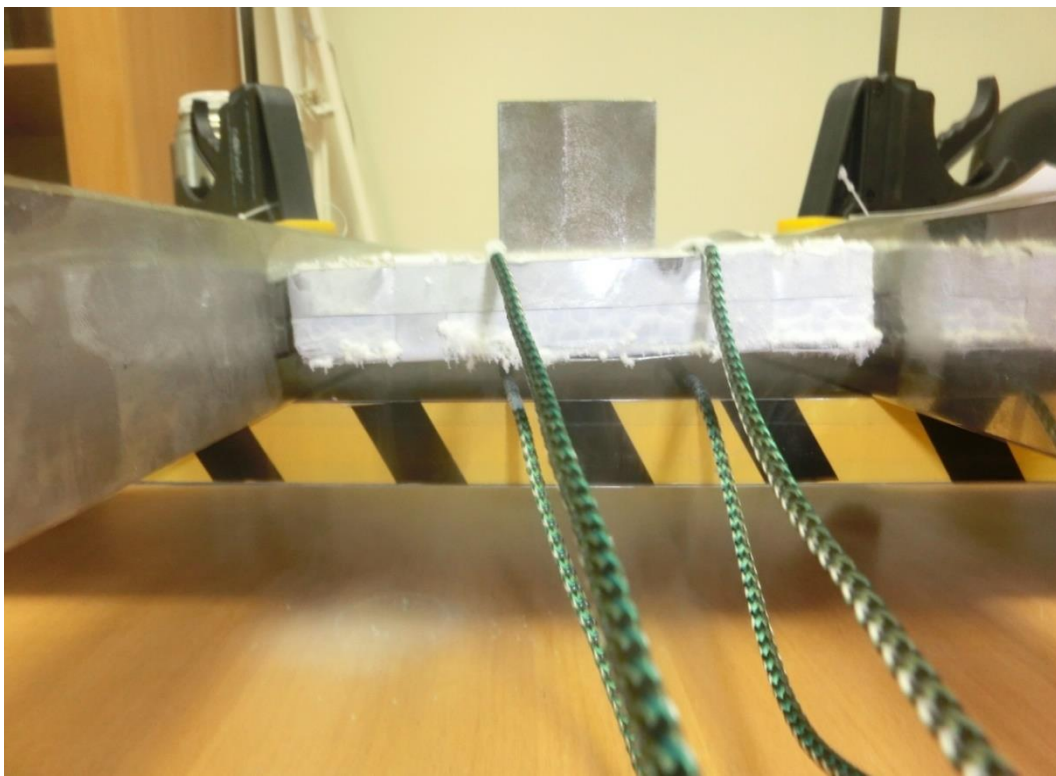


Рис.9. Демонстрация левитационного зазора под нагрузкой 1 кг  
(веревки применяются для испытания боковой устойчивости)



Рис.10. Демонстрация левитационного зазора

### **Анализ результатов эксперимента:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

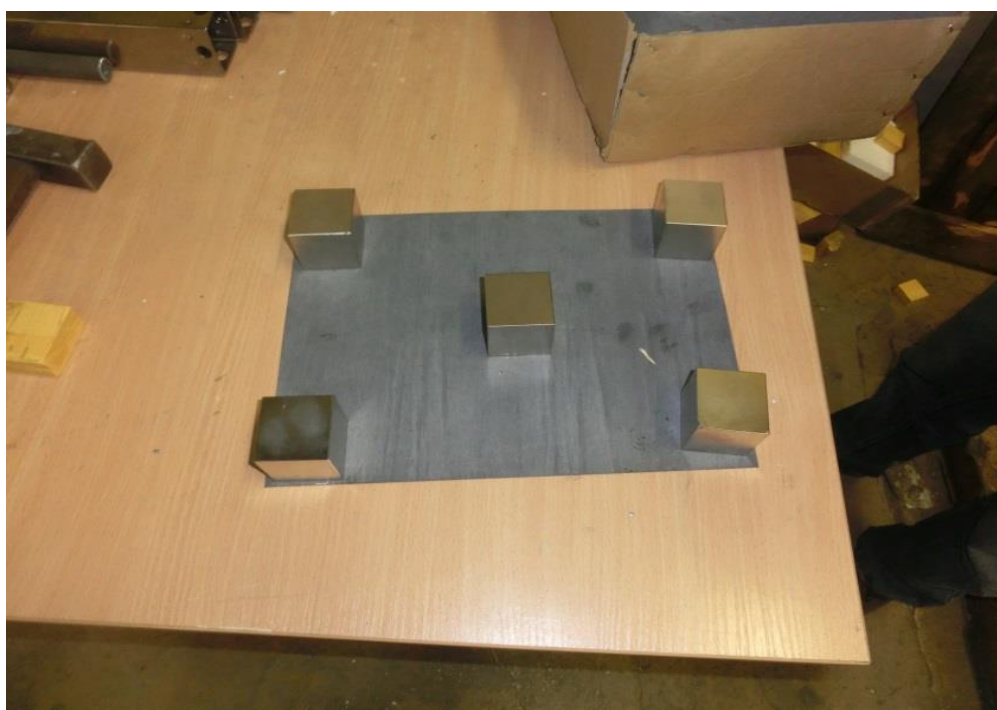


Рис.12. Магниты, подготовленные для установки в блок (после проверки направления намагниченности). Ферромагнитный лист для фиксации магнитов.





Рис.13. Установка магнита в элементарный блок



Рис.14. Устройство для установки магнитов в элементарный блок



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



Рис.16. Устройство для помещения магнитов в элементарный блок





Рис.17. Устройство для помещения магнитов в элементарный блок

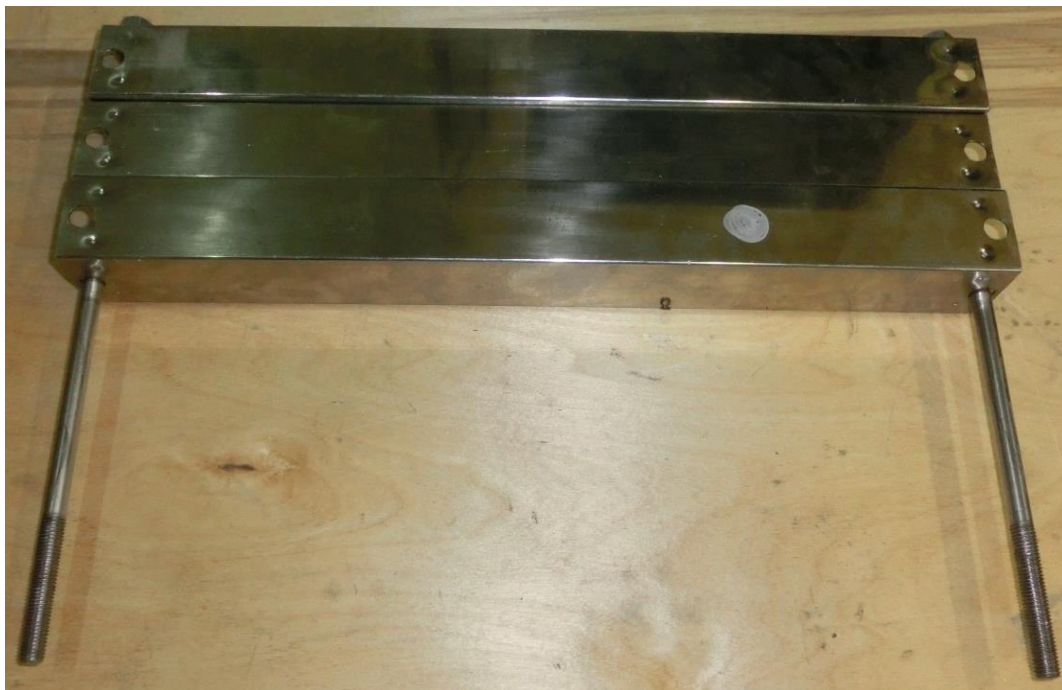


Рис.18. Сборка рельса  
(соединение магнитных блоков шпильками из нержавеющей стали)



Рис.19. Магнитный рельс



Рис.20. Магнитный рельс

На рисунке 21 показаны расчетные линии равного магнитного потенциала магнитного рельса  $B$ .

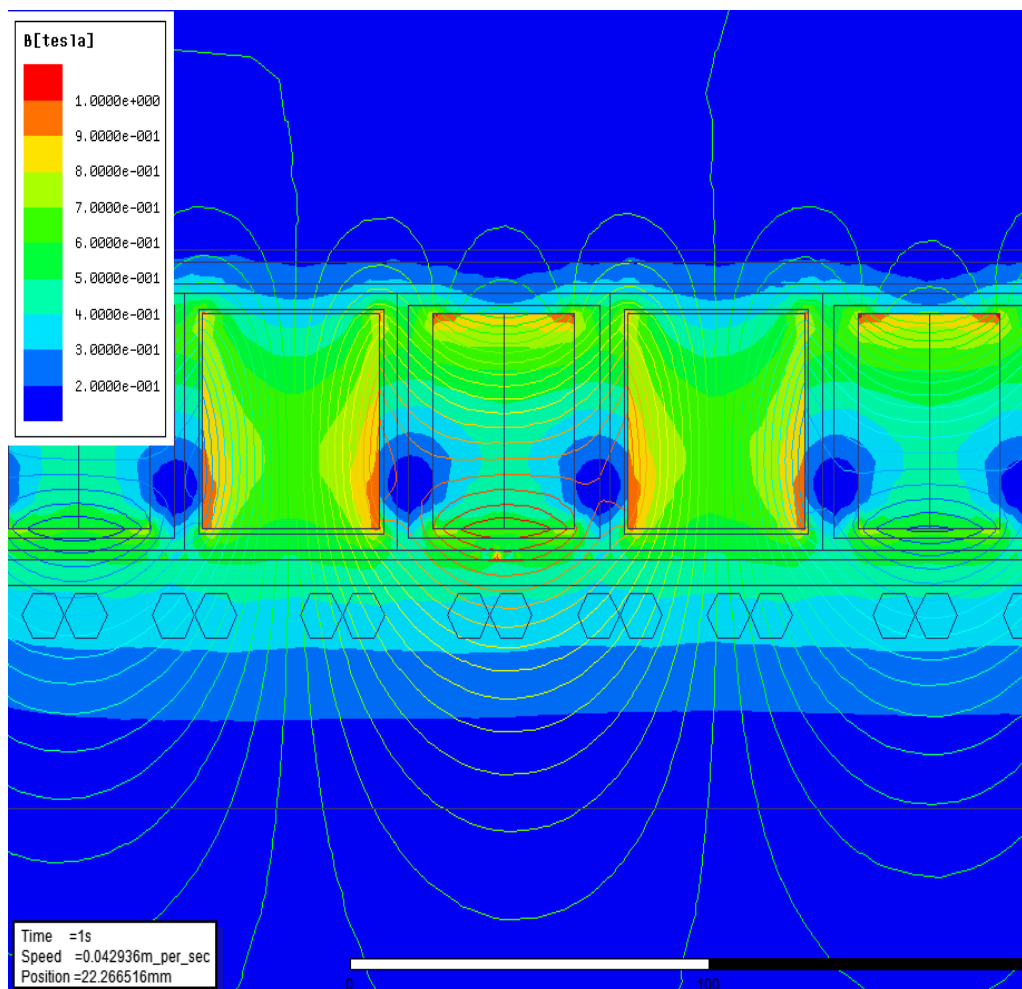


Рис.21. Расчетные линии равного магнитного потенциала магнитного рельса  $B$

## Заключение

Результаты эксперимента:

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

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

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

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

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

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

*Вывод:* Более глубокое охлаждение платформы усиливает эффект Мейсснера.

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

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

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

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



## Библиографический список

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

## References

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

2. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitacionnyj transport* [Magnetic levitation transport]. Moscow, 2015. 611 p.
3. Churin A. E., Kaznacheev S. A. Tekhnologiya sborki i montazha polyusov iz postoyannyh magnitov po skheme “arrayHalbach” [The technology of assembly and installation of the poles of permanent magnets on “arrayHalbach”] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. “Magnetic levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2014, pp. 186-190.
4. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I. Uzel levitacii kak obrashchennaya asinhronnaya mashina s korotkozamknutym rotorom [The levitation node drawn as an asynchronous machine with squirrel-cage rotor] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. “Magnetic levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2014, pp. 258-268.
5. General Atomics Low Speed Maglev Technology Development Program (Supplemental no. 3). - Final Report. - FTA-CA-26-7025.2005.
6. Morozova E. I. K voprosu sozdaniya edinoj konvejerno-magistral'noj sistemy na osnove magnitnoj levitacii [The question of creating a unified pipelined-bus systems based on magnetic levitation] *Trudy 1-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii”* (Works 1<sup>st</sup> Int. Sc. Conf. “Magnetic and levitation transport systems and technologies”). St. Petersburg, 2013, pp. 105-108.
7. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I., Hozikov Yu. F. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2013, no. 4 (37), pp. 5-17.
8. Morozova E. I. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie - Transport: science, technology, management*, 2014, no. 1, pp. 73-74.
9. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2014, no. 4 (41), pp. 5-15.
10. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A., Morozova E. I. *Vestnik transporta - Journal of transport*, 2015, no. 2, pp. 26- 30.



**Сведения об авторах:**

АНТОНОВ Юрий Федорович, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), д.т.н., профессор  
E-mail: yuri-anto@yandex.ru

МОРОЗОВА Евгения Игоревна, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), аспирант  
E-mail: moroz98.88@mail.ru

КАЗНАЧЕЕВ Сергей Александрович, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС), инженер  
E-mail: 89602574975@yandex.ru

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

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

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

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

**Information about authors:**

ANTONOV Yu. F., Petersburg State Transport University, Ph. D., Professor  
E-mail: yuri-anto@yandex.ru

MOROZOVA E. I., Petersburg State Transport University, post graduate student  
E-mail: moroz98.88@mail.ru

KAZNACHEEV S. A., Petersburg State Transport University, engineer  
E-mail: 89602574975@yandex.ru

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

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

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

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

УДК: 629.423.31

**В. В. Никитин, С. А. Гулин, Е. Г. Середа**

Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ПОЛОЖЕНИЯ ЭКИПАЖА С ЛИНЕЙНЫМИ СИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Дата поступления 23.06.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Аннотация:** Для создания тяговых усилий в высокоскоростном наземном транспорте могут использоваться линейные синхронные двигатели. Для управления такими двигателями необходимо в реальном времени получать информацию о точном положении подвижной части. В статье рассматриваются варианты исполнения бесконтактных датчиков положения и скорости, применяемые в промышленности и на высокоскоростном наземном транспорте. Предложен вариант комбинированной системы определения скорости и положения для грузового Маглев.

**Ключевые слова:** магнитолевитационный транспорт, линейные синхронные двигатели, датчики положения и скорости.

**V. V. Nikitin, S. A. Gulin, E. G. Sereda**

Petersburg State Transport University Emperor Alexander I

## **SPEED AND POSITION DETECTING SYSTEMS FOR VEHICLE WITH LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS**

**Abstract:** In high-speed ground transport linear synchronous motors are used to create a traction force. Advantages of linear synchronous motors are precise control of traction force (does not depend on friction forces) and lack of wearing parts.

Linear synchronous motors control systems use block diagrams with orientation on rotor flux linkage. In such systems, information about exact position of movable part allows splitting active and reactive components of stator currents and as result independent control of motor traction force and magnetic flux. Errors in determination position can lead to errors in d–q transformation what affect calculations performed in motor model, and impact on traction force. Moreover, information on position of vehicle is also important to ensure traffic safety. In conventional types of wheeled vehicles for determining speed and position contact probes and tachometers are used. However, in high-speed magnetic levitation transport non-contact sensors is needed. In addition, when creating control system delay in transmission of radio signals from vehicle to ground control unit should be taken into account.

This paper revives methods of speed and location detection for industry and high-speed ground transportation systems with linear synchronous motors. Also, a variant of speed and position detection system for freight Maglev was suggested.

**Keywords:** maglev train; linear synchronous motor; position and speed sensors.

## **Введение**

Магнитолевитационные экипажи являются новым поколением транспорта, они используют электромагнитные усилия для создания бесконтактного подвеса и линейные синхронные двигатели для создания тяговых усилий [1]. Преимуществами линейных синхронных двигателей являются возможность точного контроля тягового усилия (не зависит от сил трения) и отсутствие изнашивающихся частей.

В системах управления линейными синхронными двигателями используются структурные схемы с ориентацией по потокосцеплению ротора. В таких системах информация о точном положении подвижной части позволяет разделить активную и реактивную составляющие токов статора и независимо контролировать создаваемое двигателем тяговое усилие и магнитный поток. Ошибки в определении положения могут привести к погрешностям при  $d-q$  преобразованиях в системе управления, что повлияет на расчеты, выполняемые в модели двигателя, и скажется на тяговых усилиях. Более того, информация о положении экипажа важна также для обеспечения безопасности движения.

В традиционных типах колесного транспорта для определения скорости и положения используются контактные датчики и тахометры. Однако в высокоскоростном транспорте с магнитной левитацией необходимо применение бесконтактных датчиков. Также при создании систем управления необходимо учитывать задержку на передачу радиосигнала от экипажа до преобразователей, осуществляющих питание статора. Поэтому для определения положения используются датчики с малым периодом считывания (менее 5 мс), а для компенсации задержки при передаче используются специальные алгоритмы с интерполяцией [2].

Для определения положения в линейных двигателях используются три типа датчиков: индуктивные, магнитные и оптические [3]. Возможно также использование комбинированных систем определения положения.

## **Системы определения положения с оптическими датчиками**

Первые датчики, использованные в высокоточных промышленных машинах, например для резки металла, были оптическими. Несмотря на то, что к настоящему времени разработаны другие технологии определения

положения, оптические датчики по-прежнему являются самыми распространенными в промышленных двигателях.

В типичных оптических датчиках используется проградуированная шкала, которая сканируется считывающей головкой (рис. 1) [3]. Используются два базовых метода создания светового сигнала: с измерением прямого сигнала (рис. 1, а); с измерением отраженного сигнала (рис. 1, б).

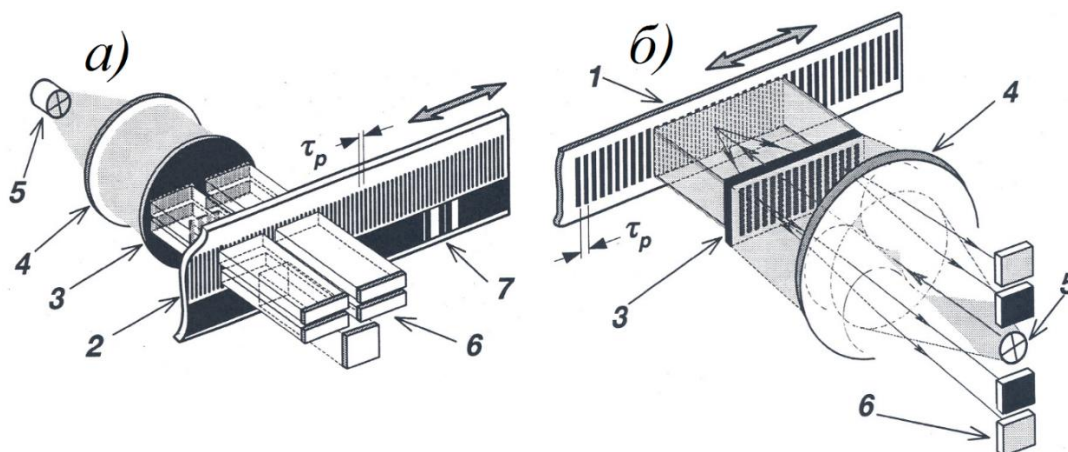


Рис. 1. Оптические датчики относительного положения:  
а) метод прямого сигнала; б) метод отраженного сигнала

- 1 – отражающая шкала;
- 2 – пропускающая шкала;
- 3 – сетка;
- 4 – линза;
- 5 – источник света;
- 6 – фотодатчики,
- 7 – контрольная метка

Свет, излучаемый источником, проходит через или отражается от проградуированной шкалы, а затем считывается через идентичные в обоих случаях фотодатчики, что приводит к появлению токовых сигналов.

Наряду с рассмотренными датчиками относительного положения используются датчики абсолютного положения (рис. 2). Такие датчики используются в системах, где информация о положении не должна зависеть от перебоев в электроснабжении, или в системах, где необходимо обеспечить безопасную работу без сбоев. Каждому положению системы соответствует двоичный код. Кодовая шкала разбита на отдельные полосы, каждая из которых считывается своим фотодатчиком.

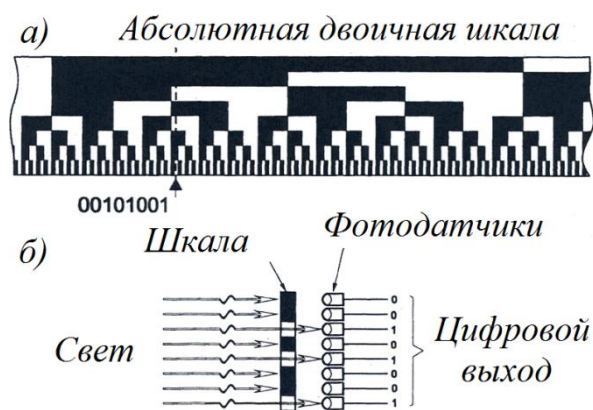


Рис. 2. Оптические датчики абсолютного положения:  
а) абсолютная двоичная шкала; б) определение двоичного кода

Главным достоинством оптических датчиков является простота достижения бесконтактных измерений при высокой точности и скорости. Точность оптических датчиков соизмерима с лазерными и на несколько порядков превосходит точность магнитных и индуктивных датчиков (высокая точность достигается за счет применения шкал с очень частой градацией,  $\tau_p$  рис. 1). Однако точность измерения напрямую зависит от состояния (загрязнения) размеченной шкалы, которая может быть использована только в закрытых помещениях.

### Системы определения положения с магнитными датчиками

Альтернативой оптическим являются магнитные датчики. Система определения положения с магниторезистивным датчиком представлена на рис. 3 [3].

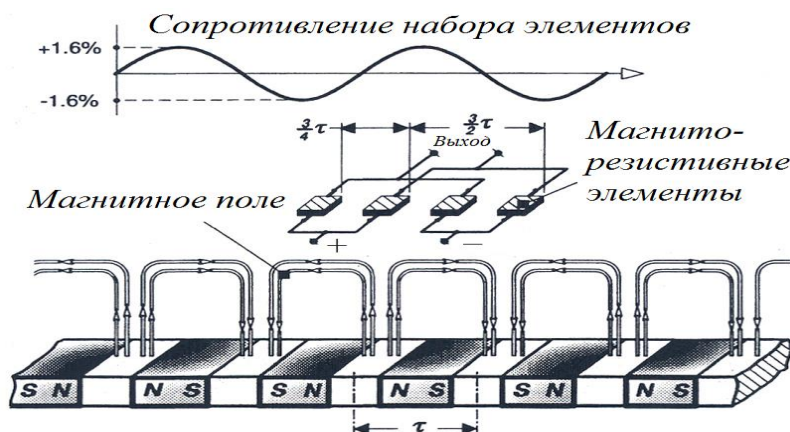


Рис. 3. Магниторезистивные датчики положения

Принцип действия основан на изменении сопротивления магниторезистивных элементов при движении вдоль шкалы с явно выраженными полюсами. Точность измерения зависит как от

полюсного деления шкалы, так и от величины воздушного зазора. Например, для обеспечения точности в 5 мм полюсное деление должно составлять 20 мм, а воздушный зазор — около 80% от полюсного деления (15 мм).

Альтернативным вариантом являются системы с датчиками на основе эффекта Холла. В таких системах датчик чаще всего движется между шкалой с явно выраженными полюсами и полосой с изменяющейся магнитной проницаемостью (структура с зубцами). Датчики на основе эффекта Холла чаще всего используются в синхронных двигателях с возбуждением от постоянных магнитов (точность зависит от длины полюсного деления).

Достоинствами магнитных датчиков являются: малая чувствительность к загрязнению, низкая стоимость, низкое энергопотребление. Недостатком является необходимость применения сложной шкалы с чередующимися полюсами.

### Системы определения положения с индуктивными датчиками

Наиболее часто в системах высокоскоростного транспорта на магнитном подвесе применяются индуктивные датчики [4-10]. Одной из самых простых разновидностей является система с индуктивным датчиком, расположенным на тележке экипажа, основанная на считывании зубцовой структуры статора линейного двигателя, расположенной в пути (рис. 4) [4-6].

Датчик состоит из четырех 8-образных катушек (рис. 5). На катушки подается резонансный сигнал с постоянной частотой. При движении катушки вдоль зубчатого статора происходит изменение ее индуктивности, что приводит к изменению амплитуды модулирующего сигнала. На основании демодуляции получают результирующий синусоидальный сигнал (рис. 6).

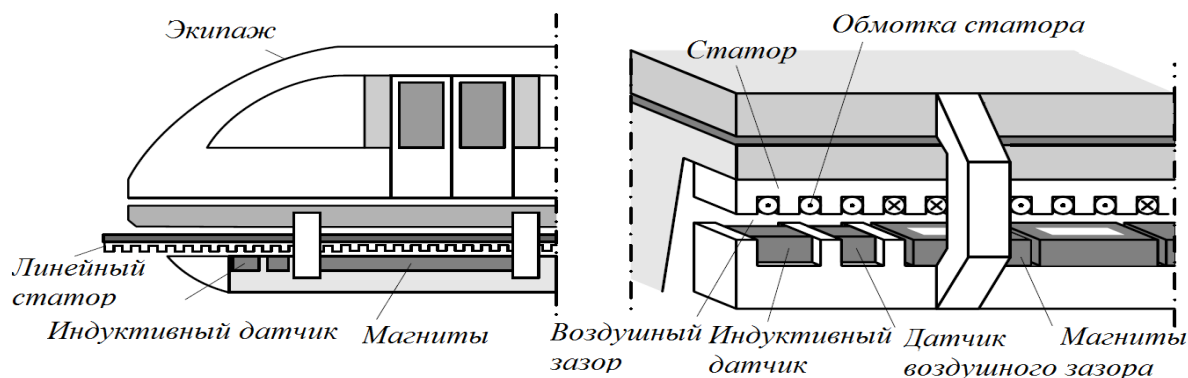


Рис. 4. Система определения положения с индуктивным датчиком

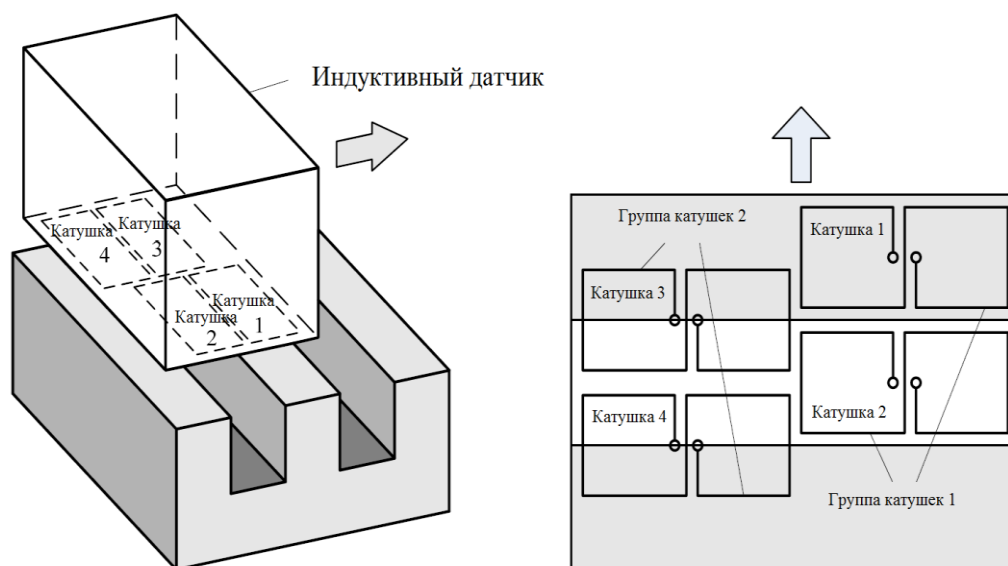


Рис. 5. Расположение катушек в датчике

Согласно относительному расположению катушек в одной группе (рис. 5), сдвиг по фазе демодулированных сигналов будет составлять  $180^\circ$  (рис. 6). Демодулированные сигналы подаются на вычитающие устройства для получения разностного сигнала. Разностный сигнал обладает формой более близкой к синусоиде и позволяет исключить влияние изменения сопротивления под воздействием температуры. Согласно относительному расположению четырех катушек, сдвиг по фазе двух разностных сигналов будет составлять  $90^\circ$ . Синусоидальные разностные сигналы в устройствах сравнения преобразуются в прямоугольные сигналы. Количество зубцовых делений, пройденных экипажем, получается на основании подсчета количества пиков прямоугольного сигнала. Направление движения экипажа определяется по фазовому сдвигу между двумя прямоугольными сигналами.

Данная система обладает существенными преимуществами, повышающими точность измерения: положение статора, с которым и должна происходить синхронизация, определяется напрямую; нет необходимости в дополнительной шкале, что исключает ошибку, связанную с ее смещением.



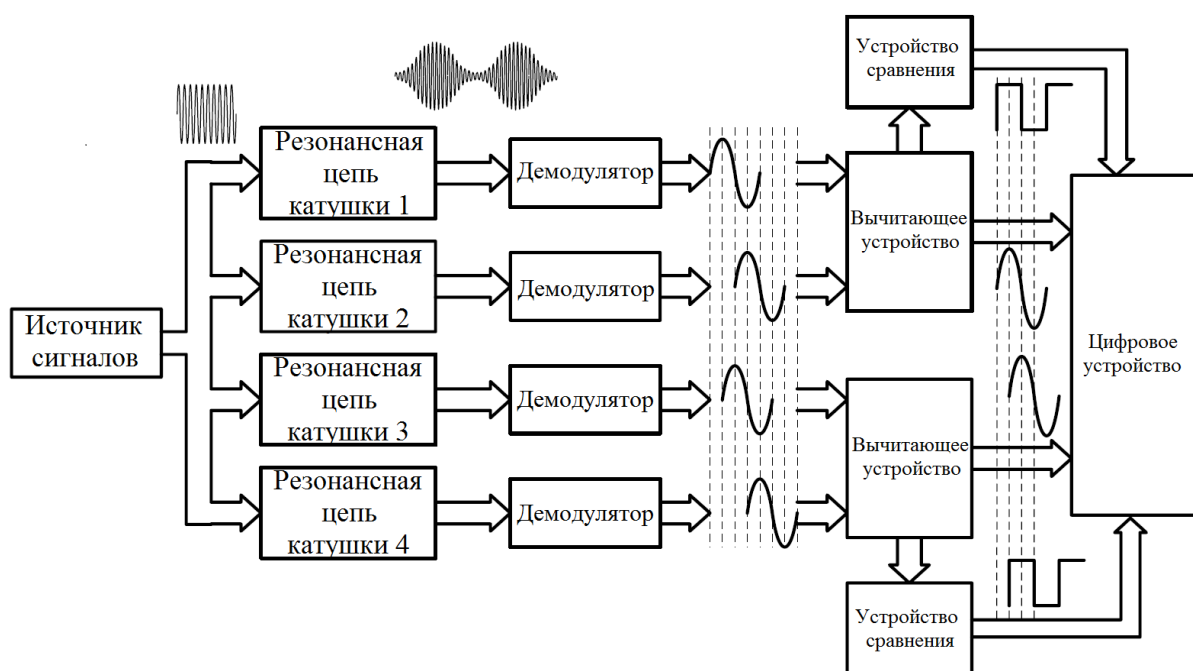


Рис. 6. Принципиальная схема работы индуктивного датчика

Рассмотренная система применима только для двигателей с ферромагнитным сердечником статора. Для определения положения безжелезных двигателей применяются пересекающиеся индуктивные кабели (рис. 7) [7, 8]. Системы на основе пересекающегося индуктивного кабеля состоят из двух частей: подсистемы возбуждения, расположенной на борту экипажа, и подсистемы датчиков определения положения, расположенной на путевой структуре. Подсистема возбуждения создает высокочастотные периодически изменяющиеся сигналы, которые поступают на передающую катушку, что приводит к образованию ЭДС в пересекающемся индуктивном кабеле, на основании которых происходит определение положения.

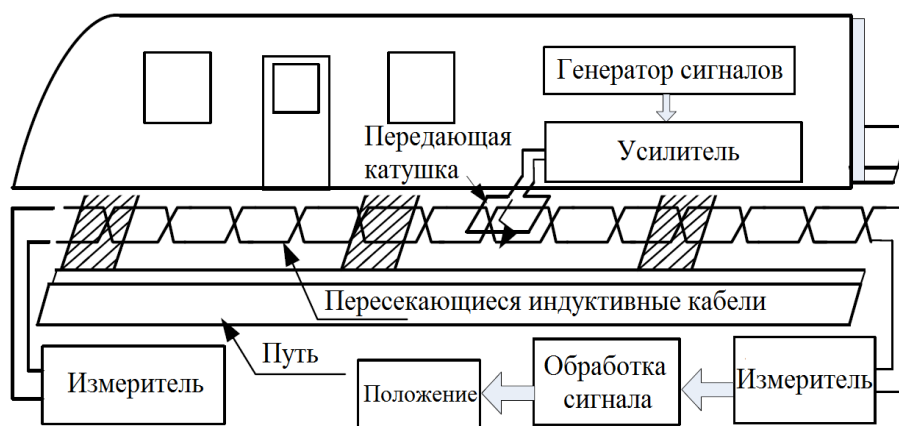


Рис. 7. Система определения положения с пересекающимся индуктивным кабелем

Рассмотрим более подробно конструкцию пересекающегося индуктивного кабеля. На рис. 8 показано поперечное сечение и расположение его проводников. Пересекающийся индуктивный кабель состоит из шести считывающих пар, каждая из которых включает скрученную и параллельную - открытую части, повторяющиеся через фиксированное расстояние. Для защиты от влаги и механических деформаций считывающие пары обмотаны скрепляющей лентой и покрыты полиэтиленом, а по бокам установлены несущие тросы. Считывающие пары, сдвинутые на полпериода, объединяются в единую группу, и в трех группах передающей катушкой наводятся трехфазные ЭДС, представленные на рис. 9. На основании полученных ЭДС и известного шага считывающих пар можно определить положение экипажа.

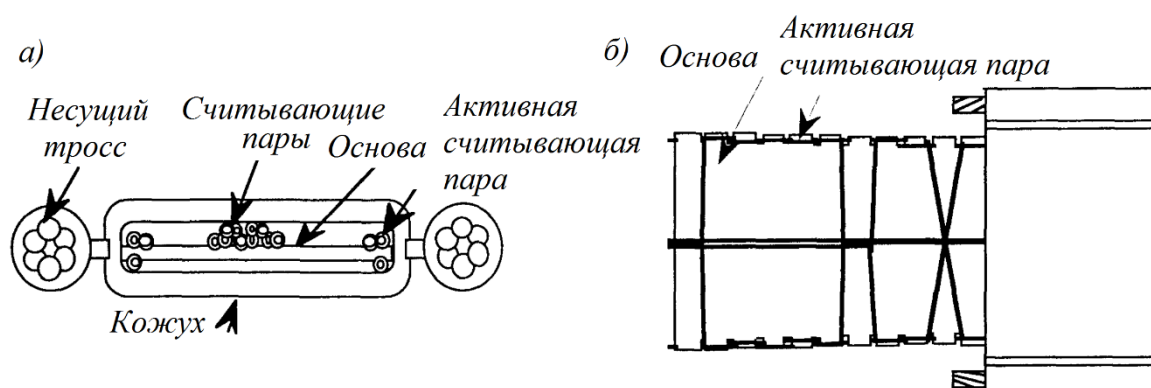


Рис. 8. Конструкция пересекающегося кабеля:  
а) поперечный разрез; б) расположение проводников

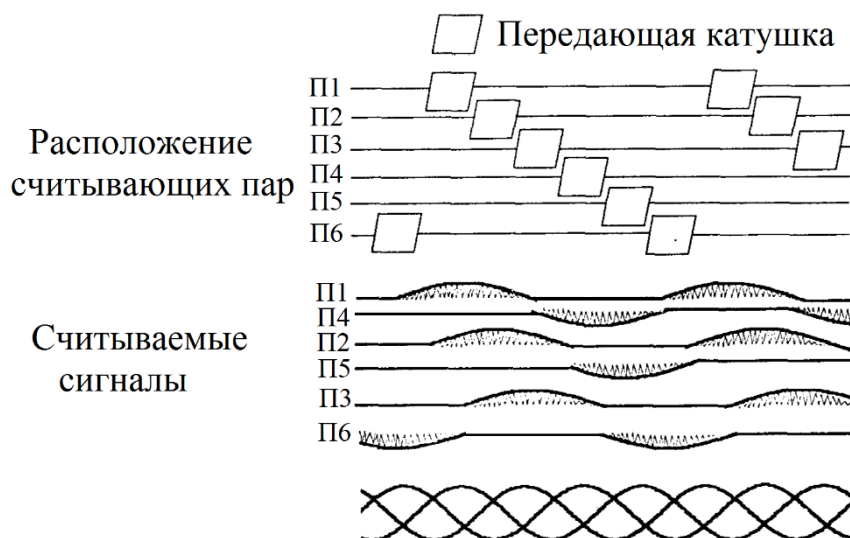


Рис. 9. Принципы определения положения

Данная система позволяет определять положение с высокой точностью, а также не требует дополнительного радиопередающего

устройства, поскольку датчики непосредственно расположены в путевой структуре. Существенным недостатком является сложность при изготовлении и эксплуатации (требуется высокая точность и качество сборки).

Рассмотренные системы с индуктивными датчиками обеспечивают только относительное измерение положения экипажа. Однако для работы систем безопасности важно определять абсолютное положение состава. Например, для определения абсолютного положения используется система считывания контрольных меток [9]. Такая система состоит из двух частей: расположенных на пути контрольных меток (рис. 10) и расположенного на экипаже считывающего устройства (рис. 11).

Пассивные контрольные метки с записанным цифровым кодом положения располагаются вдоль пути на расстоянии 200 – 1000 м. Когда экипаж проходит через контрольную метку, считывающее устройство получает цифровой код, и на его основании определяется абсолютное положение.

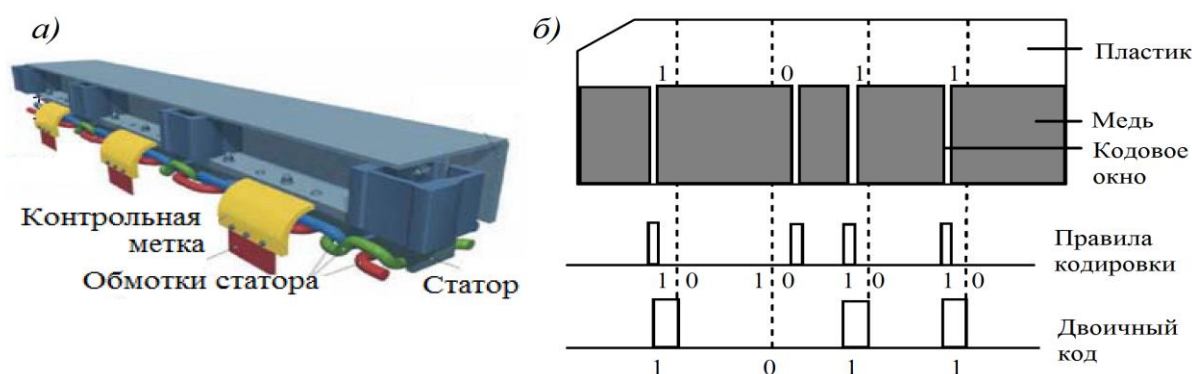


Рис. 10. Контрольная метка:

а) расположение контрольной метки на пути; б) кодировка контрольной метки

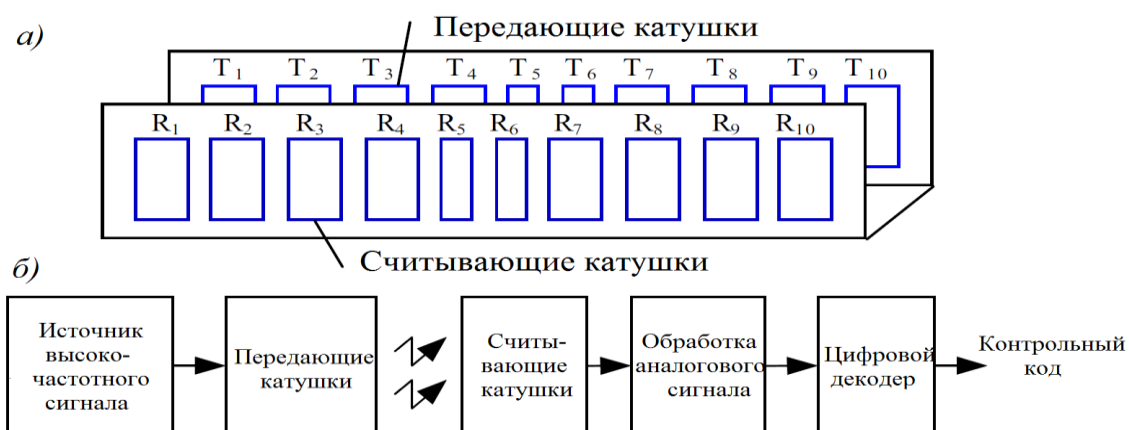


Рис. 11. Считывающее устройство:

а) расположение передающих и считывающих катушек;  
б) принципиальная схема считывающего устройства

## Комбинированные системы определения положения

Для увеличения надежности и уменьшения стоимости возможно применение комбинированных систем определения положения. Например, в Maglev на испытательном участке Yamanashi в Японии используется комбинированная система, представленная на рис. 12 [10]. В ней не используется дорогостоящий пересекающийся индуктивный кабель. Вместо этого она состоит из электромагнитного наблюдателя (модели двигателя с датчиками токов и напряжений статора), расположенного на колесе измерителя скорости, счетчика катушек путевой структуры и радиопередатчика. Центральный вычислитель комбинирует или выбирает полученную информацию и определяет положение и скорость, которые передаются в системы управления тяговым усилием, движением и безопасностью.

На низких скоростях движения информация от электромагнитного наблюдателя не обеспечивает необходимой точности. Поэтому до начала левитации для определения скорости используется датчик, расположенный на колесе. Информация от счетчика катушек путевой структуры используется как резерв на случай ошибки в электромагнитном наблюдателе, а также для измерения ошибки, вызванной износом резины колес.

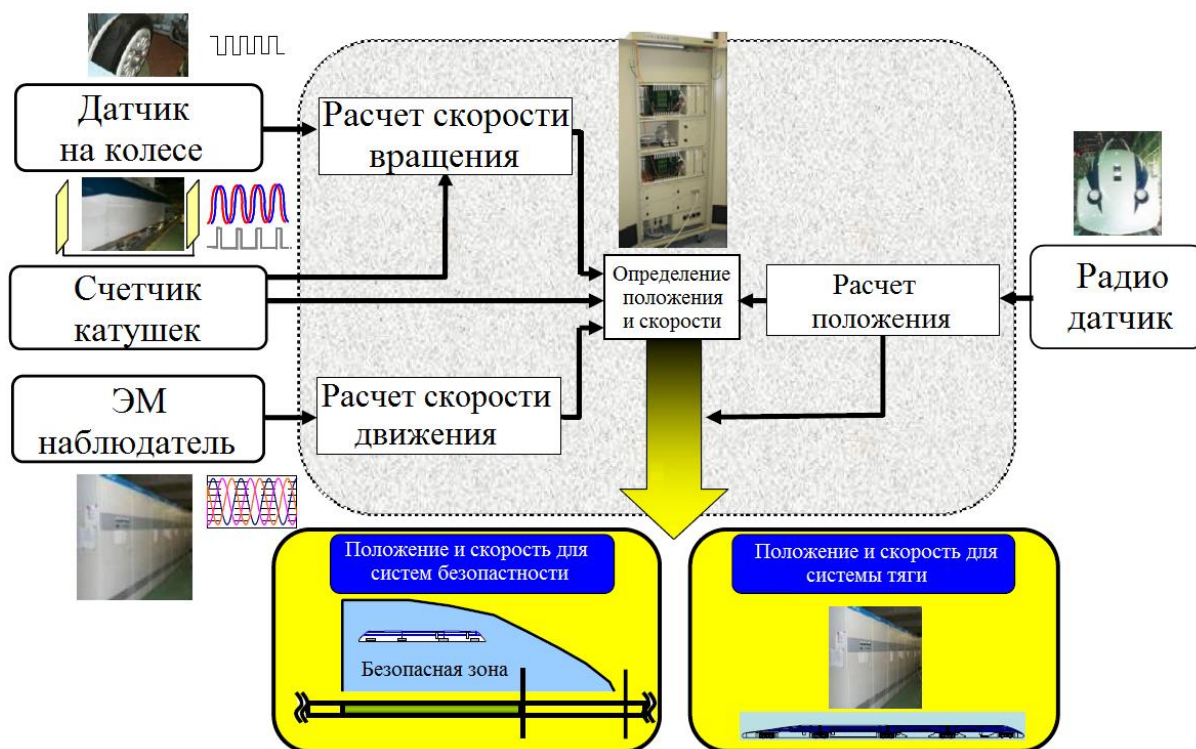


Рис. 12. Комбинированная система определения положения Maglev на испытательном участке Yamanashi в Японии

Рассмотренные подсистемы обеспечивают точное определение положения для систем создания тягового усилия, но они обеспечивают только косвенное измерение положения. Однако для работы систем безопасности важно точно определять абсолютное положение состава, поэтому используется еще одна подсистема радиоизмерения. Точность информации данной подсистемы недостаточна для управления двигателем, тем не менее она напрямую измеряет местоположение состава за счет измерения времени передачи сигнала от подвижной части до стационарных радиовышек, расположенных вдоль пути.

### **Система определения положения грузового маглев**

На основании изложенного можно сформулировать требования к системам определения скорости и положения: простота в изготовлении и обслуживании; высокая точность и быстродействие; работа при различных погодных условиях; определение абсолютного положения экипажа для систем безопасности движения. Как было показано, наиболее полно данным требованиям соответствуют комбинированные системы определения положения.

С учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации грузового Маглева для определения положения и скорости предлагается комбинированная система, представленная на рис. 13.



Рис. 13. Комбинированная система определения положения для грузового Маглева



С одной стороны, на грузовой платформе отсутствуют источники питания [11, 12], поэтому для упрощения конструкции все датчики определения положения должны располагаться на путевой структуре. С другой стороны, для грузового Маглев требования к обеспечению безопасности движения ниже, чем к пассажирскому. Поэтому в предлагаемой системе информация о положении и скорости платформы для системы управления преобразователем, питающим путевую структуру и системы безопасности движения, определяется на основании вычислений в модели двигателя по измеренным токам и напряжениям статорной обмотки. Для контроля вычислений в модели предлагается использовать систему меток, расположенных с заданным интервалом на пути; в этом случае отсутствует необходимость в радиопередаче данных от экипажа к системам управления. Для увеличения быстродействия и уменьшения количества сбоев передачу данных от контрольных меток до системы управления предлагается осуществлять по оптическому кабелю.

### **Заключение**

Несмотря на то, что наиболее простыми, дешевыми и распространенными в промышленности являются оптические датчики определения положения, их использование для определения положения экипажа транспортных систем невозможно из-за загрязнений шкалы и погодных условий. Для экипажей с синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов целесообразным является применение магнитных датчиков. Наиболее часто используемыми датчиками на транспорте являются индуктивные датчики. Их конструкция варьируется в зависимости от конструкции синхронного линейного двигателя.

Обычно для систем управления тяговым усилием используются датчики относительного положения, однако для работы систем безопасности необходима информация об абсолютном положении экипажа. Поэтому в современном магнитолевитационном транспорте используются комбинированные системы определения положения, что позволяет снизить стоимость и повысить точность при обеспечении высокой безопасности движения.

### **Библиографический список**

1. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А. Магнитолевитационная транспортная технология / Под ред. В. А. Гапановича. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 476 с.

2. Caro L., Zahra N. Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor, *Energy Conversion and Management*, March, 2010.

3. Gieras J., Piech Z. *Linear synchronous motors: transportation and automation systems*. ISBN 0-8493-1859-9, 2000. 271 p.

4. He N., Long Z., Xue S., Dou F. Optimal Design of Detection Coil of Relative Position Detection Sensor for High Speed Maglev Train. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 29–32.

5. X. Song, C. Dai, Z. Long, Research on location and speed detection for high speed maglev train based on long stator. In *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jinan, China, 7–9 July 2010; Volume 7, pp. 6953–6958.

6. Dai C., Long Z., Xie Y., Song X. Research on the filtering algorithm in speed and position detection of maglev trains. *Sensors* 2011, 11, pp. 7204–7218.

7. Ono M., Sakai Y., Ohta M., Koyasu O., Tazumi K., Mita K. Development of cross-inductive cable for train location detection in the superconducting maglev train control system. *International Wire 81 Cable Symposium Proceedings* 1997, pp. 720–726.

8. Song X., Dou F., Dai C. Analysis and Design of Ground Speed and Position Detection System Based on Crossed Inductive Looped-cable. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 140–142.

9. Qian C., Han Z., Xie W. Research on Absolute positioning system for high-speed maglev train // *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 922–926

10. Morishita K., Kitano J., Saegusa H., Fukukawa K. Novel Train Position Detecting System in the Yamanashi Maglev Test Line. // *MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Dresden, Germany, 2006.

11. Зайцев А. А. Контейнерный мост Санкт-Петербург – Москва на основе магнитной левитации / *Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Сборник материалов 2-ой Международной конференции*. Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 17-20 июня 2014 г. / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 8–21.

12. Антонов Ю. Ф., Зайцев А. А., Корчагин А. Д., Юдкин В. Ф. Магнитолевитационная технология как транспортная стратегия грузовых и пассажирских перевозок / *Магнитолевитационные транспортные системы и технологии // Сборник материалов 2-ой Международной научной конференции*. Санкт-Петербург, Петербургский государственный университет путей сообщения, 17-20 июня 2014 г. / под ред. проф. Ю. Ф. Антонова. – Киров: МЦНИП, 2014. – С. 22–49.



## References

1. Antonov Yu. F., Zaytsev A. A. *Magnitolevitacionnaya transportnaya tekhnologiya* [Magnetic levitation transportation technology]. Moscow, 2014. 476 p.
2. Caro L., Zahra N. Application of an imperialist competitive algorithm to the design of a linear induction motor, *Energy Conversion and Management*, March, 2010.
3. Gieras J., Piech Z. Linear synchronous motors: transportation and automation systems. ISBN 0-8493-1859-9, 2000. 271 p.
4. He N., Long Z., Xue S., Dou F. Optimal Design of Detection Coil of Relative Position Detection Sensor for High Speed Maglev Train. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 29-32.
5. Song X., Dai C., Long Z. Research on location and speed detection for high speed maglev train based on long stator. *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, 2010, vol. 7, pp. 6953-6958.
6. Dai C., Long Z., Xie Y., Song X. Research on the filtering algorithm in speed and position detection of maglev trains. *Sensors. Proceedings of the 9th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Jinan, 2011, 11, pp. 7204-7218.
7. Ono M., Sakai Y., Ohta M., Koyasu O., Tazumi K., Mita K. Development of cross-inductive cable for train location detection in the superconducting maglev train control system. *International Wire 81 Cable Symposium Proceedings*. 1997, pp. 720-726.
8. Song X., Dou F., Dai C. Analysis and Design of Ground Speed and Position Detection System Based on Crossed Inductive Looped-cable. *Przeglad Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 140-142.
9. Qian C., Han Z., Xie W. Research on Absolute positioning system for high-speed maglev train. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2007, pp. 922-926
10. Morishita K., Kitano J., Saegusa H., Fukukawa K. Novel Train Position Detecting System in the Yamanashi Maglev Test Line. *The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*. Dresden, 2006.
11. Zaitcev A. A. Kontejnernyj most Sankt-Peterburg – Moskva na osnove magnitnoj levitacii [Container Bridge St. Petersburg - Moscow based on magnetic levitation]. *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proc. of the 2nd

Inte. Sc. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 8-21.

12. Antonov YU. F., Zajcev A. A., Korchagin A. D., Yudkin V. F. Magnitolevitacionnaya tekhnologiya kak transportnaya strategiya gruzovyh i passazhirskih perevozok [Maglev technology as a transport strategy for freight and passenger traffic] *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 22-49.

**Сведения об авторах:**

НИКИТИН Виктор Валерьевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»  
E-mail: victor-nikitin@nm.ru

ГУЛИН Сергей Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

СЕРЕДА Евгений Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»  
E-mail: g-pereda@mail.ru

**Information of authors:**

Victor V. NIKITIN, Ph.D., Associate Professor, Head of the Department "Electromechanical complexes and systems" VPO «Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I»  
E-mail: victor-nikitin@nm.ru

Sergey GULIN, Ph.D., associate professor of the department "Electromechanical complexes and systems" VPO «Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I»

Eugene G. SEREDA, Ph.D., associate professor of the department "Electromechanical complexes and systems" VPO «Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I»  
E-mail: g-pereda@mail.ru

УДК 666.6:544.6

**А. Г. Иванова, О. А. Загребельный, А. А. Пономарева,  
М. С. Масалович, Н. Н. Губанова, О. А. Шилова, И. Ю. Кручинина**

Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов  
им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Дата поступления 07.09.2015

Решение о публикации 01.08.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Аннотация:** Рассмотрены проблемы создания портативных низкотемпературных водородно-воздушных твердополимерных топливных элементов (ТПТЭ), среднетемпературных метаново-воздушных (ТОТЭ) и суперконденсаторов (СК) с псевдоемкостным эффектом, перспективных для использования в различных транспортных средствах, в том числе в магнитолевитационной транспортной области, альтернативной низкоскоростному передвижению. Кратко проанализированы современные тенденции в разработке нанокompозитных материалов для электродов, электролитов ТПТЭ, ТОТЭ и СК. Приведены примеры использования материалов, синтезированных авторами с использованием различных способов синтеза, в том числе и золь-гель технологии.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, водородно-воздушные топливные элементы, метаново-воздушные топливные элементы, суперконденсаторы, протонпроводящие мембраны, каталитический слой, псевдоемкостной эффект, электролит, электрод.

**A. G. Ivanova, O. A. Zagrebelnyiy, A. A. Ponomareva, M. S. Masalovich,  
N. N. Gubanova, O. A. Shilova, I. Yu. Kruchinina**

Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences

**DEVELOPMENT OF ELECTROCHEMICAL DEVICES BASED ON  
NANOCOMPOSITE MATERIALS**

**Abstract:** The problems of development portable low-temperature hydrogen-air solid polymer electrolyte fuel cells (SPEFC), medium-temperature methane-air fuel cells (SOFC) and supercapacitors (SC) with pseudocapacity effect are described in the article. These devices are promising to use in a variety of vehicles, including the sector of the magnetic levitation transport, as an alternative to low-speed movement. The current trends in the

development of nanocomposite electrode materials, electrolytes SPEFC, SOFC and the SC are analyzed briefly. Examples of the use of materials synthesized by various methods, including the sol-gel technology are, presented in the article

**Key word:** alternative energetics, hydrogen-air fuel cells, methane-air fuel cells, supercapacitors, proton exchange membrane, catalyst layer, pseudocapacitive effect, electrolyte, electrode.

## Введение

Развитие электрохимических устройств, которые относятся к альтернативным источникам энергии, связано с использованием новейших технологий синтеза уникальных нанокompозитных материалов. Разработка электроактивных нанокompозитных материалов для энергонакопительных устройств (суперконденсаторы – СК) и гальванических элементов с внешней подачей «топлива» (топливные элементы – ТП) является одной из стратегических задач модернизации экономики России, направленных на переход от ресурсозависимой модели к инновационному пути развития. Немаловажным фактором успешного перехода на инновационный путь развития является создание транспортной системы с линейным двигателем на магнитном подвесе, со скоростью передвижения до 1000 км/ч. С конца XX века в мировой практике используются магнитолевитационные транспортные системы (Маглев) [1]. На сегодняшний день по степени применения инновационного транспорта лидирует Япония. Так, 21 апреля 2015 года в ходе испытаний на экспериментальном участке путей протяженностью 42,8 километра в префектуре Яманаси состав на магнитной подушке смог развить скорость до 603 километров в час [2]. Одним из главных преимуществ подобных транспортных систем, помимо высокой скорости, является достаточно низкое потребление энергии. Так, для электропитания поезда Маглев используются батареи из аккумуляторов. В последнее время разработчики альтернативного транспорта стремятся заменить аккумулятор на ТЭ или СК. Например, в Южной Корее тестируется экспериментальный поезд Маглев, работающий на СК, а инженер-конструктор Сикарик Драган (Cikaric Dragan) представил свою концепцию безопасного для окружающей среды вертолета с лопастями, оснащенными магнитами и электропитанием на основе ТП [3]. Таким образом, разработка электрохимических устройств, превышающих аккумулятор по плотности энергии (ТЭ) и скорости заряда/разряда (СК), является достаточно актуальной задачей.

Целью настоящего научного исследования является разработка электрохимических устройств – низкотемпературных водородно-воздушных твердополимерных ТПТЭ, среднетемпературных метаново-

воздушных твердооксидных ТОТЭ и СК с псевдоемкостным эффектом - псевдоконденсаторов (ПК) – на основе нанокомпозитных материалов.

### **Разработка нанокомпозитных материалов для низкотемпературного водородно-воздушного ТПТЭ**

Как известно, основной проблемой выпускаемых ТПТЭ является низкая термоустойчивость протонпроводящей мембраны типа Нафийон до 90°C, высокая себестоимость мембраны и катализатора – платины [4-6]. Помимо этого, платиновый катализатор подвержен отравлению примесями СО, присутствующими в газообразном водороде. Поэтому целесообразно использовать высокочистый газ, с массовой долей 99,9999%. Разработанные нами нанокомпозитные электроды ТПТЭ содержат меньшее количество платины [7] по сравнению с традиционным способом нанесения, что не влияет на значение плотности тока. Технология золь-гель синтеза позволяет получать очень тонкие (от ~4 до 80 нм), равномерные по толщине платиносодержащие силикатные пленки, с повышенной концентрацией наночастиц платины в верхних слоях пленки [8]. Мощность экспериментального ТПТЭ до 0,5 Вт/см<sup>2</sup>.

Ведется разработка твердополимерного электролита с низкой себестоимостью на основе кремнеземной матрицы [9] и сульфированного полисульфона, способных функционировать в температурном диапазоне 10–180°C. На сегодняшний момент получена основа протонпроводящей мембраны с ионной проводимостью до 10<sup>-2</sup> См/см, что соответствует протонной проводимости мембраны типа Нафийон. Основа представляет собой сульфированный полисульфон, полученный в присутствии 93% серной кислоты. Ионная проводимость полимера при комнатной температуре составляет 10<sup>-2</sup>-10<sup>-3</sup> см/см, что соответствует сопротивлению электролита 30–140 Ом (рис. 1), тогда как у мембраны Нафийон удельное сопротивление при комнатной температуре достигает значения 10<sup>-4</sup> См/см.

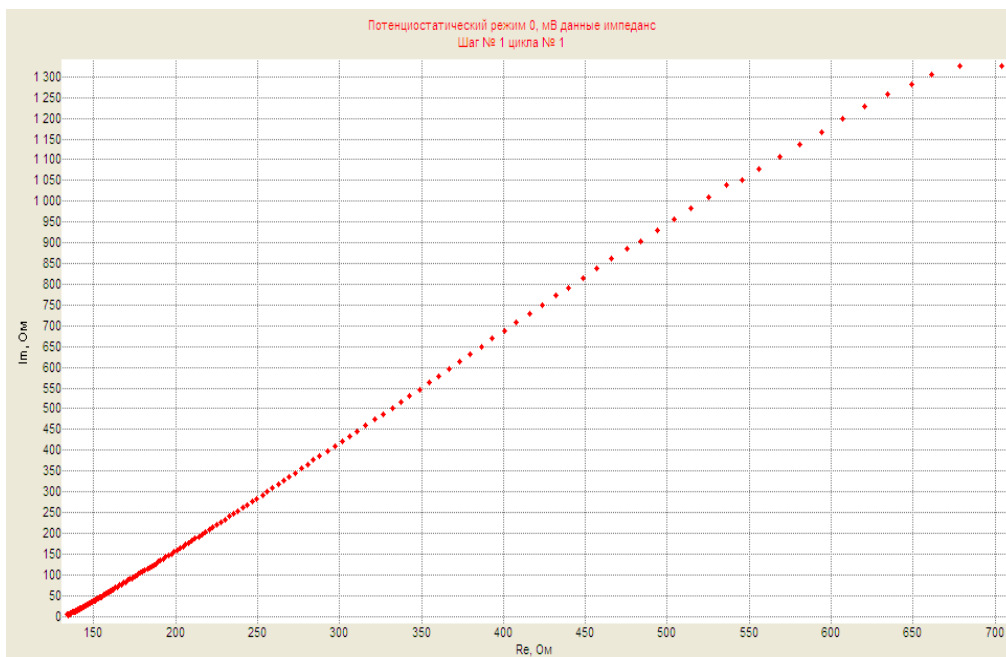


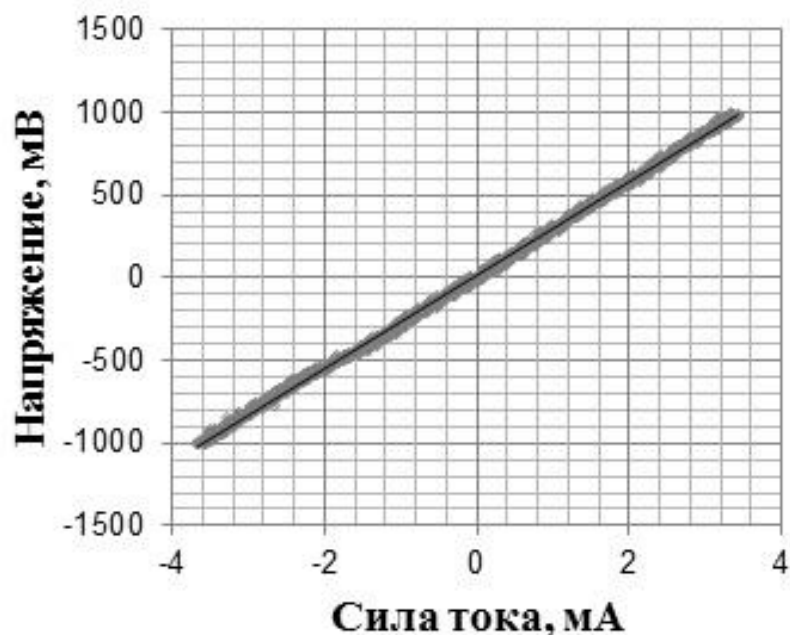
Рис. 1. Импеданс сульфированного полисульфона, измеренный в двухэлектродной ячейке. Сопротивление электролита  $\sim 120$  Ом

Ионная проводимость сульфированного полисульфона при увеличении температуры от 25 до  $150^{\circ}\text{C}$  изменяется от  $10^{-3}$  до  $10^{-1}$  См/см.

## Разработка среднетемпературного метано-воздушного ТОТЭ

Керамика на основе оксида церия, лантана и гадолиния обладает огромным потенциалом для применения ее в качестве электродов ТОТЭ, работающих в среднетемпературном диапазоне ( $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$ ), поскольку нанокompозитный анод ТОТЭ на основе данной керамики способен напрямую окислять дешевый легкодоступный газообразный энергоэффективный метан, без предварительной внешней или внутренней конверсии метана, что существенно увеличивает КПД устройства. Мощность подобных экспериментальных ТОТЭ пока достигает  $\sim 40$  мВт/см<sup>2</sup> [10].

Нами получен нанокompозитный материал катода с электронной проводимостью (данные, полученные двухзондовым методом измерения) при комнатной температуре до 30 См/см (рис. 2), подобран материал электролита ТОТЭ, разрабатывается синтез материала анода. Ожидаемая мощность среднетемпературного метаново-воздушного ТОТЭ до 50 мВт/см<sup>2</sup>.



*Рис.2. Вольт-амперные характеристики керамического наноматериала катода, отражающие удельное сопротивление материала 0,04 Ом·см, что соответствует удельной проводимости ~27 См/см. Удельное сопротивление (Ом·см) рассчитывалось по формуле:  $\rho = \Delta U S / I s$ , где  $I$  – сила тока, протекающего через образец;  $\Delta U$  – разность потенциалов между измерительными или потенциальными зондами;  $s$  – расстояние между зондами, см;  $S$  – площадь поперечного сечения, см<sup>2</sup>*

### **Разработка нанокомпозитных электродов псевдоконденсатора на основе оксидов переходных металлов и электропроводящих полимеров**

В последнее десятилетие мировым научным сообществом ведутся разработки СК, по показателям емкости приближающегося к аккумулятору, при этом сохраняющего высокую скорость заряда-разряда. Подобные СК получили название псевдоконденсаторы (ПК), поскольку в данных устройствах емкость накапливается не только за счет двойного электрического слоя как в СК с угольными электродами (удельная емкость до 200 Ф/г), а в основном за счет поверхностных обратимых окислительно-восстановительных реакций. Теоретическая емкость ПК может составлять более 1000 Ф/г [11]. Нами получены оксидные и полимерные покрытия электродов с удельной емкостью активного слоя (покрытия) электрода до 300 Ф/г.

Например, нанокомпозитные гибкие электроды были получены в результате электроосаждения наноструктурированных покрытий на основе  $\text{MnO}_2$  на модифицированную кремнеземом электродную поверхность (углеродная ткань / сетка из нержавеющей стали), рис. 3.



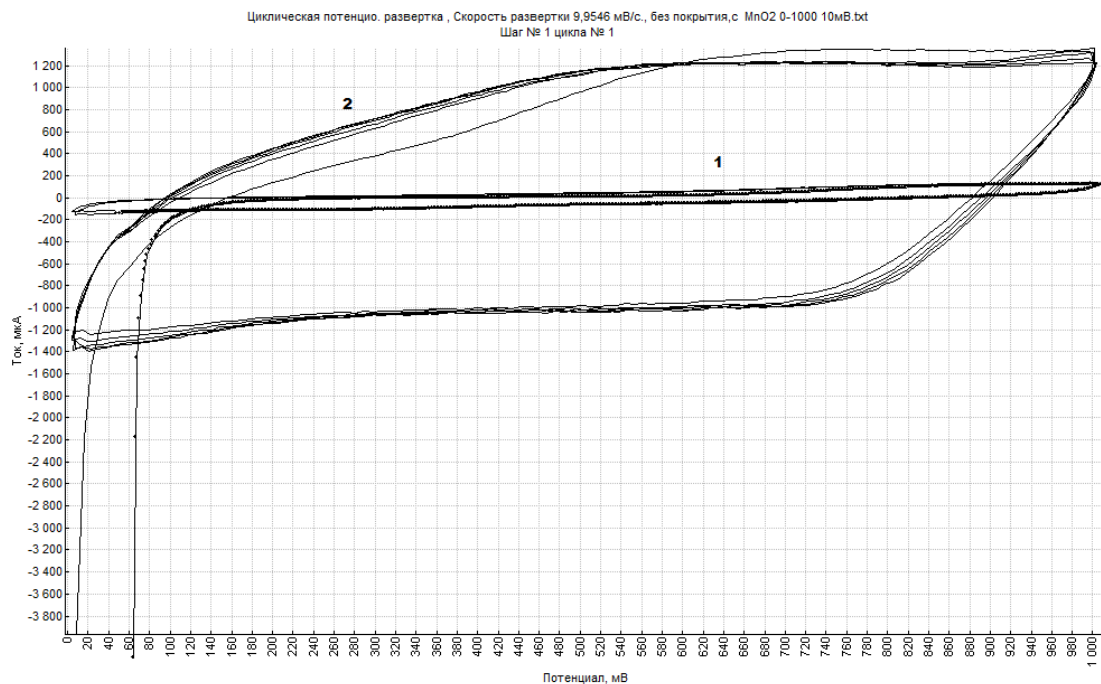


Рис.3. ЦВА-граммы гибких электродов ПК, зарегистрированные в 1М KNO<sub>3</sub> относительно хлорсеребряного электрода в сравнении со скоростью развертки потенциала 10 мВ/с:

- 1 – стальная сетка с покрытием MnO<sub>2</sub>,  
2 – стальная сетка, модифицированная кремнеземом и MnO<sub>2</sub>

Как видно из рис. 3, удельная емкость электроактивного слоя электрода (2) ПК примерно в 10 раз выше удельной емкости электрода (1). Так, для ПК 1 – 30 Ф/г, а для ПК 2 – 250 Ф/г. Следовательно, кремнеземная модификация электрода способствовала увеличению удельной емкости электроактивного слоя электрода ПК.

В последнее время возрастает интерес к политиофенам, как представителям электропроводящих органических полимеров, в качестве перспективных материалов электродов псевдоконденсаторов. Политиофены сочетают в себе электропроводность и электроактивность, что способствует улучшению электротехнических показателей электродов ПК на их основе. Известно, что условия и способ синтеза политиофена сильно влияет на электрохимические свойства полимера, а механизм полимеризации и его зависимость от условий синтеза до сих пор остаются мало понятны. Нами было выявлено, что удельная емкость электроактивного полимерного покрытия электрода псевдоконденсатора зависит от различных режимов электроосаждения (потенциодинамический, потенциодинамический, гальваностатический) и варьирует от 20 до 200 Ф/г.

Потенциальное «окно» экспериментального ПК в водном электролите составляет 800 мВ. Соответствующая этим показателям удельная энергия равна 2,5 Вт X ч/кг. Ведутся работы по увеличению потенциального окна напряжения, емкости и цикличности устройства.

## **Заключение**

Разработка электрохимических устройств (ТЭ, СК) является перспективной и актуальной задачей, для решения которой необходимо создание полифункциональных нанокompозитных материалов. Проведенный анализ литературных данных и результатов исследований позволил выявить основные направления развития ТПТЭ и ТОТЭ. Это, в первую очередь, разработка электродов с уменьшенным содержанием дорогостоящей платины (или её отсутствием) и приемлемого по стоимости протонпроводящего электролита с широким температурным диапазоном (10–180°C) работы. Для электродов ТОТЭ необходим поиск керамических материалов, способных напрямую окислять метан и эффективно работать в среднетемпературном диапазоне (300–600°C).

СК с псевдоемкостным эффектом являются устройствами накопления энергии нового поколения, поскольку нанокompозитные материалы электродов на основе оксидов переходных металлов и электропроводящих полимеров позволяют обеспечивать высокую удельную емкость этих устройств. Таким образом, используя нанотехнологию, в том числе и золь-гель технологию, можно получать необходимые высокоэффективные материалы для электродов, электролитов и катализаторов, обеспечивая тем самым надежность и ценовую доступность ТПТЭ, ТОТЭ и СК.

Работа выполняется при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований №7 Отделения химии и наук о материалах (ОХНМ) РАН «Создание научных основ экологически безопасных и ресурсосберегающих химико-технологических процессов. Отработка процессов с получением опытных партий веществ и материалов», проект: «Разработка новых керамических и полимерных материалов для компонентной базы современных источников тока и энергонакопительных устройств» и Программы фундаментальных исследований №2 Отделения химии и наук о материалах (ОХНМ) РАН «Инновационные разработки металлических, керамических, стеклокомпозиционных 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. URL: <http://guryevandrey.narod.ru/artikals/Maglev.pdf> (01/08/2015).
2. URL: <http://www.japantimes.co.jp/news/2015/04/21/business/tech/maglev-train-clocks-603-kph-test-run-notching-new-world-record/#.VZpuXHIw9jq> (01/08/2015).
3. URL: <http://www.tuvie.com/air-alien-green-helicopter-uses-electric-energy-for-pleasant-commuting/> (01/08/2015).
4. Carrette L., Friedrich K. A., Stimming U. Fuel Cells Fundamentals and Applications, FUEL CELLS 2001, 1, No. 1, pp. 5–39.
5. Формирование каталитических слоев из золей на основе тетраэтоксисилана и использование их в полимерных топливных элементах / Шилова О. А., Шилов В. В., Кошель Н. Д., Козлова Е. В. // Физика и химия стекла – 2004 – №1 – С. 132–136.
6. Разработка и исследование электротехнических свойств водородно-воздушных топливных элементов. Шилова О.А., Кручинина И. Ю., Иванова А. Г. и др. // Тр. II междунар. науч. конф. «Магнитолевитационные транспортные системы и технологии», ПГУПС – Киров: МЦНИП, 2014. – 162 с.
7. Пат. 2358359 РФ. Способ получения каталитического слоя топливного элемента / Нечитайлов А. А., Хамова Т. В., Звонарева Т. К., Шилова О. А., Астрова Е. В., Сресели О. М./ заявл. 26.12.2007; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16.
8. Состав, структура и морфология поверхности наноразмерных платиносодержащих пленок, получаемых из золей / Шилова О. А., Губанова Н. Н., Матвеев В.А. и др. // Журнал физ. и хим. стекла, – 2016. – № 42.
9. Пат. 2505481 РФ. Способ получения силикофосфатного протонпроводящего материала, преимущественно для мембран топливных элементов (варианты) / Шилова О. А., Цветкова И. Н. / заявл. 28.04.2011; опубликовано 27.01.2014, Бюллетень № 3.
10. Jelvehnaz Mirzababaei, Steven S., Chuang C.  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$  perovskite: a stable anode catalyst for direct methane solid oxide fuel cells // Catalysis 2014, 4, 146-161; doi: 10.3390/catal4020146.
11. Синтез и электрофизические свойства нанооксидного слоя псевдоконденсатора / Иванова А. Г., Загребельный О. А., Цигас А. А., Шилова О. А. // Журнал физ. и хим. стекла – 2012. – №6 – С. 433–439.

## References

1. URL: <http://guryevandrey.narod.ru/artikals/Maglev.pdf> (01/08/2015).
2. URL: <http://www.japantimes.co.jp/news/2015/04/21/business/tech/maglev-train-clocks-603-kph-test-run-notching-new-world-record/#.VZpuXHIw9jq> (01/08/2015).
3. URL: <http://www.tuvie.com/air-alien-green-helicopter-uses-electric-energy-for-pleasant-commuting/> (01/08/2015).
4. Carrette L., Friedrich K. A., Stimming U. *Fuel cells*, 2001, vol. 1, no. 1, pp. 5-39.
5. O. A. Shilova, V. V. Shilov, N. D. Koshel, E. V. Kozlova *Fizika i himiya stekla - J. Glass Phys. and Chemistry*, 2004, vol. 30, no. 1, pp. 98-100.
6. Shilova O. A., Kruchinina I. Y., Ivanov A. G., Zagrebel'nyi O. A. Khamova T. V., Tsvetkova I. N. Razrabotka i issledovanie ehlektrotekhnicheskikh svoystv vodorodno-vozdushnykh toplivnykh ehlementov [Development and study of electrical properties of the hydrogen-air fuel cells]. *Trudy 2-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Magnitolevitacionnye transportnye sistemy i tekhnologii"* (Proc. of the 2nd Inte. Sc. Conf. "Magnetic levitation transport systems and technologies"). St. Petersburg, 2014, pp. 164-171.
7. Pat. 2505481 RU METHOD FOR MAKING CATALITIC LAYER OF FUEL CELL /Nechitajlov Andrej Alekseevich, Khamova Tamara Vladimirovna, Zvonareva Tat'jana Konstantinovna, Shilova Ol'ga Alekseevna, Astrova Ekaterina Vladimirovna, Sreseli Ol'ga Mikhajlovna date of filing: 26.12.2007; date of publication: 10.06.2009.
8. Shilova O. A., Gubanov N. N., Matveev V. A., Bayramukov V. Y., Kobzev A. P. *J. Glass Phys. and chemistry*. 2016, vol. 42, print.
9. Pat. 2505481 RU METHOD OF OBTAINING SILICOPHOSPHATE PROTON-CONDUCTING MATERIAL, MAINLY FOR MEMBRANES OF FUEL ELEMENTS (VERSIONS) Shilova Ol'ga Alekseevna, Tsvetkova Irina Nikolaevna. (Date of filing: 28/04/2011, date of publication: 27/01/2014).
10. Jelvehnaz Mirzababaei, Steven S., Chuang C. *Catalysts*, 2014, no. 4, pp. 146-161, doi: 10.3390/catal4020146.
11. Ivanova A. G., Zagrebel'nyi O. A. Tsigas A. A., Shilova O. A. *J. Glass Phys. and chemistry*, 2012, vol. 38, no. 6, pp. 433-439.

**Сведения об авторах:**

ШИЛОВА Ольга Алексеевна, д.х.н., профессор, зав. лаб. ИХС РАН

E- mail: olgashilova@bk.ru

КРУЧИННИНА Ирина Юрьевна, д.т.н., ИХС РАН, зам. директора по научной работе

E- mail: ikruch@isc.nw.ru

ИВАНОВА Александра Геннадьевна, к.х.н., н.с. ИХС РАН

E- mail: agp-13@inbox.ru

ЗАГРЕБЕЛЬНЫЙ Олег Анатольевич, н.с. ИХС РАН

E- mail: olegnew@gmail.com

ПОНОМАРЕВА Алина Александровна, к.т.н., н.с. ИХС РАН

E- mail: ap\_k@inbox.ru

МАСАЛОВИЧ Мария Сергеевна, к.х.н., н.с. ИХС РАН

E- mail: mas-maria@yandex.ru

ГУБАНОВА Надежда Николаевна, н.с. ИХС РАН

E- mail: gubnn@lms.pnpi.spb.ru

**Information about authors:**

SHILOVA Olga, Prof., Head. lab. IHS RAS

E- mail: olgashilova@bk.ru

KRUCHININA Irina, Ph.D., IHS RAS, Deputy. Director for Science

E- mail: ikruch@isc.nw.ru

IVANOVA Alexandra G., Ph.D., researcher, IHS RAS

E- mail: agp-13@inbox.ru

ZAGREBEL'NYI Oleg, NS, IHS RAS

E- mail: olegnew@gmail.com

PONOMAREVA Alina A., Ph.D., researcher IHS RAS

E- mail: ap\_k@inbox.ru

MASALOVICH Maria S., Ph.D., researcher IHS RAS

E- mail: mas-maria@yandex.ru

## Раздел 3. БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК: 621.396:519.853+504.75

С. М. Аполлонский  
ОАО «Ленгипротранс»

### ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СИСТЕМЕ

Дата поступления 04.06.2015

Решение о публикации 03.07.2015

Дата публикации 22.12.2015

**Аннотация:** Рассмотрены проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетической железнодорожной системе, обсуждаются пути их решения.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, электромагнитная совместимость электрооборудования, электромагнитная среда, электромагнитная обстановка, электромагнитная безопасность технических средств.

**Stanislav M. Apollonskiy**

Open Joint Stock Company “LENGIPROTRANS”

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN  
ELECTRICITY OF RAIL SYSTEM

**Abstract:** Problems of electromagnetic compatibility on electrified railways are sharper than in the stationary energy sector. This is due to the following circumstances:

1. Electrified railways has considerable length in space and is usually located in different climatic and in geological zones.

2. In rail transport, as well as any other transport systems, a compact high-performance equipment used (high and low voltage), to a greater degree of exposure to external electromagnetic influences than in the stationary energy sector.

3. All processes (stationary and non-stationary) on an electrified rail, in one way or another, affect the operation of each of the elements of the system.

4. In the development of an extensive electrified railway is necessary to ensure the electromagnetic compatibility of each of the elements that are not always required in the stationary energy sector.

5. Problems of electromagnetic compatibility electrified railways significantly of more complicated, when are using magnetolevitation technologies for elektrozhdvizhenie.

Considered the problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system, are discussed ways of solving them.

**Keywords:** electromagnetic field, electromagnetic compatibility of electrical equipment, electromagnetic environment, electromagnetic security technology.

## Введение

Проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) в электроэнергетической железнодорожной системе (ЭЭЖС) стоят острее, чем в стационарной энергетике. Связано это со следующими обстоятельствами [1]:

1. ЭЭЖС имеет значительную протяжённость в пространстве и, как правило, располагается в различных климатических и геологических зонах.

2. На железнодорожном транспорте, как и в любых других транспортных системах, используется *компактное* высокоэффективное оборудование (силовое и слаботочное), в большей степени подверженное внешним электромагнитным воздействиям, чем в стационарной энергетике.

3. Все процессы (стационарные и нестационарные) в ЭЭЖС, в той или иной мере, отражаются на работе каждого из элементов системы.

4. При создании разветвлённой ЭЭЖС необходимо обеспечить ЭМС каждого из элементов, что не всегда требуется в стационарной энергетике.

5. Проблемы ЭМС в ЭЭЖС существенно усложняются при использовании магнитолевитационных технологий при электродвижении.

Ниже рассмотрены основные проблемы ЭМС технических средств в ЭЭЖС и пути их преодоления.

### Электроэнергетическая система электрифицированной железной дороги

Основными элементами ЭЭС железной дороги, электрифицированной на переменном токе, являются линии электропередачи (ЛЭП), тяговые подстанции (ТПС), контактная и рельсовая сети, электроподвижной состав (ЭПС). ТПС служат для поддержания рабочего напряжения в контактной сети. На подстанции идёт преобразование переменного тока высокого напряжения, получаемого из высоковольтных ЛЭП, в переменный ток напряжения, принятого для питания ЭПС.

При расчете электромагнитного воздействия на окружающую среду в расчет следует принимать как ЛЭП всех видов, контактные сети, ЭПС, так и высокочувствительное оборудование (линии стационарной и поездной радиосвязи, системы управления, телевизионные системы и т.п.). Расположены те и другие, как правило, на небольших расстояниях и влияют друг на друга. Поэтому проблемы ЭМС в ЭЭЖС относительно внутренних связей и связей с окружающим пространством, выдвигаются на первое место.



При создании ЭЭЖС следует учитывать, что мощности источников электромагнитных полей (ЭМП): контактные сети, ТПС и др. – соизмеримы с мощностью подключаемых приемников – потребителей электрической энергии, а поэтому следует обязательно учитывать их взаимовлияние.

На расстоянии от источника помех менее длины волны данной частоты ЭМП имеет ярко выраженный электрический и магнитный характер. Частоты ЭМП в диапазоне от нескольких герц до десятков-сотен килогерц характерны для ЭЭЖС с электромагнитными волнами, поэтому электромагнитные связи между источниками помех и приемниками помех осуществляются за счет либо электрических, либо магнитных полей (ЭП, МП). Пути распространения помех в ЭЭЖС – например, в схемах управления электроприводами, радиотелевизионных установках, системах управления высокочувствительной электронной техникой – разделяют на гальванические, электростатические и магнитостатические. Пути распространения помех представляют собой линии связи с распределенными параметрами.

Рассмотрение особенностей электромагнитных процессов в системе тягового электроснабжения показало, что наличие элементов с распределенными параметрами (ЛЭП, тяговая сеть) предполагает появление волновых процессов. Последние значительно усложняют течение электромагнитных процессов, происходящих в системе электроснабжения, и могут приводить к резонансам одновременно на нескольких частотах [2].

### **Формирование электромагнитной среды на электрифицированной железной дороге**

*Климатические особенности района.* Распределение ЭМП в воздушной среде зависит не только от инфраструктуры окружающего пространства, но и от его электромагнитных параметров: электрической проводимости  $\gamma_B$ , магнитной  $\mu_B$  и диэлектрической  $\epsilon_B$  проницаемостей [3].

Анализ влияния изменения этих параметров на электромагнитные процессы в зависимости от метеорологических условий и от практической деятельности человека показывает:

1. Процессы индустриализации, урбанизации и других видов практической деятельности человека приводят к существенным изменениям электрической проводимости по регионам, увеличению магнитной и диэлектрической проницаемостей.

2. Возведение высоких объектов приводит к изменению зарядов генерирующих процессов, а также к изменению распределения зарядов и грозовой активности в облаках.

3. Случайное изменение атмосферного электричества в воздушной среде может вызвать изменения некоторых метеорологических процессов. Например, изменения ЭП в воде и в грозовых облаках изменяют процессы взаимодействия в среде, терминальные скорости и форму капли воды приводят к изменению процессов взаимодействия в среде, терминальных скоростей и формы капли воды. Такие изменения могут ускорить или изменить эволюцию атмосферных осадков и таким образом повлиять на динамику облаков.

Параметры  $\gamma_B$ ,  $\mu_B$ ,  $\varepsilon_B$  воздушной среды существенно меняются в местах природных катаклизмов: скопления грозовых туч, очагов зарождения воздушных вихрей, в районах землетрясений и т.д. Риск попадания в места повышенной опасности высок, особенно в районах предполагаемых землетрясений, ибо параметры  $\gamma_B$ ,  $\mu_B$ ,  $\varepsilon_B$  начинают меняться задолго до землетрясения, о котором порой никто не догадывается [3,4]. Так, например, механические напряжения, накапливающиеся в земной коре перед землетрясением, сопровождаются ростом напряженностей ЭП. Причем чем ближе к будущему эпицентру, тем больше. Если средняя напряженность ЭП над поверхностью Земли составляет 120-140 В/м, то за день до катаклизма – до нескольких сотен тысяч В/м. Это можно видеть невооруженным глазом: начинают светиться горы, земля, электропроводы. В момент толчка над эпицентром на несколько секунд возникает ярчайшая вспышка. Столь наэлектризованная атмосфера влияет на все виды высокочувствительных электронных систем (в том числе и на бортовые системы ЭПС).

**Качество электроэнергии в ЛЭП.** Система стандартизации качества электроэнергии в ЭЭС общего назначения непосредственно не касается электрических сетей специального назначения, к которым относятся контактные тяговые сети, и носит в этом случае рекомендательный характер [КЭ ГОСТ Р 54149-2010]. В то же время для напряжений в тяговых сетях существует государственный стандарт, устанавливающий номинальный уровень напряжения на шинах 27,5 кВ тяговых подстанций переменного тока, а также минимальный, номинальный и максимальный уровни напряжения на токоприемнике ЭПС. В соответствии с ГОСТ 6962-75 [5], для электрифицированных дорог при системе тяги на однофазном токе промышленной частоты номинальное напряжение на шинах подстанции принято равным 27,5 кВ. Номинальное напряжение на токоприемнике ЭПС установлено в 25 кВ. С учетом специфических особенностей работы электрифицированных железных дорог,

закрывающихся в постоянном изменении напряжения на шинах подстанции, стандартом установлены максимальные и минимальные значения напряжения на токоприемнике ЭПС переменного тока. Максимальное напряжение на токоприемнике составляет 29 кВ, а минимальное – 19 кВ при всех эксплуатационных условиях. Более того, Министерством путей сообщения установлено минимальное напряжение в условиях эксплуатации при нормальной схеме питания. В этом случае, согласно «Правилам технической эксплуатации железных дорог», напряжение на токоприемнике ЭПС при нахождении его на любом блок-участке должно быть не менее 21 кВ. При этом будет выполнено условие обеспечения участковых скоростей, заложенных в графике движения ЭПС.

Как видно, максимальное отклонение напряжения на токоприемнике ЭПС, регламентированное ГОСТом, составляет +16% и -24%. Для сравнения, в сетях общего назначения, согласно «Правилам устройств электроустановок» (ПЭУ), отклонение напряжения на зажимах электродвигателей от номинального не должно превышать  $\pm 5\%$ , максимальное отклонение допускается в большую сторону – +10%. Для точек общего присоединения в системах электроснабжения общего назначения, к которым присоединяются электрические сети потребителей электрической энергии, согласно КЭ ГОСТ Р 54149-2010, установившееся отклонение напряжения  $\delta U_y$  не должно превышать  $\pm 10\%$ . Таким образом, требования к качеству напряжения в электротяговых сетях менее жесткие, чем в электрических сетях общего назначения.

Для обеспечения эффективной работы ЭПС необходимо при всех возможных режимах системы электрической тяги поддерживать на токоприемнике номинальный уровень напряжения 25 кВ, на который рассчитано электрооборудование ЭПС. При этом повышается коэффициент полезного действия ЭПС, снижается расход электроэнергии. В современных условиях обеспечить снижение величины отклонения напряжения от номинального значения возможно путем включения устройств автоматического регулирования напряжения трансформаторов тяговых подстанций (АРПН) и внедрения адаптивных микропроцессорных регуляторов напряжения с использованием модернизированной аппаратуры управления режимом работы оборудования ТПС.

Работа преобразовательных установок ЭПС переменного тока зависит не только от изменения величины напряжения, но и от формы кривой напряжения на токоприемнике. При сильном искажении кривой напряжения происходят сбои в системе управления преобразователем, что нарушает работу двигателей ЭПС. В этой связи целесообразно разработать прямые или косвенные нормативы, связанные с формой кривой

напряжения, соблюдение которых будет гарантировать надежную работу ЭПС.

Результаты работ по разработке нормативов, связанных с формой кривой напряжения на токоприемнике ЭПС, показали, что форма кривой напряжения в токоприемнике определяется типом ЭПС и величиной полного сопротивления системы электроснабжения. При этом если тип ЭПС обуславливает характер искажений (провалы), то сопротивление системы электроснабжения – величину искажений, а также частоту свободных колебаний, вызванных воздействием ЭПС на систему электроснабжения. Установлено, что при большом сопротивлении системы тягового электроснабжения во время коммутации преобразователя резко уменьшается напряжение на токоприемнике ЭПС. После окончания коммутации преобразователя напряжение скачком восстанавливается, однако при этом из-за резких изменений напряжения возникают и усиливаются гармонические составляющие, искажающие форму питающего напряжения.

Процесс коммутации характерен для вентильных электроприводов, имеющих реактивные элементы, способные накапливать ЭМП. У ЭПС с диодными преобразователями единственная в полупериоде коммутация начинается в момент перехода питающего напряжения через нулевую линию, и поэтому гармоники, появляющиеся при этом, имеют небольшую амплитуду. У ЭПС с тиристорными преобразователями в течение одного полупериода может быть несколько коммутаций при разном мгновенном значении напряжения. При этом свободные колебания возникают после начала и после окончания каждой коммутации и могут характеризоваться большими амплитудами.

Теоретически степень искажения формы кривой напряжения обусловлена величиной индуктивности и емкости системы электроснабжения от шин бесконечно большой мощности до токоприемника ЭПС – с одной стороны, и работой коммутационной силовой аппаратуры ЭПС – с другой. Учитывая, что ЭПС неотделим от системы тягового электроснабжения, при рассмотрении их как единого целого, принято решение: на основании опыта эксплуатации установить сопротивление системы электроснабжения не более 30 Ом. Такое значение максимального сопротивления системы электроснабжения принято в качестве норматива в новой редакции ГОСТ 6962-75 с изменением № 1 (постановление Комитета стандартизации и метрологии СССР № 1718 от 11.11.91).

Экспериментальные исследования, выполненные на участке Байкало-Амурской магистрали [6], показали, что степень качества напряжения в тяговой сети и, соответственно, на токоприемнике ЭПС изменяется в

самых широких пределах в зависимости от схемы внешнего и тягового электроснабжения, параметров тяговой сети и режимов работы ЭПС. Подтверждены факты существенного искажения формы кривой напряжения на токоприемнике ЭПС при консольном питании тяговой сети. Одной из причин этого являются повышенные индуктивное сопротивление и емкость системы электроснабжения, обусловленные большой протяженностью ЛЭП внешнего электроснабжения и режимом консольного питания межподстанционной зоны. В этих условиях наблюдалось нарушение нормальной работы блока управления выпрямительно-инверторным преобразователем, вызванное появлением дополнительных переходов кривой питающего напряжения нулевой линии в течение каждого полупериода основной частоты. В целом, проведенный анализ выявил неудовлетворительность качества электрической энергии в соответствии с действующим на время эксперимента ГОСТ 13109-67 на шинах тяговых и районных потребителей тяговой подстанции «Звездная». При этом источниками высших гармоник оказались как тяговая нагрузка, так и промышленные предприятия, имеющие общую с тяговой подстанцией систему электроснабжения напряжением 220 кВ.

### **Основные помехи в тяговой сети электрифицированной железной дороги**

*ЭМП помехи при некачественном токосъёме.* При скольжении съёмного полоза по тяговому проводу меняется величина площади касания, меняется плотность тока в контакте. Наличие резонансных частот в системе токосъема ( $f = 1-2$  Гц) приводит к отрыву контакта пантографа от тягового провода. Возникающий зазор может составлять от десятых долей мм до нескольких мм. В месте токосъема возникает электрическая дуга, излучающая широкий спектр частот ЭМП [7].

При токосъеме электроэнергии с контактной сети возможен поверхностный разряд. Такие разряды в условиях экспериментов возникают в воздухе при атмосферном давлении уже при напряжении выше 6 кВ (при ёмкости  $C=1$  мкФ). Поскольку напряжение в контактной сети значительно превышает эту величину ( $\geq 27,5$  кВ), то возможно формирование плазменных каналов, движущихся навстречу друг другу от контактного провода и токосъёмника ЭПС. При определенных условиях (достаточном напряжении и емкости) плазменный лидер перекрывает весь разрядный промежуток и происходит переход к зажиганию импульсного дугового разряда [7]. Дуговой разряд, возникающий между контактной сетью и токосъёмом ЭПС, стабилизируется под влиянием её взаимодействия с МП, созданным контактной сетью (см., например, [8]).

Однако полной стабилизации можно добиться лишь при выполнении определенных условий: при коаксиальной схеме подвода тока и определенных соотношениях между размерами электродов и проводимостями. В реальных условиях нам приходится иметь дело с электрической дугой в нестабильном состоянии. И хотя спектр излучаемых ею частот не превышает 2,0 МГц [9], наложение этого спектра на спектр высокочастотных помех линий электропередачи (к ним можно отнести ЛЭП, линии ДПР и продольного электроснабжения) может создать помехи телевизионных частот (до 100 МГц).

На пути распространяющихся высокочастотных ЭМП лежит разветвленная сеть контактных сетей, которые создают на пути полей сетчатый экран с ячейками больших размеров. В результате интерференции и дифракции возникают гармоники более высоких частот, которые попадают на принимающие антенные устройства теле- и радиосвязи.

**Широкополосные ЭМП помехи, возникающие при отражении от сетчатых структур.** Силовые ЛЭП (110, 220 кВ), питающие провода системы 2х27,5 кВ и др., создают помехи, дифрагирующие на сетчатых структурах системы заземления опор под оборудование на территории ТПС.

Существенное влияние на распределение полей вблизи таких сетчатых структур может оказать параллельная ей и расположенная в непосредственной близости слоистая среда (например, поверхность полотна железной дороги). Аналитическое исследование влияния свойств почвы и слоя снега на распределение полей вблизи сетчатых структур показало, что наиболее опасными являются случаи «резонансных» высот сетчатой поверхности [1] ( $h = n \cdot 0,5\lambda$ ,  $n = 1, 2, \dots$ ). При высоте подвеса контактной сети  $h \approx 6,0-6,5$  м попадаем в зону «резонансных» высот для частоты 49,57 МГц, при  $\lambda_2 \approx 4$  м – 76,84 МГц, при  $\lambda_3 \approx 3$  м – 92,10 МГц.

Значительное влияние на распределение ЭМП, излучаемых ЛЭП, могут оказывать находящиеся на пути распространения железобетонные строения с металлическим каркасом, которые также играют роль сетчатой структуры.

**Коммутационные процессы и ЭМП от работающего электрооборудования** – это второй по степени влияния источник импульсных помех, воздействующий на микропроцессорные системы устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) в обычных условиях эксплуатации.

Источниками коммутационных помех являются, как правило, высоковольтные выключатели и разъединители, низковольтные реле и контакторы, управляемые батареи конденсаторов. Мощные преобразователи частоты электроприводов, коронный разряд,

электроискровые технологии считаются источниками ЭМП, опасными для электронной аппаратуры. При этом пути проникновения помех в микропроцессоры могут быть разными: от прямых индуктированных наводок на провода и кабели вторичных цепей подстанций (рис. 1) [6] до импульсных и высокочастотных перенапряжений, возникающих во вторичных обмотках трансформаторов тока и напряжения.

Чем меньше время горения дуги при размыкании высоковольтной цепи коммутационным аппаратом, тем большую амплитуду имеют наведенные перенапряжения во вторичных цепях. Поэтому источниками самых больших перенапряжений являются вакуумные, элегазовые и масляные выключатели, а замыкают этот ряд воздушные выключатели. Этим обусловлена и разница в количестве повреждений микропроцессоров, возникающих при работе выключателей и разъединителей с элегазовой и воздушной изоляцией.

Следует отметить, что высоковольтные помехи могут наводиться в контрольных кабелях также при коммутации низковольтных цепей, особенно тех, в которых имеются индуктивности. При этом характер коммутационного переходного процесса зависит от большого количества факторов, из-за чего наведенные напряжения могут сильно отличаться даже на одной и той же ТПС. Теоретические расчеты таких перенапряжений связаны с большими трудностями, поэтому наиболее простой способ – непосредственные замеры.

Значительные перенапряжения, трансформируемые во вторичные цепи, возникают также при коммутации батарей конденсаторов.

Эффективной мерой борьбы с наведенными перенапряжениями на входах электронной аппаратуры и на ее зажимах питания является использование элементов с нелинейной характеристикой: газовых разрядников, варисторов, специальных полупроводниковых элементов на основе стабилитронов и других устройств, включаемых параллельно защищаемому объекту (например, параллельно входу микропроцессорного устройства релейной защиты (МУРЗ)) и между каждой клеммой этого объекта и «землей». Наилучшими характеристиками обладают на данный момент резисторы с нелинейной характеристикой, выполненные из прессованного порошка оксида цинка  $ZnO$  (реже – из карбида кремния, титаната бария и других материалов), – варисторы, которые и получили наибольшее распространение. Варисторы должны быть правильно выбраны. К сожалению, часто приходится наблюдать ситуацию, при которой варисторы даже в аппаратуре ведущих мировых производителей выбраны неверно и никакими защитными функциями фактически не обладают. Поскольку вольтамперная характеристика (ВАХ) варистора далеко не идеальна, правильно выбрать его не так-то просто.



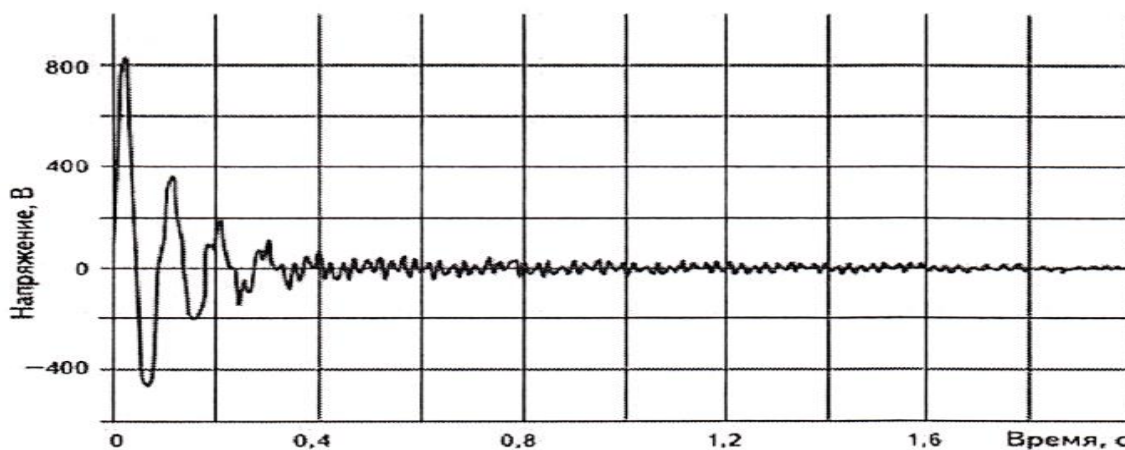


Рис. 1. Напряжение относительно «земли», наведенное в низковольтном контрольном кабеле в результате коммутационного процесса в цепи

**Грозовые разряды** являются самым мощным источником импульсных воздействий на аппаратуру ТПС. Напряжение молнии может составлять до ста миллионов вольт. В нормах строительства «громоотводов» принимают обычно ток молнии до 200 кА при длительности порядка 1 мс, хотя практически ток молнии редко превышает 20-30 кА. Температура канала при главном разряде может превышать 25000°С. Длина канала молнии – от 1 до 10 км, диаметр – несколько см. При ударе молнии в молниеотвод электрический ток (в виде импульса колоколообразной формы, рис. 2) поступает в землю и растекается в грунте во все стороны до сотен метров, причем из-за сопротивления грунта этот ток создает на нём падение напряжения. Поскольку наибольшее сопротивление оказывают слои почвы, лежащие вблизи места вхождения тока в землю, то именно здесь наблюдается самое высокое напряжение. По мере удаления от этой точки сопротивление прохождению тока уменьшается, при этом снижается и напряжение.

Для снижения потенциала, наводимого при протекании тока молнии в грунте, сопротивление растеканию тока в зоне расположения жилых и промышленных зданий и сооружений уменьшают с помощью металлической сетки достаточно большой площади, размещенной в грунте под фундаментом зданий. Однако сопротивление таких заземляющих систем все еще весьма далеко от нуля (рис. 2), и поэтому даже остаточные импульсные потенциалы, наведенные в заземляющей системе и проникающие по кабелям на входы электронной аппаратуры, представляют для нее серьезную опасность.

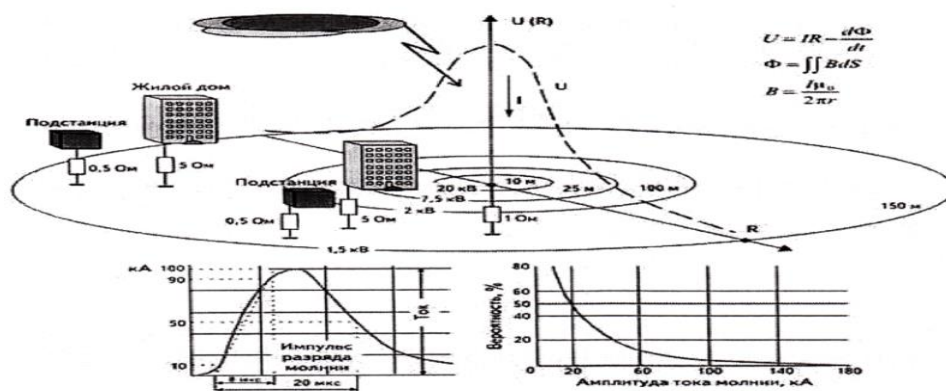


Рис. 2. Процессы, происходящие при попадании молнии в молниеотвод

Кроме помех такого вида, импульс сильного тока, проходящий по молниеотводу (кондуктивные помехи), создаёт и помехи в виде ЭМП, воздействующих на все близко расположенные проводники. Существуют еще и емкостные наводки, при которых короткие импульсы перенапряжения из высоковольтных ЛЭП попадают в низковольтные цепи через емкостные связи между обмотками трансформаторов.

В процессе распространения помехи имеет место многократное превращение одного её вида в другой, поэтому такое деление весьма условно, особенно когда речь идет о высокочастотных процессах. Импульс разрядного тока молнии с достаточно крутыми фронтами – 8 и 20 мкс (рис. 2) – можно рассматривать именно как такой высокочастотный процесс. Поэтому строгий анализ растекания тока в земле через заземляющие устройства требует учета обеих этих составляющих. Более того, попав в электронную аппаратуру посредством ЭМП или по проводам, помеха претерпевает многочисленные превращения уже внутри этой аппаратуры из-за наличия паразитных емкостных и индуктивных связей между отдельными элементами или между различными узлами аппаратуры. При этом высокочастотная составляющая помехи может проникать вглубь аппаратуры, в обход установленных фильтров и защитных элементов.

Еще один путь для проникновения помехи от разряда молнии – протекание токов по заземленному металлическому корпусу МУРЗ и заземленным экранам многочисленных кабелей, подключенных к нему. Все это говорит о том, что обеспечить должный уровень защиты электронной аппаратуры от ЭМП-помех очень непросто. Особенно сложно это сделать на ТПС, системы заземления которых проектировались для работы с электромеханической защитой, значительно более устойчивой к электромагнитным воздействиям, чем микропроцессорная. А если учесть, что опасные подъемы потенциала в цепях заземления возникают не только при ударах молнии, но и при аварийных К. З. в электрических сетях, то

проблема становится ещё более сложной. В некоторых случаях для предотвращения такого подъема потенциала в цепях электронной аппаратуры контуры заземления силового оборудования и электронной аппаратуры делают раздельными. Однако на существующих ТПС выполнить такое разделение нереально.

По нашему мнению, только комплексное решение проблемы позволит избежать влияния мощных ЭМП-помех на МУРЗ. Решение должно включать в себя:

а) использование МУРЗ на ТПС, спроектированных и построенных с учетом самых современных требований к ЭМС и рассчитанных на эксплуатацию высокочувствительной электронной аппаратуры;

б) совершенствование конструкции самих МУРЗ;

в) размещение МУРЗ в металлических шкафах, специально предназначенных для защиты электронного оборудования и снабженных фильтрами на всех кабелях, входящих в шкаф.

**Резонансные явления в тяговой сети.** При работе ЭПС с выпрямительными системами наблюдаются колебательные процессы в тяговой сети, при этом искажается форма кривой тока в тяговой сети и усиливаются высшие гармоники тока.

Известны два подхода к рассмотрению колебательных процессов. В первом исследуются собственные колебания в тяговой сети при работе ЭПС с выпрямительными системами в момент окончания коммутации. Во втором исследуется волновой колебательный процесс распространения тока по проводам тяговой сети, обусловленный ее распределенной емкостью [10].

## **Использование магнитолевитационных технологий при электродвижении**

Использование магнитолевитационных технологий при электродвижении существенно усложняет проблемы ЭМС в ЭЭЖС. Повышается как уровень магнитных и электрических связей между подсистемами и элементами ЭЭЖС, так и структура этих связей. Поэтому необходимо:

1. Переработать основные положения систем стандартизации и нормативно-технического обеспечения в ЭЭЖС, разработать и гармонизировать стандарты и другие нормативно-технические документы, обеспечивающие надёжность и безопасность электродвижения на электрифицированной железной дороге при использовании магнитной левитации.

2. Осуществить структурную перестройку устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) при управлении ЭПС.

3. Для дополнительной защиты СЦБ должно быть предусмотрено дублирование систем управления с использованием микропроцессорных устройств релейной защиты системами с электромеханическими реле, которые при всех своих недостатках в состоянии обеспечить надёжность управления ЭПС [6].

## Пути обеспечения ЭМС в ЭЭЖС

*Снижение уровня ЭМП помех от контактной сети.* Среди эффективных способов и средств защиты в контактных сетях от широкополосных высокочастотных полей помех следует **рекомендовать** [1]:

1. *Установить пассивные и активные электрические LC помехоподавляющие фильтры.* Наиболее эффективным средством снижения высокочастотных широкополосных помех на ТПС могут оказаться электрические LC -фильтры, которые желательно включать:

- в местах подключения ТПС на контактные сети (фильтр подключается к контактной сети в конце консоли и замыкается на рельс);
- на входе ТПС со стороны ЛЭП (фильтр подключается входом на входной провод тяговой подстанции, выходом на рельс).

2. *Произвести замену изоляторов и изменения в контактной сети.* Для снижения интенсивности поверхностного разряда в неблагоприятных климатических и геологических условиях необходимо увеличить длину пути тока утечки по поверхности изоляции. Для этого желательно существующие подвесные гирлянды, состоящие из четырех изоляторов ПС 70, заменить на гирлянды из четырех грязезащитных изоляторов ПСД 70-Е (с двойной юбкой). На питающей линии и линиях ДПР устанавливать по четыре изолятора ПСД 70-Е, в узлах анкеровок – по пять изоляторов ПСВ 120-Б. В качестве фиксаторных использовать стержневые изоляторы ФСФ 70-25/0,95. Существующие звеньевые струны с полимерными коушами рекомендуется заменять на сплошные токопроводящие струны из медного или бронзового канатика сечением 16 мм<sup>2</sup>. Рекомендуется также на всех опорах анкерного участка заменить заземление на «глухое» к тяговому рельсу с учетом требований ПУТЭКС.

Искрение и электродуговые процессы при взаимодействии токоприемника с контактной подвеской в отдельных зонах возникают вследствие некачественной регулировки подвески в этих зонах. Поэтому контактную подвеску необходимо отрегулировать в соответствии с требованиями ПУТЭКС и типовых проектов.

3. *Осуществить демпфирование резонансных колебаний.* В качестве основного средства снижения амплитуды резонансных колебаний можно использовать контур из последовательно соединенных активного сопротивления  $R$  и емкости  $C$ , включаемой параллельно тяговой сети. Принципиально этот контур можно установить в любой точке сети, в частности на ЭПС (параллельно вторичной обмотке трансформатора) или на подстанции.

4. *Установить нелинейные ограничители мощных кратковременных импульсов напряжения.*

5. *Обеспечить электромагнитные развязки.* Наиболее эффективным средством снижения высокочастотных широкополосных помех могут оказаться так же, как и ранее,  $LC$ -фильтры, которые можно устанавливать по всей длине тягового провода. На каждые 10-15 км тягового провода фильтр подключается входом к проводу, выходом на рельс.

6. *Осуществить снижение автоколебаний контактного провода.* Наличие собственных колебаний съёмного полоза ( $f = 1-2$  Гц) приводит к изменению искрового промежутка между ползком и тяговым проводом, что, в свою очередь, провоцирует электромагнитные колебания частотой  $f > 12$  МГц. Для исключения появления таких колебаний целесообразно заменить струнные подвесы, натяжку тягового провода и уменьшить пролет до 55 м (ранее принято 60-65 м).

Для уменьшения распространения колебаний компенсированной подвески вдоль анкерного участка и повышения её демпфирующих характеристик можно рекомендовать установку в опорных точках (наряду с рессорной струной) простых ограничительных струн. Кроме того, необходимо крепление к проводам аэродинамических стабилизаторов в виде узких пластин, изменяющих условия обтекания провода воздушным потоком и его аэродинамические характеристики.

***Снижение уровня ЭМП помех от ЛЭП.*** Для снижения поверхностной напряженности ЭП ЛЭП проектируют с расщепленными фазами и увеличивают диаметры проводов. Эти меры связаны с большими затратами. Поэтому ограничение поверхностной напряженности ЭП и, следовательно, уровня помех от линии обычно выполняется до некоторого предела, при котором радиопомехи от линии не превышают нормированного уровня. Необходимость дальнейшего снижения напряженности ЭП определяется экономическим расчетом, учитывающим потери энергии, возникающие при коронном разряде.

Необходима единая комплексная система подавления этих возмущений с применением гальванической и электромагнитной развязок; заземления; фильтрации (пассивных и активных помехоподавляющих фильтров); экранирования (пассивных и активных электромагнитных

экранов); нелинейных ограничителей мощных кратковременных импульсов напряжения; активных помехоподавляющих компенсаторов и блокировочных устройств.

Можно рекомендовать установку электрических LC-фильтров по всей длине ЛЭП. На каждые 10 км линии в населённой местности фильтр подключается входом к одной из фаз ЛЭП, выходом на систему заземления [1].

## **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. НТО. Методика расчета электромагнитных полей от железнодорожного транспорта, электрифицированного на постоянном токе. Комплексная реконструкция участка Мга - Гатчина – Ивангород и железнодорожных подходов к портам на Южном берегу Финского залива. – СПб.: МАНЭБ, 2005. – 147 с. (Работа выполнена по заказу ОАО «Ленгипротранс»).

2. Аполлонский С. М. Электромагнитная безопасность технических средств и человека. В 3-х т.: Т.2. Воздействие электромагнитной среды на технические устройства и средства защиты: Монография. - СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. – 439 с.

3. Kamra A. K. Inadvertent Modification of Atmospheric Electricity //Curr. sci. (India), 1991, v. 60, n. 11, pp. 639–646.

4. Gohberg M. B., Chirkov E. B. Electromagnetic prediction earthquakes. (Электромагнитные предвестники катастроф тектонического происхождения) //Геофизика и современный мир: Сб. докл. Междунар. науч. конф. 1993. – М., 1994. – С. 84.
5. Герман Л. А. Качество электрической энергии и его повышение в устройствах электроснабжения / Конспект лекций, ч. 2. – М., 2005.
6. Гуревич В. И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения. – М., 2014. – 256 с.
7. Власьевский С. В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока. – Хабаровск, 2001. – 138 С.
8. Демкин Н. Б. Контактное покрытие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 228 с.
9. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации. Дата введения: 13.04.2009. ОАО «ФСК ЕЭС».
10. Фрайфельд А. В., Брод Г. Н. Проектирование контактной сети. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.
11. Крылов С. М., Никифорова Н. Н. О сверхнизкочастотном электромагнитном излучении активной геологической среды //Физика Земли – 1995 – № 6 – С. 42–57.
12. Косарев А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. – М.: ИНТЕКСТ, 2004. – 272 с.

## References

1. NTO. *Metodika rascheta ehlektromagnitnyh polej ot zheleznodorozhnogo transporta, ehlektrifitsirovannogo na postoyannom toke. Kompleksnaya rekonstrukciya uchastka Mga - Gatchina – Ivangorod i zheleznodorozhnyh podhodov k portam na YUzhnom beregu Finskogo zaliva.* [STS. Method of calculation of electromagnetic fields from railway transport, electrified DC. Complete reconstruction of the Mga - Gatchina - Ivangorod and railway approaches to ports on the southern shore of the Gulf]. St. Petersburg, 2005. 147 p.
2. Apollonskiy S. M. *Ehlektromagnitnaya bezopasnost' tekhnicheskikh sredstv i cheloveka. T.2. Vozdejstvie ehlektromagnitnoj sredy na tekhnicheskie ustrojstva i sredstva zashchity: Monografiya* [Electromagnetic safety of technical facilities and human. In 3 t.: vol. 2. Exposure to electromagnetic environment on technical devices and remedies: Monograph]. St. Petersburg, 2011. 439 p.



3. Kamra K. *Curr. sci. (India)*, 1991, vol. 60, no. 11, pp. 639-646.
4. Gohberg M. B., Chirkov E. B. *Ehlektronnaya predvestnitsa katastrof tektonicheskogo proiskhozhdeniya* [Electromagnetic prediction earthquakes]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Geofizika i sovremennyy mir"* (Sat. rep. Intern. scientific. Conf. "Geophysics and the Modern World"). 1994, pp. 84
5. Herman L. *Kachestvo ehlektricheskoy ehnergii i ego povyshenie v ustroystvah ehlektrosnabzheniya. Konspekt lektsiy, ch. 2* [Quality of electric energy and its increase in power supply devices: Lectures, ch. 2]. Moscow, 2005.
6. Gurevich V. I. *Uyazvimosti mikroprocessornykh rele zashchity: problemy i resheniya* [Vulnerabilities microprocessor relay protection: problems and solutions]. Moscow, 2014. 256 p.
7. Vlashevsky S. V. *Matematicheskoe modelirovanie processov kommutatsii v vypryamitel'no-invertornykh preobrazovatelyakh ehlektrovozov odnofazno-postoyannogo toka* [Mathematical modeling of switching in the rectifier-inverter electric single-phase inverters]. Khabarovsk, 2001. 138 p.
8. Demkin N. B. *Kontaktirovanie sherohovatykh poverkhnostey* [Contacting rough surfaces]. Moscow, 1970. 228 p.
9. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya podstanciy peremennogo toka s vysshim napryazheniem 35-750 kV (NTP PS). Standart organizatsii* [Norms of technological design of substations with higher AC voltage of 35-750 kV (SS STP). Standard organization.] (Date of implementation: 13/04/2009).
10. Frayfeld V., Brod G. N. *Proektirovanie kontaktnoy seti* [Design of the contact network]. Moscow, 1991. 335 p.
11. Krylov S. M., Nikiforov N. *Fizika Zemli - Physics of the Earth*, no. 6, 1995, pp. 42-57.
12. Kosarev A. B. *Osnovy teorii ehlektricheskoy sovmestimosti sistem tyagovogo ehlektrosnabzheniya peremennogo toka* [Fundamentals of the theory of the electromagnetic compatibility of traction power supply AC]. Moscow, 2004. 272 p.

**Сведения об авторах:**

АПОЛЛОНСКИЙ Станислав Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ведущий специалист по ТПС ОАО «Ленгипротранс»  
E-mail: smapollon@yahoo.com

**Information about authors:**

APOLLONSKIY Stanislav, Dr. Sci. Sciences, Professor, Honored Worker of Science, a leading expert on traction substations of Open Joint Stock Company "LENGIPROTRANS"  
E-mail: smapollon@yahoo.com

**В. В. Шматченко, П. А. Плеханов**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

## **СОВРЕМЕННАЯ НОРМАТИВНАЯ БАЗА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА**

Дата поступления 21.07.2015

Решение о публикации 01.09.2015

Дата публикации 22.12.2015

***Аннотация:*** В статье рассмотрены вопросы нормативного обеспечения безопасности магнитолевитационного транспорта, проанализирован международный опыт и сделаны выводы применительно к российской практике.

Современные методы управления безопасностью транспортных систем основаны на принципах упреждающего реагирования на появление опасных событий. Эти принципы включают в себя:

- применение методов прогнозирования (методов априорного оценивания) при оценке безопасности и обосновании мер по обеспечению безопасности – принцип «нового подхода»;
- оценка безопасности с учетом риска от действия случайных и систематических отказов;
- управление безопасностью в комплексе с управлением надежностью, готовностью, ремонтпригодностью, материально-техническим обеспечением и стоимостью жизненного цикла.

Необходимость применения «нового подхода» к обеспечению безопасности применительно к железнодорожному транспорта, включая высокоскоростные железные дороги, формально была установлена Директивой Европейского Парламента и Совета Европы от 29.04.2004 г. № 2004/49/EC («Railway Safety Directive»). Директива предписывает использовать:

- анализ и управление риском на всех этапах жизненного цикла технических систем, участвующих в формировании перевозочной услуги, причем на ранних этапах жизненного цикла производятся прогнозные оценки рисков, которые сопоставляются с критериальными (допустимыми) значениями риска;
- единые цели в области безопасности, единые показатели достижения целей и единые методы оценки показателей на всем пространстве Европейского союза;
- единые подходы к сертификации безопасности и гармонизированные контрольно-разрешительные органы;
- единую типовую систему менеджмента безопасности, основанную на принципах международного стандарта ISO 9001.

Для развертывания деятельности по выполнению требований Директивы Европейским Комитетом по стандартизации CENELEC были разработаны и в настоящее время применяются рамочные стандарты EN 50126, EN 50128, EN 50129.

**Ключевые слова:** магнитолевитационный транспорт, нормативная база, безопасность, анализ риска, жизненный цикл, функциональная модель, гарантоспособность.

**V. V. Shmatchenko, P. A. Plekhanov**

Petersburg State Transport University

## MODERN REGULATIONS OF SAFETY ASSURANCE FOR MAGLEV TRANSPORTATION

**Abstract:** In article regulatory framework of maglev are considered, the international experience is analysed and conclusions for Russian practice are drawn.

Modern management methods of safety of transport systems are based on principles of advance to occurrence of dangerous events. These principles include:

- application of forecasting methods (aprioristic estimation methods) at an estimation of safety and substantiation of safety measures – a principle of «the new approach»;
- estimation of safety taking into account risk from action of casual and systematic failures;
- safety management in a complex with management of reliability, availability, maintainability, material support and life cycle cost.

Necessity of application of «the new approach» to railway safety, including the high-speed railways, formally has been established by the Railway Safety Directive 2004/49/EC. This Directive orders to use:

- analysis and management of risk at all life cycle stages of the technical systems participating in formation of traffic service, and at early stages of life cycle are made look-ahead estimations of risks which are compared with admissible values of risk;
- common safety targets, common safety indicators and common safety methods on all space of the European Union;
- common approaches to certification of safety and the harmonised supervision bodies;
- common typical safety management system, based on ISO 9001 principles.

For activity expansion on performance of Railway Safety Directive of the European Committee for Electrotechnical Standardization CENELEC have been developed and now frame standards EN 50126, EN 50128, EN 50129 are applied.

**Key words:** maglev, regulatory framework, safety, risk analysis, life cycle, functional model, dependability.

## Введение

Современные методы управления безопасностью транспортных систем основаны на принципах упреждающего реагирования на появление опасных событий. Эти принципы включают в себя:

- применение методов прогнозирования (методов априорного оценивания) при оценке безопасности и обосновании мер по обеспечению безопасности – принцип «нового подхода»;
- оценка безопасности с учетом риска от действия случайных и систематических отказов;
- управление безопасностью в комплексе с управлением надежностью, готовностью, ремонтпригодностью, материально-техническим обеспечением и стоимостью жизненного цикла.

### **Необходимость применения «нового подхода» к обеспечению безопасности**

Необходимость применения «нового подхода» к обеспечению безопасности применительно к железнодорожному транспорту, включая высокоскоростные железные дороги, формально была установлена Директивой Европейского Парламента и Совета Европы от 29.04.2004 г. № 2004/49/EC («Railway Safety Directive»). Директива предписывает использовать [1, 2]:

- анализ и управление риском на всех этапах жизненного цикла технических систем, участвующих в формировании перевозочной услуги, причем на ранних этапах жизненного цикла производятся прогнозные оценки рисков, которые сопоставляются с критериальными (допустимыми) значениями риска [3];
- единые цели в области безопасности, единые показатели достижения целей и единые методы оценки показателей на всем пространстве Европейского союза;
- единые подходы к сертификации безопасности и гармонизированные контрольно-разрешительные органы;
- единую типовую систему менеджмента безопасности, основанную на принципах международного стандарта ISO 9001 [4].

Для развертывания деятельности по выполнению требований Директивы Европейским Комитетом по стандартизации CENELEC были разработаны и в настоящее время применяются следующие рамочные стандарты:

- EN 50126 Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) (Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности);
- EN 50128 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems

(Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Программное обеспечение для систем железнодорожного управления и блокировки);

- EN 50129 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling (Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Безопасные электронные системы сигнализации);

- EN 50159:2010 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems (Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Безопасная передача данных в системах связи).

Это ключевые стандарты управления безопасностью совместно с надежностью, готовностью и ремонтпригодностью на железнодорожном транспорте. Успешное их применение в течение продолжительного времени разными странами привело к тому, что они получили статус стандартов Международной электротехнической комиссии (IEC): стандарты EN 50126, EN 50128, EN 50129 и EN 50159 идентифицируются, соответственно, как IEC 62278 [5], IEC 62279 [6], IEC 62425 [7] и IEC 62280 [8].

Дополнительно к указанным стандартам были также разработаны и используются следующие руководства по применению:

- CLC/TR 50126-2 Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 2: Guide to the application of EN 50126-1 for safety (Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности. Часть 2: Руководство по применению EN 50126-1 для обоснования требований по безопасности);

- CLC/TR 50126-3 Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 3: Guide to the application of EN 50126-1 for rolling stock RAM (Железнодорожные приложения – Обоснование и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности. Часть 3: Руководство по применению EN 50126-1 для обоснования требований к подвижному составу);

- CLC/TR 50506-1 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Application Guide for EN 50129. Part 1: Cross-acceptance (Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных – Руководство по применению EN 50129. Часть 1: Перекрестная приемка);

– CLC/TR 50506-2 Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Application guide for EN 50129. Part 2: Safety assurance (Железнодорожные приложения – Системы связи, сигнализации и обработки данных. – Руководство по применению EN 50129. Часть 2: Обеспечение безопасности);

– CLC/TR 50451 Railway applications – Systematic allocation of safety integrity requirements (Железнодорожные приложения – Систематизированное распределение требований по полноте безопасности).

Кроме рамочных стандартов на соответствующих этапах жизненного цикла транспортных систем используются также прикладные стандарты, которыми определяются показатели безопасности (а также надежности, готовности, ремонтпригодности и стоимости) и методы оценки этих показателей.

### Модель жизненного цикла транспортной системы

В стандарте EN 50126 действия по управлению безопасностью (а также надежностью, готовностью и ремонтпригодностью) регламентируются в соответствии с типовой моделью жизненного цикла (рис. 1).



Рис. 1. Типовая модель жизненного цикла<sup>1</sup>

<sup>1</sup> в соответствии с проектом prEN 50126-1:2012 Railway applications – The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS process (Железнодорожные приложения – Определение и подтверждение выполнения требований по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности – Часть 1: Типовой процесс RAMS)

Показанные в модели этапы жизненного цикла объединены в три группы: этапы идентификации угроз и оценки связанного с ними риска, этапы реализации системы сначала в проекте, затем – в виде аппаратно-программного комплекса, и этапы применения системы в соответствии с назначением и снятия с эксплуатации. Этими группами идентифицируется ответственность за безопасность системы: за первые 4 этапа несет ответственность заказчик, за создание системы отвечают подрядчики (проектировщики и изготовители), за эксплуатацию и обслуживание снова несет ответственность заказчик.

### Критериальные значения риска

Любое прогнозирование безопасности необходимо сопоставлять с некоторым пороговым уровнем (критерием) риска, который характеризует достаточность мероприятий по его снижению.

Одним из наиболее конструктивных подходов к формированию критерия допустимости риска является сопоставление его с уровнем минимальной эндогенной смертности в социуме, т.е. смертности человека в силу действия внутренних (естественных) причин (рис. 2).

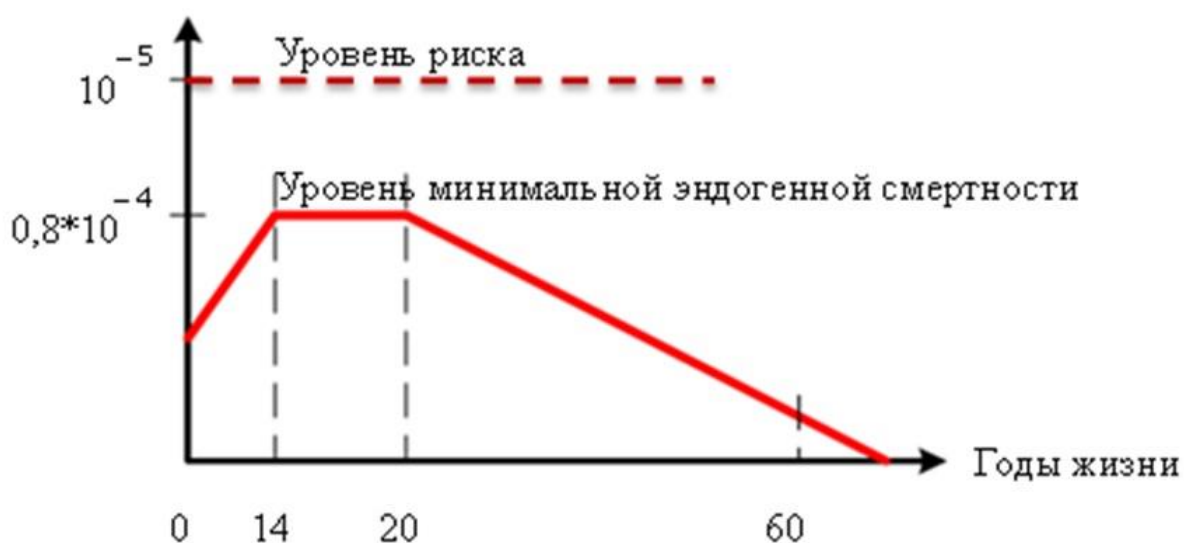


Рис. 2. Использование минимальной эндогенной смертности в качестве основы для формирования критерия допустимости риска

Иначе говоря, вероятность гибели человека в течение года от действия транспортной системы должна быть на порядок меньше вероятности гибели человека в самом жизнеспособном возрасте в силу естественных причин. При этом имеются в виду люди, непосредственно участвующие в формировании и использовании перевозочной услуги, а также другие люди в зоне действия транспортной системы.



Такой подход, применяемый в Германии, называется принципом MEM (Minimum Endogenous Mortality – минимальная эндогенная смертность). Кроме него применяются принципы ALARP в Великобритании и GAME (или GAMAB) во Франции, также рассмотренные в стандарте EN 50126.

### Функциональная модель магнитолевитационного транспорта

Критериальное значение риска, определенное в соответствии с принципом MEM (или ALARP, или GAME) для всей транспортной системы необходимо декомпозировать на внутренние подсистемы и компоненты, для чего должна использоваться функциональная модель магнитолевитационного транспорта. Она включает в себя несколько уровней иерархии и позволяет свести значение риска, допустимого для транспортной системы в целом, к допустимому риску, связанному с опасными отказами подсистем и компонентов системы (рис. 3).



Рис. 3. Фрагмент функциональной модели магнитолевитационного транспорта

Допустимый риск, связанный с компонентами системы, определяется на основе анализа угроз, действие которых возможно при функционировании компонента. Например, угроза столкновения поездов может реализоваться, как следствие следующих непосредственных ее причин:

- ошибка при определении местоположения поезда;

- ошибка управления скоростью поезда;
- ошибка задания маршрута следования поезда;
- утрата или неполнота способности к торможению;
- потеря полносоставности.

В свою очередь, каждая из этих причин может быть результатом некоторой цепочки причинно-следственных связей, в начале которой находится первичная причина – отказ техники или ошибка человека.

Очень важно учитывать принципиальную разницу между отказом техники и ошибкой человека. Она заключается в том, что для технического устройства сначала имеет место случайный отказ (событие), а затем неисправность (состояние). Ошибка человека, наоборот, представляет собой неисправность (состояние), и при обращении к объекту, в котором допущена ошибка (фрагменту компьютерной программы, устройству с ошибочной инструкцией по обслуживанию) происходит отказ – событие. Эта разница принципиально важна потому, что требует различных подходов для управления безопасностью. Отказы технических средств минимизируются на основе применения теории надежности, ошибки человека минимизируются на основе применения систем менеджмента. Возможность разнообразных сочетаний отказов техники и ошибок человека в современных транспортных системах привела к необходимости применения единой методологии управления этими сущностями – методологии управления гарантоспособностью систем.

### **Понятие «гарантоспособности»**

«Гарантоспособность» («dependability») – это свойство эргатической (т.е. человеко-машинной) системы, позволяющее обоснованно полагаться на выполнение задач, для которых она предназначена [9]. Этим определением обозначается очень плодотворная концепция, развитие которой в российском аэрокосмосе привело к созданию языка программирования «Дракон», позволяющего разрабатывать программы, практически не имеющие ошибок.

Однако, понятие «гарантоспособность» отсутствует в системе понятий отечественной нормативной базы качества и безопасности транспортных систем. Оно заменяется то надежностью, то общей надежностью, то функциональной надежностью. Это повлекло за собой необходимость иначе обозначить понятие, которое называлось надежностью раньше. В этом качестве стали применяться термины «безотказность» и «долговечность», которые часто действуют параллельно с термином «надежность» в прежнем его понимании. В итоге работа

проектировщиков серьезно затрудняется, что приводит к увеличению риска проектных (систематических) ошибок.

При этом в России действуют стандарты с традиционным представлением о надежности – например, ГОСТ Р 54257-2010 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования», в котором учтены основные нормы следующих стандартов:

- EN 1990-2002 Basis of structural design (Основы проектирования конструкций);

- ISO 2394-1998 General principles of reliability for structures (Общие принципы надежности конструкций).

Очевидно, что у разработчиков одного и того же проекта не должно быть различного понимания надежности.

### **Международный опыт стандартизации в области гарантоспособности**

Вместе с тем, управление гарантоспособностью давно является объектом детальной международной стандартизации. Этому посвящена серия из 16-ти стандартов IEC с общим названием IEC 60300 Dependability management (Менеджмент гарантоспособности):

1. IEC 60300-1 (2003-06) Dependability management – Part 1: Dependability management systems (Менеджмент гарантоспособности – Часть 1: Системы менеджмента гарантоспособности);

2. IEC 60300-2 (2004-03) Dependability management – Part 2: Guidelines for dependability management (Менеджмент гарантоспособности – Часть 2: Руководство по менеджменту гарантоспособности);

3. IEC 60300-3-1 (2003-01) Dependability management – Part 3-1: Application guide – Analysis techniques for dependability – Guide on methodology (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-1: Руководство по применению – Методы анализа гарантоспособности – Методологическое руководство);

4. IEC 60300-3-2 (2004-11) Dependability management – Part 3-2: Application guide – Collection of dependability data from the field (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-2: Руководство по применению – Сбор прикладных данных по гарантоспособности);

5. IEC 60300-3-3 (2005-08) Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-3: Руководство по применению – Оценивание стоимости жизненного цикла);

6. IEC 60300-3-4 (1996-08) Dependability management – Part 3-4: Application guide – Guide to the specification of dependability requirements (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-4: Руководство по подготовке требований гарантоспособности);

7. IEC 60300-3-5 (2001-03) Dependability management – Part 3-5: Application guide – Reliability test conditions and statistical test principles (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-5: Руководство по применению – Условия тестирования надежности и принципы статистического тестирования);

8. IEC 60300-3-7 (1999-05) Dependability management – Part 3-7: Application guide – Reliability stress screening of electronic hardware (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-7: Руководство по применению – Обеспечение надежности электронного оборудования в условиях перегрузок);

9. IEC 60300-3-9 (1995-12) Dependability management – Part 3-9: Application guide – Risk analysis of technological systems (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-9: Руководство по применению – Анализ риска технологических систем);

10. IEC 60300-3-10 (2001-01) Dependability management – Part 3-10: Application guide – Maintainability (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-10: Руководство по применению – Ремонтопригодность);

11. IEC 60300-3-11 (1999-03) Dependability management – Part 3-11: Application guide – Reliability centered maintenance (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-11: Руководство по применению – Обеспечение надежности на основе технического обслуживания);

12. IEC 60300-3-12 (2001-12) Dependability management – Part 3-12: Application guide – Integrated logistic support (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-12: Руководство по применению – Комплексное материально-техническое обеспечение);

13. IEC 60300-3-13 Dependability management – Part 3-13: Application guide – Project risk management (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-13: Руководство по применению – Менеджмент проектного риска);

14. IEC 60300-3-14 (2004-07) Dependability management – Part 3-14: Application guide – Maintenance and maintenance support (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-14: Руководство по применению – Техническое обслуживание и его обеспечение);

15. IEC 60300-3-15 (2009-02) Dependability management – Part 3-15: Guidance to engineering of system dependability (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-15: Руководство по проектированию гарантоспособности систем);

16. IEC 60300-3-16 (2008-10). Dependability management – Part 3-16: Application guide – Guideline for the specification of maintenance support services (Менеджмент гарантоспособности – Часть 3-16: Руководство по применению – Руководство по подготовке требований по техническому обслуживанию).

Уже только из перечня приведенных документов видно, что современная международная нормативная база комплексно рассматривает различные аспекты гарантоспособности: от анализа риска, связанного с применением технических систем, до затрат на создание и применение этих систем как совокупности стоимостных элементов (стандарт IEC 603000-3-3).

### **Проблемы нормативного обеспечения безопасности магнитолевитационного транспорта в России**

Из всей серии документов IEC 60300 в России используется только один стандарт – IEC 60300-3-1 (2003-01), но в двух вариантах:

1. ГОСТ Р 51901.5-2005 «Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности» (модифицирован по отношению к IEC 60300-3-1, действует);

2. ГОСТ Р 27.301-2011 «Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения» (разработан с учетом положений IEC 60300-3-1, действует).

Возникает вопрос: почему один из 16-ти стандартов переведен два раза, причем оба раза понятие «гарантоспособность» исключено из названия и текста документов, а остальные 15 – ни разу? Наверное, это связано с тем, что, во-первых, Федеральный закон «О техническом регулировании» не предусматривает обязательных требований по безопасности к перевозочной услуге, и, во-вторых, технические регламенты, требующие проведения анализа риска при использовании транспортных систем, не предлагают при этом ни единых целей в области безопасности перевозочной услуги, ни единых показателей достижения целей, ни единых методов оценки показателей.

Тем самым формируются условия для игнорирования богатейшего международного опыта создания и применения нормативной базы комплексного управления безопасностью транспортных систем, которая сегодня включает (но не исчерпывается) следующие документы: EN 50126, EN 50128, EN 50129, IEC 60300, IEC 61160, IEC 60706, IEC 61508, IEC 60812, IEC 60863, IEC 61025, IEC 61078, IEC 61165, IEC 61709, IEC 60605, IEC 61014, IEC 61070, IEC 61123, IEC 60319, MIL STD 471a, MIL STD

2173, IEC 60571, MIL STD 785B, MIL STD 756, MIL STD 1629, IEC 60812, IEC 61882 и другие.

В этой связи представляется необходимой разработка отдельного технического регламента о безопасности транспорта на магнитном подвесе, в котором, на основе требований по безопасности к перевозочной услуге и функциональной модели магнитолевитационного транспорта, были бы определены требования по безопасности к его отдельным подсистемам и компонентам.

### **Предложения по формированию нормативной базы отечественного магнитолевитационного транспорта**

В соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании», национальная нормативная база безопасности России является трехуровневой [10]. На первом (высшем) уровне располагаются технические регламенты (ТР), устанавливающие обязательные для исполнения требования по безопасности к продукции и связанным с ней процессам. На втором уровне находятся межгосударственные (ГОСТ) и национальные (ГОСТ Р) стандарты и своды правил (СП), исполняемые на добровольной основе для подтверждения соответствия требованиям технических регламентов. На третьем корпоративном уровне располагаются стандарты организаций (СТО) и технические условия (ТУ), а также специальные технические условия (СТУ), необходимость в разработке которых возникает тогда, когда требования, содержащиеся в них, превышают требования, установленные документами второго уровня, либо когда требования к соответствующей продукции и связанным с ней процессам не определены в документах первого и второго уровней.

С помощью технических регламентов устанавливаются минимально необходимые требования по безопасности, качественно определяющие необходимый уровень безопасности. Количественные показатели, используемые при подтверждении соответствия продукции и связанных с ней процессов этим требованиям, должны содержаться в стандартах и сводах правил, гармонизированных с соответствующим техническим регламентом. Принимаемые на добровольной основе стандарты и своды правил необходимы для того, чтобы правильно понять и выполнить обязательные требования соответствующих технических регламентов – они должны являться доказательной базой соблюдения технических регламентов.

При этом, в действующей системе технического регулирования из-под действия обязательных требований оказываются выведены такие виды деятельности, как выполнение работ и оказание услуг. Таким образом, на

продукцию и связанные с ней процессы распространяются как обязательные, так и добровольно исполняемые требования, а на выполнение работ и оказание услуг, в том числе, перевозочных услуг – только добровольные требования.

### **Специальные технические условия (СТУ)**

Применительно к таким системам, как магнитолевитационный транспорт, для которых отсутствует технический регламент о безопасности, системой технического регулирования, действующей в России, предусматривается разработка специальных технических условий (СТУ). При разработке СТУ можно выполнить априорное обоснование безопасности магнитолевитационного транспорта на основе анализа угроз и связанного с ними риска, которое затем будет подтверждено или скорректировано испытаниями и опытной эксплуатацией.

На основе СТУ затем необходимо будет разработать технический регламент о безопасности транспорта на магнитном подвесе.

Разработке СТУ должна предшествовать работа по формированию функциональной модели магнитолевитационного транспорта, о которой также говорилось выше. На основе этой модели в регламенте должны появиться требования по безопасности в увязке с требованиями по гарантоспособности и стоимости к отдельным подсистемам и компонентам магнитолевитационной транспортной системы как результат декомпозиции требований по безопасности к перевозочной услуге.

Примерный состав функциональной модели магнитолевитационного транспорта может быть следующим:

- функции инфраструктуры (путь, электроснабжение, автоматика и телемеханика, электросвязь, искусственные сооружения, отдельные пункты, примыкания и пересечения, полоса отвода и здания);
- функции подвижного состава;
- функции внутрисистемных и межсистемных интерфейсов;
- функции организации и управления движением;
- функции технической эксплуатации инфраструктуры и подвижного состава;
- функции обеспечения безопасности движения;
- функции обеспечения транспортной безопасности;
- функции обеспечения охраны труда, промышленной безопасности и охраны окружающей природной среды.

Вместе с разработкой СТУ необходимо сформировать перечень поддерживающих будущий технический регламент межгосударственных и национальных стандартов и сводов правил, содержащий как рамочные

стандарты по управлению безопасностью, гарантоспособностью и стоимостью магнитолевитационного транспорта, так и документы с требованиями к подсистемам и компонентам в соответствии с функциональной моделью. Такой перечень должен появиться в результате:

а) определения действующих стандартов и сводов правил, применение которых для магнитолевитационного транспорта возможно без их актуализации;

б) определения действующих стандартов и сводов правил, которые могут быть применены для магнитолевитационного транспорта после их актуализации или переработки;

в) определения стандартов и сводов правил, которые необходимо разработать.

## **Заключение**

Разработка и актуализация стандартов и сводов правил должна производиться с учетом возможности гармонизации международных нормативных документов, содержащих наилучшую практику по обеспечению безопасности, гарантоспособности и эффективности транспортных систем.

Более подробно предложения по формированию нормативной базы отечественного магнитолевитационного транспорта могут быть изложены в соответствующей концепции.

## **Библиографический список**

1. Павлов Л. Н. Обеспечение безопасности движения: европейский опыт / Л. Н. Павлов, Т. Н. Зайцева, О. Л. Целищева, В. Г. Майоров // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 7. – С. 74–77.

2. Красковский А. Е. Формирование системы обеспечения безопасности движения в межгосударственном сообщении / А. Е. Красковский, В. В. Шматченко, П. А. Плеханов // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 8. – С. 46–50.

3. Braband Jens. A proposal for common safety methods for risk assessment in European Railways / Jens Braband // Railway Gazette “SIGNAL + DRAHT”. – 2007. – № 4 (99). – pp. 34–37.

4. Шматченко В. В. Интеграция систем менеджмента качества, охраны труда, охраны природы и безопасности движения / В. В. Шматченко, В. Г. Иванов, П. А. Плеханов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2009. – № 3 (20). – С. 207–219.



5. IEC 62278 (2002) Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS).
6. IEC 62279 (2002) Railway applications – Communications, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems.
7. IEC 62425 (2007) Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling.
8. IEC 62280 (2014) Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related communication in transmission systems.
9. Паронджанов В. Д. Как улучшить работу ума: алгоритмы без программистов – это очень просто! – М.: Дело, 2001. – 360 с.
10. Плеханов П. А. Формирование нормативной базы обеспечения безопасности движения в условиях реформирования российских железных дорог / П. А. Плеханов, В. Г. Иванов // Вестник транспорта Поволжья – 2011. – № 4 (28). – С. 6–13.

## References

1. Pavlov L. N., Zaitseva T. N., Tselicheva O. L., Maiorov V. G. *Zheleznodorozhnyj transport - Railway transport*, 2007, no. 7, pp. 74-77.
2. Kraskovsky A. E., Shmatchenko V. V., Plekhanov P. A. *Zheleznodorozhnyj transport - Railway transport*, 2009, no. 8, pp. 46-50.
3. Braband Jens. *Railway Gazette "SIGNAL + DRAHT"*, 2007, no. 4 (99), pp. 34-37.
4. Shmatchenko V. V., Ivanov V. G., Plekhanov P. A. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya - Proceedings Petersburg Transport University*, 2009, no. 3(20), pp. 207-219.
5. IEC 62278 (2002) Railway applications: Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS).
6. IEC 62279 (2002) Railway applications. *Communications, signalling and processing systems. Software for railway control and protection systems*.
7. IEC 62425 (2007) Railway applications: Communication, signalling and processing systems - Safety related electronic systems for signaling.
8. IEC 62280 (2014) Railway applications: Communication, signalling and processing systems - Safety-related communication in transmission systems.
9. Parondzhanov V. D. *Kak uluchshit' rabotu uma: algoritmy bez programmistov – ehto ochen' prosto!* [How to improve mind work: algorithms without programmers it is very simple!]. Moscow, 2001. 360 p.
10. Plekhanov P. A., Ivanov V. G. *Vestnik transporta Povolzh'ya - Bulletin of the Volga transport*, 2011, no. 4 (28), pp. 6-13.

**Сведения об авторах:**

ШМАТЧЕНКО Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВПО ПГУПС); E-mail: railwayradio@gmail.com

ПЛЕХАНОВ Павел Андреевич, кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВПО ПГУПС);

E-mail: pavelplekhanov@gmail.com

**Information about authors:**

SHMATCHENKO Vladimir Vladimirovich –candidate of technical sciences (PhD in engineering), associated professor of Petersburg State Transport University  
E-mail: railwayradio@gmail.com

PLEKHANOV Pavel Andreevich – candidate of technical sciences (PhD in engineering), associated professor of Petersburg State Transport University,  
E-mail: pavelplekhanov@gmail.com

## Раздел 4. ОБРАЗОВАНИЕ

УДК 551.577.53:574.23:347.796

**Н. Н. Григорьев**

Государственный университет морского и речного флота  
имени адмирала С. О. Макарова

### **ТРАНСПОРТНЫЕ ВУЗЫ В КОНТЕКСТЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ЗАКОНА РФ № 273–ФЗ «ОБ ОБРАЗОВАНИИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»**

Дата поступления 28.08.2015

Решение о публикации 20.09.2015

Дата публикации 22.12.2015

***Аннотация:*** Российское образование находится в состоянии перманентного реформирования с 1990-х годов. Отличительными особенностями этого периода можно считать, с одной стороны, резкий отток молодых преподавателей высокого уровня из учебных заведений, а с другой – стремительный рост числа высших учебных заведений.

«Закон перехода количества в качество» неумолимо отразился не только на качестве образования выпускников вузов, но и на кадровом потенциале страны в целом. Начался стремительный рост специалистов с высшим образованием, сомнительной квалификации и частичной востребованности. В то же самое время стала исчезать или существенно минимизирована подготовка по рабочим профессиям. Дошло до того, что средние технические и профессионально-технические учебные заведения стали преобразовываться в вузы или филиалы вузов.

Для того чтобы хоть как-то упорядочить сложившуюся неопределенность, в Федеральном законе РФ № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» появляется градация вузов. По своей сути, Закон предусматривает деление вузов на четыре категории. На первые три ступени предусмотрены квоты (40 вузов). В четвертую категорию вошли все прочие вузы, в том числе и ВУЗы занимающиеся подготовкой специалистов транспортной отрасли. Подход в определенной степени субъективный.

В 2013 году показатель ВВП по категории «Транспорт и связь» составил 8%, что соответствует четвертому месту в структуре валовой добавленной стоимости России.

Нормативно-подушевое финансирование в вузах, включенных в четвертую категорию, скажется на качестве подготовки, и, в отличие от гуманитариев, последствия не будут носить отсроченный характер, а проявят себя ростом аварийности на транспорте.

Учитывая значимость транспорта для России, кажется странным столь безразличное отношение к главной составляющей успеха в транспортных отраслях – к кадрам.

**Ключевые слова:** образование, Федеральный закон, нормативно-подушевое финансирование, транспортные вузы.

**Nikolay N. GRIGOREV**

Admiral makarov State University of Maritime and Inland Shipping

TRANSPORT UNIVERSITIES ARE IN THE CONTEXT OF THE FEDERAL LAW № 273-FZ «ON EDUCATION IN RUSSIAN FEDERATION»)

**Abstract:** The education in Russia since 1990 year remains in a state of permanent reformation. Distinctive characteristics of this period can be stated on the one hand as the abrupt flow-out of the high grade young professors from the Higher educational units and on the other hand head long growth of the quantity of the said units. The law of «Transition of quantity into quality» had an inexorable effect not only on the quality of education of the graduates but on the personnel potential of the Russia in general. Rapid growth of the quantity of the Higher education specialists of questionable qualification and partial demand have started. At the same time the skill conversion practically disappeared. And technical colleges started to transform into universities or branches of those. In order to regulate existing uncertainty the gradation of the Higher educational units appears in the Federal Law РФ № 273-ФЗ «Education in Russian Federation». As a matter of fact that Law stipulates 4 grades of Higher educational units, whereof for the first three quotas of 40 units are envisaged. All remaining units, including those engaged in education of the specialists in the field of transportation. Such approach to the problem seems to be rather subjective.

In the year of 2013 the index of GDP (Gross domestic product) in the category «Transport and communication» was some 8% which corresponds to the fourth place in the structure of the Gross added cost in Russia.

Normative per person financing in the Higher educational units of the fourth grade will negatively influence the quality of education and contrary to the humanitarians the after-effects will not be of deferred character but will directly cause the increase of accidents at the transport. Taking into account the importance of the transport for the Russia it seems quite strange such indifferent approach to the personnel which plays the most important part of success in the field of transportation.

**Key words:** Education, Federal law, Normative per person financing, Transportation Higher educational units.

## **Введение**

Если в СССР было 600 вузов, то к 2010-м годам в России их стало уже около 3000, и это на фоне полного развала среднего и начального профессионального образования. Точное количество вузов в стране не поддается учету. Множатся, а точнее, плодятся филиалы. Численность студентов в бюджетных вузах растет за счет внебюджетных мест и появления новых «модных» специальностей, непрофильных для большинства вузов. В сугубо технических вузах инженерные специальности стали «растворяться» в гуманитарных. Вузам стало тесно в

рамках традиционного названия – институт, и они трансформируются в университеты. Как известно, количество переходит в качество, поэтому университеты метко стали называть «универсами».

Для того чтобы хоть как-то упорядочить сложившуюся неопределенность, в Федеральном законе РФ № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» появляется градация вузов. По своей сути, Закон предусматривает деление вузов на четыре категории. На первые три ступени предусмотрены квоты. Четвертая ступень – все прочие вузы. Подход в определенной степени субъективный, как это уже было с сохранением военной подготовки в ВУЗах, когда так же были установлены квоты по регионам [1].

### **Современное состояние в области высшего образования**

Вопрос оптимизации в области высшего образования назрел давно [2, 3]. До настоящего времени число мест в вузах регламентировалось численностью выпускников средних школ, платежеспособностью родителей выпускника и желанием получить диплом. Такой подход привел к девальвации высшего образования.

Началась конкурентная борьба между вузами за абитуриента. О правилах честной борьбы в сложившейся ситуации говорить не приходится. Численность неуспевающих студентов резко пошла на убыль. Это коснулось большинства вузов. Оценки стали ставить не за знание, а за лояльность к вузу со стороны студента. Студент «заказывает музыку». Многие вузы, которые по числу факультетов и специальностей выросли до масштабов университетов, – главным образом за счет непрофильных специальностей, – стали добиваться повышения своего статуса. «Микс» принес свои плоды – качество высшего образования стало резко снижаться. Первыми это ощутили работодатели в тех отраслях, где заняты реальной деятельностью, влияющей на состояние экономики государства. Поскольку экономика страны находилась в состоянии стагнации, многие ранее популярные профессии перешли в разряд непопулярных. На передовые позиции вышли, наоборот, ранее непопулярные профессии.

В системе образования произошел перекос в сторону гуманитарных профессий. Опять-таки, финансовая сторона возобладавала. Во-первых, гуманитарное образование требует меньших финансовых вложений. Во-вторых, эффект негативных последствий некачественного гуманитарного образования носит отсроченный характер.

Снижение качества школьного образования особенно отразилось в области естественных дисциплин. В гуманитарных дисциплинах, не зная одну тему, можно преуспеть в знании другой темы. В естественных

дисциплинах каждой теме предшествует тема, из которой вытекает следующая, поэтому при изучении естественных дисциплин пробелы в тематике преобразуются в «снежный ком». В психологии такое явление получило название «плато на кривой обучения». Время идет, а результата нет. Для учащегося это опасное состояние. В период нахождения на «плато кривой обучения», с помощью педагогов, родителей и самого учащегося рождается вердикт – неспособен к обучению.

Что же случилось с российским образованием? Выступая на конференции Всероссийского молодёжного форума «Селигер-2007», министр образования А. Фурсенко назвал советскую систему образования косной, обвинив ее в том, что она «упорно пыталась готовить человека-творца». Ныне же, по его мнению, «главное – взрастить потребителя, который сможет правильно использовать достижения и технологии, разработанные другими». Если ориентироваться только на взращивание потребителя, отпадает главная цель человеческого существования – самореализация.

Нелишним будет напомнить о «косной советской системе образования». Вот как о ней отзывается американский публицист Фрэнк Гибней: «Япония располагает после России наиболее эффективной и массовой системой народного образования» [5]. Здесь важно подчеркнуть – «эффективной и массовой». Президент США Джон Кеннеди открыто признался еще в начале 1960-х годов: «Космос мы проиграли русским за школьной партой».

Да, российские школьники и студенты в последние годы становятся победителями международных олимпиад, но это воспитанники элитных колледжей и вузов, представляющих собой островки былого «эффективного и массового» советского образования.

«Взрачивание потребителя» – это опасный путь, поскольку «потребитель» быстро понимает, что гораздо приятнее потреблять то, что произвели другие. Производство ради других потребителю кажется нерентабельным.

Так какая же задача стоит перед образованием? Еще Плутарх ответил на этот вопрос: «Ученик – это не сосуд, который надо наполнить, а факел, который надо зажечь». С введением ЕГЭ российская система образования занялась наполнением «сосудов» информацией и тем самым перешла к «взрачиванию потребителя».

Но если следовать логике А.А. Фурсенко, который выразил свое мнение об уровне российского образования [7]: «Сегодня любой пятиклассник знает больше своего учителя», – процесс зашел в тупик. Выходит, учитель нужен только до пятого класса. А дальше установка на производство «потребителя» завершит процесс его формирования.

В диссонанс А. Фурсенко высказался Д. Медведев, комментируя успехи российских школьников летом 2012 года в Сингапуре, где прошла 37-я Международная физическая олимпиада, в которой они завоевали две золотые и три серебряные медали: «Российское образование находится на должном уровне». Правильнее было бы сказать, что на должном уровне находятся «маленькие островки» от «материка» бывшего советского образования.

С началом распада СССР Запад адекватно отреагировал на ситуацию, сложившуюся в России, в том числе и в области образования. Открывшиеся границы позволяют лучшим специалистам уезжать в Европу и Америку, где они востребованы и где свое образование далеко не лучшее.

Наиболее массовый отток высококвалифицированных специалистов пришелся на моряков. Морское образование в Советском Союзе было на высоком уровне. Западные судовладельцы, привлекая на работу российских моряков, получили ощутимую прибыль за счет выплаты более низких зарплат, сохраняя при этом высокий уровень квалификации.

В итоге страна осталась без морского флота и без квалифицированных кадров. Репутации России как великой морской державы был нанесен урон.

## **Реформы в сфере высшего образования**

В.В. Путин в одном из выступлений сказал: «Все реформы образования будут обречены, если не будет меняться сам педагог, не будут меняться условия его работы и жизни».

По мере «отрезвления» реформы приобретают витиеватый вид. ВУЗы, с целью повышения качества образования, объединяют и тем самым якобы «повышают» их статус. Возникает вопрос, а с каких это пор и по каким физическим законам слабое звено, – вставленное в прочную цепь, – сделало цепь крепче? Д.А. Медведев успокаивал студентов и их родителей тем, что после объединения (присоединения) к более сильному вузу они получат диплом, который будет выше котироваться у работодателя. Вот только смена названия вуза и гербовой печати в дипломе единого образца знаний не прибавляет.

Объединение вузов проходит болезненно, вопреки утверждениям ректоров и чиновников. Вузы как люди, у них есть свой менталитет, который формировался многими десятилетиями, а у иных даже столетиями. В.И. Вернадский писал: «Из множества средних умов не создать одного Ньютона или Фарадея». А объединение нескольких слабых



вузов или присоединение слабых вузов к сильным не приведет к появлению новых Оксфордов и Кембриджей.

В соответствии с Федеральным законом РФ № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», ВУЗы делятся на четыре категории. При этом существенно изменяются условия финансирования в зависимости от статуса. В число счастливиц включено сорок вузов.

Законодательно наибольшие права предоставлены двум национальным университетам, которые находятся вне управления Министерства образования и науки РФ. Они финансируются напрямую из федерального бюджета, имеют собственные образовательные стандарты, выдают дипломы собственного образца, присваивают собственные ученые степени, их ректоры назначаются непосредственно президентом. Перечисленные вузы получают значительные бюджетные средства на развитие, федеральные и национальные исследовательские университеты имеют специальную поддержку Министерства образования и науки РФ по разделу «поддержка ведущих ВУЗов».

Вузы, не попавшие в элитную группу и включенные в четвертую категорию, представляющие подавляющее большинство высших учебных заведений, остаются без специальной государственной поддержки. В число вузов, оставшихся без государственной поддержки, попали все транспортные вузы, а ведь транспорт относится к четырем основным видам деятельности, которые способствуют прогрессу человечества: земледелие, промышленность, информация и транспорт.

### **Кадровые проблемы в сфере транспорта**

Как сообщил на VI Международном форуме «Транспорт России» руководитель Администрации Президента РФ С. Иванов, «валовая добавленная стоимость, созданная на транспорте, за последние 10 лет увеличилась в два раза. На сегодняшний день вклад транспорта в ВВП России составляет 7%». В 2013 году показатель ВВП по категории «Транспорт и связь» составил 8%, что соответствует четвертому месту в структуре валовой добавленной стоимости России.

Геополитическое пространство Российского государства дает значительное преимущество для развития одного из самых значимых направлений экономики – морского флота. Примерно 90% грузов в мире перевозится морским транспортом. В России около 60% всех перевозок выполняется водным транспортом.

При этом на судах под российским флагом перевозится лишь 2,9% всех экспортно-импортных грузов (во времена Советского Союза этот показатель составлял 50 – 65%). Россия позиционирует себя как великая



морская держава. Еще во времена английской королевы Виктории было провозглашено: «Кто владеет морем, тот владеет миром». Иметь самую протяженную береговую черту явно недостаточно для мирового господства. В современных условиях это еще и объем перевозимых грузов. Для сравнения: Дания на судах под своим флагом перевозит 10% грузов всех мировых морских перевозок.

Потенциал морского судоходства для России трудно переоценить. Судоходство – это огромный рынок, от которого зависит экономика страны. Судоходство – это привлечение инвестиций, создание дополнительных высокооплачиваемых рабочих мест.

«Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» «направлена на обеспечение интересов Российской Федерации в Мировом океане, предусмотренных в “Морской доктрине Российской Федерации на период до 2020 года”, поддержание сбалансированности специализированного флота, а также на развитие морской деятельности в целом».

Возникает вопрос, кто и каким образом будет реализовывать Стратегию и Доктрину при условии, что морские учебные заведения, в соответствии с Федеральным законом РФ № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», будут предоставлены сами себе. Рассчитывать на заказы и поддержку российского судоходного бизнеса не приходится. Крупных судоходных компаний практически нет, а мелкие компании сами вынуждены выживать в условиях несовершенного законодательства и коррупции.

Нормативно-подушевое финансирование в вузах, включенных в четвертую категорию, скажется на качестве подготовки, и, в отличие от гуманитариев, последствия не будут носить отсроченный характер, а проявят себя ростом аварийности.

В мире такая тенденция уже наметилась с 1970-х годов. На основании исследований Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), особенно участились транспортные катастрофы, прежде всего морские и речные.

Начальник отдела организации расследования транспортных происшествий Федеральной службы по надзору в сфере транспорта (Ространснадзор) И. Игнатов в ходе Восьмого международного форума «Связь на море и реке–2012» сообщил, что основными причинами аварийности на флоте являются: низкая квалификация, сознательное игнорирование правил и нарушение дисциплины.

Данные ООН показывают, что «техногенные катастрофы – третьи среди всех видов стихийных бедствий по числу погибших. Технический прогресс неминуемо повышает риск таких катастроф, причем их причиной

зачастую становится “человеческий фактор”, основанный на глупости, небрежности и корысти». Однако следовало бы уточнить, по чьей глупости, небрежности и корысти столь живуча и высока аварийность по причине человеческого фактора?

Пожалуй, главным фактором техногенных аварий является все-таки корысть. Последствия корысти, выраженные в цифрах: по данным CRED, уровень смертности в результате техногенных катастроф, произошедших за период с 1994 по 2003 годы, в индустриально развитых странах составляет 0,9 погибших на 1 млн жителей, для наименее развитых стран – 3,1 смертельных случаев на 1 млн.

Учитывая значимость морского флота для России, кажется странным столь безразличное отношение к главной составляющей успеха в судоходной отрасли – к кадрам. Адмирал флота СССР Кузнецов говорил: «Будут кадры – будет флот». Именно по причине отсутствия кадров Россия заказала строительство «Мистралей» во Франции. Танкеры и газовозы строят в Юго-Восточной Азии по тем же самым причинам. Есть еще одно направление, которое упущено отечественным судостроением, – строительство вспомогательного флота, который нужен для строительства портов, портовой инфраструктуры, подходных каналов и их поддержания на должном уровне.

Подготовка кадров для судоходной отрасли носит бессистемный характер. Причина – недооценка значимости и потенциала морского транспорта в экономике государства. Морской транспорт, как специфическая отрасль, должен быть в поле зрения государства. В результате пренебрежительного отношения отечественный флот «стареет». Сегодня средний возраст флота, поднадзорного Российскому морскому регистру судоходства, превышает двадцать лет, а средний возраст судов, поднадзорных Речному регистру, – старше сорока лет.

Подготовка кадров для морского флота – одна из дорогостоящих, а учитывая, что уже продолжительное время наблюдается недофинансирование, с вступлением в действие Федерального закона РФ № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» ситуация усугубится.

В настоящее время, когда престиж морских профессий резко снизился, наблюдается снижение качества будущих специалистов уже на уровне приема абитуриентов (по данным Министерства образования «Качество приема в государственные вузы РФ по профилю–2012»).

Государственная морская академия имени адмирала С.О. Макарова находилась на 406-м месте (среди 500 государственных вузов); средний балл зачисленных по результатам ЕГЭ (в расчете на один предмет) – 55,6. Морская государственная академия имени адмирала Ф.Ф. Ушакова на

450-м месте, средний балл 52,2. Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского на 455-м месте со средним баллом 51,9. Санкт-Петербургский государственный морской технический университет на 385-м месте со средним баллом 56,6. Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций на 309-м месте со средним баллом 59,9.

Как видим, средний балл ЕГЭ зачисленных по конкурсу (в расчете на один предмет) в морские вузы – менее 60 баллов. В соответствии с Болонской системой образования оценке «удовлетворительно» (по пятибалльной системе) должно соответствовать 64 балла.

Вывод: в морских учебных заведениях проблемы с качеством образования начинаются уже на стадии приема.

Аналогичная ситуация сложилась и в других транспортных вузах, где средний проходной балл либо ниже 64, либо незначительно выше:

- Уральский государственный университет путей сообщения (Екатеринбург) – 65,5 балла,
- Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации – 65,4 балла,
- Московский государственный университет путей сообщения – 65,1 балла,
- Петербургский государственный университет путей сообщения – 64,1 балла,
- Ростовский государственный университет путей сообщения – 63,6 балла.

Выступая на X съезде Союза ректоров России 30 октября 2014 года, Президент РФ В. Путин рекомендовал ректорам не принимать троечников в ВУЗы. Однако законных оснований отказывать троечнику при поступлении в вузы нет. Минимальное количество проходных баллов по дисциплинам на основании ЕГЭ установлено распоряжением Рособнадзора от 04.09.2014 №1701-10. Нижняя планка, установленная чиновниками в качестве проходного балла, выглядит следующим образом: русский язык – 36 баллов, математика – 27 баллов, обществознание – 40 баллов, информатика – 40 баллов, физика, химия и биология – 36 баллов, история – 32 балла, иностранные языки – 22 балла, география – 37 баллов. Как видим, математике – «королеве наук» – отведено скромное место.

Конечно, непопулярность транспортных профессий сказывается на качестве приема, но не всё благополучно и в других вузах – из числа 40 «избранных», рейтинг которых значительно выше. Вот фрагмент интервью ректора НИЯУ МИФИ М.Н. Стриханова («Эхо Москвы» 09.11.2011): «Нас приятно удивило, что на чисто научную специальность «Прикладная

математика и физика» конкурс был 18,5 человек на место, проходной балл был в районе 90. В общем, мы находимся где-то на 10-11 месте в общероссийском рейтинге, что очень хорошо для нашего университета».

И далее...

«“Эхо Москвы”: – Уровень знаний поступающих год от года увеличивается или понижается?

Ректор: – К сожалению, не скажу что очень сильно, но по сравнению с абитуриентами 15-летней давности уровень знаний понижается. В целом от школьного уровня до уровня первокурсника мы вынуждены почти целый семестр студентов доучивать физике и математике. Эта проблема существует в большинстве сильных технических университетов».

Увы, проблема некачественного школьного образования приобрела перманентный характер.

### **Кадровое обеспечение вузов**

Особое внимание следует уделить профессорско-преподавательскому составу морских учебных заведений. Если говорить о профессионалах, то связанных непосредственно с отраслью становится все меньше. Отсутствие стажировок на современных судах негативно сказывается и на качестве подготовки. В прежние годы преподаватели выпускающих кафедр проходили стажировку раз в пять лет. Кроме того, руководство плавательными практиками пополняло практический опыт преподавателя. Многие преподаватели во время плавательных практик и стажировок совмещали руководство практикой с исполнением обязанностей штатного члена экипажа. Все это позволяло поддерживать качество преподавания на должном уровне. Особую ценность приносили те, кто после продолжительной работы на судах переходили на преподавательскую работу. Личный опыт богаче любого учебника.

Что же касается учебно-вспомогательного состава, то практически такового нет. Обязанности лаборанта перешли к преподавателю.

Другая серьезная проблема в области морского образования – отсутствие учебно-производственных судов, что существенно снижает качество подготовки, так как курсантов младших курсов судоходные компании неохотно берут на практику из-за отсутствия практического опыта. Особенно ситуация усугубляется с организацией практики курсантов из средних учебных заведений, в связи с их возрастом.

И, наконец, о научной работе в морской отрасли. Вот что говорил лауреат Нобелевской премии Г. Селье о значении качества образования: «Среди нас должен оставаться кто-то, кто будет обучать людей совершенствовать средства для обозрения горизонта, а не для еще более

пристального взглядывания в бесконечно малое» [6]. Не следует забывать, что «горизонты» морского образования также нуждаются в тех, кто будет их обзирать. В былые времена на каждой кафедре велись НИР и ХДТ, которые вносили существенный вклад в отечественную науку. Например, на кафедре Технических средств судовождения ГМА имени адмирала С.О. Макарова существовали две научные школы: в области корректируемых гирокомпасов и магнитных компасов. За разработки в области приборостроения (динамически настраиваемые гироскопы) профессору Е.Л. Смирнову была присуждена Государственная премия СССР. Разработки профессора В.В. Воронова, связанные с уничтожением девиации магнитного компаса, используются как в отечественных магнитных компасах, так и за рубежом.

Нельзя устанавливать зависимость количества преподавателей от количества учащихся, в контексте пункта 2 статьи 99 Федерального закона от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» – «нормативные затраты на оказание государственной или муниципальной услуги в сфере образования определяются в расчете на одного обучающегося». Этой статьей вводится универсальное нормативно-подушевое финансирование образовательной деятельности. Это недальновидная политика. В случае отчисления десяти неуспевающих студентов есть два варианта: первый – снизить зарплату всем преподавателям, и второй – уволить одного преподавателя. Естественно предположить, что уволенным окажется тот, кто более «рьяно» добивался реальных успехов от учащихся. Уместно вспомнить слова Бернарда Шоу: «У реформаторов есть представление, что любого изменения можно достичь одним лишь грубым здравомыслием».

В связи с переходом на нормативно-подушевое финансирование возникают проблемы и нравственного характера. Оказавшись перед дилеммой – ставить неудовлетворительную оценку учащемуся или положительную при явно неудовлетворительном ответе, – преподаватель оказывается на грани выбора: выбора порога собственной нравственности. В случае объективной оценки знаний ему угрожает или снижение заработной платы, или увольнение по «профнепригодности». И в этом таится опасность утери нравственности у молодого поколения. Ведь именно Учитель, – по мнению Н.К. Рериха, – «является проводником идей позитивно творящего правительства».

Сегодня россияне наибольшее доверие испытывают к ученым и учителям. Однако за последние годы эти показатели доверия существенно снизились: к ученым – с 71 до 66%, к учителям – с 68 до 63%. А вот политиков россияне склонны воспринимать скорее с недоверием, 53% не



склонны доверять им, госслужащим и полицейским не доверяют 52% предпринимателям – 50%.

В прежние годы качество образования в России являлось доминирующим. При отчислении неуспевающих учащихся это не отражалось на преподавателях даже в трудные предвоенные годы. В своих воспоминаниях советский лингвист-востоковед, арабист Т. Шумовский говорит, что на первый курс Ленинградского государственного университета вместе с ним поступило пятнадцать человек, а к третьему курсу он остался один. О том, что кого-то из преподавателей университета уволили, не было сказано ни слова.

История морского образования в России имеет интересный опыт, причем становление морского образования в СССР в какой-то степени повторило опыт Петра I. Царь буквально силой насаждал в стране морское образование. В 1944 году Государственный Комитет обороны постановлением № ГКО-5311 издал Указ о создании системы закрытых высших и средних морских заведений. Первый набор Ленинградского высшего мореходного училища в 1944 году был сформирован из числа студентов-отличников первых и вторых курсов других вузов страны. Набор двух факультетов состоял из 21 курсанта, которым преподавали 27 известных моряков-ученых [4].

Процент отчислений в Ленинградском высшем инженерном морском училище имени адмирала С.О. Макарова составлял примерно 20-25%. Неудивительно, что качество образования морских учебных заведений не вызывало сомнения. Программы и сама подготовка велись так, что выпускник с приходом на судно допускался к несению самостоятельной ходовой вахты без каких-либо стажировок.

Сегодня научная мысль в морском образовании находится в состоянии стагнации. Профессия моряка-ученого попала в разряд непопулярных. Усилия царя Петра, мечтающего о России как крупной морской державе, сведены на нет.

## **Выводы**

Применительно к образованию в сфере транспорта следует отойти от формальной оценки эффективности вуза. Государство должно способствовать отрасли, которая имеет высокий потенциал для развития экономики. Для этого следует использовать опыт МВД и МЧС, когда непрестижные ранее профессии вошли в разряд престижных благодаря достойному финансированию.

Специфика работы на транспорте имеет ряд особенностей, которыми нельзя пренебрегать. Формировать у будущих специалистов навыки работы в экстремальных условиях следует в процессе обучения.

Привыкание к профессии должно начинаться с первых дней обучения. Процесс адаптации позволит подготовить будущего специалиста к дальнейшей работе на транспорте. За время обучения молодые ребята, а ныне и девушки приобретают не только знания, но и опыт руководства, чувство ответственности, приобщаются к работе в коллективе.

В условиях настоящего времени было бы целесообразным придать транспортным вузам статус закрытых учебных заведений. Существование системы закрытых учебных заведений оправдано опытом – как самой России, так и других стран.

Кажется, российские работодатели недостаточно оценили свои преимущества, которые позволили бы убедить политиков и законодателей в том, что система подготовки специалистов для транспортной отрасли неотъемлема от высокоразвитой экономики. Именно работодатели способны и должны поддержать систему транспортного образования в нашей стране. Такая поддержка способна продвинуть не только экономику, но и способствовать, пожалуй, самой острой проблеме нашего общества – возрождению нравственности.

### **Библиографический список**

1. Григорьев Н. Н. Будут кадры – будет флот/ Морской флот – 2015 – № 1 – С. 38–43.
2. Григорьев Н. Н. Как обустроить морское образование в России / Транспорт РФ – 2008 – № 1(14), – С. 68–72.
3. Григорьев Н. Н. Белые пятна морского образования. Транспорт РФ, 5(18) 2008, – С. 68–71.
4. Жерлачов А. В. Мои воспоминания. Морская школа, 14 – СПб: Центр развития личности, 2013 – 419 с.
5. Овчинников В. В. Сакура и дуб – М.: АСТ, Восток – Запад, 2008. – 448 с.
6. Селье Г. От мечты к открытию / Как стать ученым – М.: Прогресс, 1987. – 368 с.
7. Фурсенко А. А. «Мы учителей не обманываем», Еженедельник «Аргументы и Факты», № 50, 14.12.2011.

## References

1. Grigorev N. N. *Morskoj flot - Maritime fleet*, 2015, no. 1, pp. 38-43.
2. Grigorev N. N. *Transport Rossijskoj Federacii - Transport of the Russian Federation*, 2008, no. 1(14), pp. 68-72.
3. Grigorev N. N. *Transport Rossijskoj Federacii - Transport of the Russian Federation*, 2008, no. 5(18), pp. 68-71.
4. Zherlachov A. V. *My Memories. The Maritime School, 14* [My Memories. The Maritime School, 14]. St. Petersburg, 2013. 419 p.
5. Ovchinnikov V. V. *Sakura i dub* [Sakura and Oak]. Moscow, 2008. 448 p.
6. Selye G. *Ot mechty k otkrytiyu. Kak stat' uchenym* [From Dream to Discovery: On Being a Scientist]. Moscow, 1987. 368 p.
7. Fursenko A. A. “*My uchitelej ne obmanyvaem*” [We teachers do not lie]. *Ezhenedel'nik “Argumenty i Fakty” - The Weekly “Arguments and Facts”*, no. 50, 14/12/2011.

### Сведения об авторе:

ГРИГОРЬЕВ Николай Николаевич, профессор кафедры «Технические средства навигации», к.т.н.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»  
E-mail: n.grigoriev-1948@mail.ru

### Information about author:

Nikolay N. GRIGOREV, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
E-mail: n.grigoriev-1948@mail.ru